

La ciencia y sus demonios

Jimena Canales

Descartes, Maxwell, Darwin, Einstein,
Feynman... La fascinante historia
de los grandes «demonios» en la ciencia

«Una visión brillante y estimulante
de la filosofía del descubrimiento
científico». *Science*



La ciencia y sus demonios

Jimena Canales

Descartes, Maxwell, Darwin, Einstein,
Feynman... La fascinante historia
de los grandes «demonios» en la ciencia

«Una visión brillante y estimulante
de la filosofía del descubrimiento
científico». *Science*



LA CIENCIA Y SUS DEMONIOS

Título original: Bedeviled: A Shadow History of Demons in Science

© del texto: Jimena Canales, 2020, 2024

© de la traducción: Àlex Guardia, 2024

© de esta edición: Arpa & Alfil Editores, S. L.

Primera edición: junio de 2024

ISBN: 978-84-10313-05-7

Diseño de colección: Enric Jardí

Diseño de cubierta: Anna Juvé

Maquetación: El Taller del Llibre, S. L.

Producción del ePub: booqlab

Arpa

Manila, 65

08034 Barcelona

arpaeditores.com

Reservados todos los derechos.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

Jimena Canales
LA CIENCIA Y SUS DEMONIOS

Traducción de Àlex Guardia

arpa

SUMARIO

[PRÓLOGO](#)

[INTRODUCCIÓN](#)

[I. El genio maligno de Descartes](#)

[II. La inteligencia de Laplace](#)

[III. El demonio de Darwin](#)

[IV. El demonio de Maxwell](#)

[V. El demonio del azar](#)

[VI. Los demonios en el movimiento aleatorio](#)

[VII. Los fantasmas de Einstein](#)

VIII. Los demonios cuánticos

IX. Los demonios y la bomba atómica

X. Los demonios cibernéticos

XI. Los demonios informáticos

XII. Agujeros negros y computación cuántica

XIII. Los demonios de la biología

XIV. Los demonios en la sociedad

CONCLUSIÓN. LA AUDACIA DE NUESTRA IMAGINACIÓN

EPÍLOGO. CONSIDERACIONES FILOSÓFICAS

BIBLIOGRAFÍA

NOTAS

A Billy, que hizo volar mi imaginación.

PRÓLOGO

Cuando nos acercamos al fondo del problema, más densa se vuelve la neblina. Lo que más nos inquieta es lo más difícil de confrontar. Obstáculos cada vez más altos se alzan frente a nosotros. La brújula falla y no sabemos si viajamos en la dirección correcta. ¿Qué nos motiva a seguir, y a qué coste?

Tras haber dedicado décadas de estudio a la historia de la ciencia, me había faltado comunicar lo más importante sobre el tema. La falta residía en que lo que quería decir iba radicalmente a contracorriente. La mayoría de los estudios sobre la ciencia se enfocan en cómo se usa para confirmar y consolidar lo mucho que sabemos. Resaltan su gran utilidad para entender y manipular el mundo a nuestro alrededor y cómo nos acerca a la verdad y a la certitud. Pero lo más emocionante de la ciencia me parecía justo lo contrario. Los aspectos de la ciencia que cambian nuestra realidad palpable, que abren nuevos territorios frente a nosotros, y que introducen novedades insospechadas que no entendemos a fondo y que no sabemos cómo controlar.

La ciencia es capaz de cambiar nuestra realidad de tal manera que verdades y tecnologías que anteriormente se consideraba irreales e imposibles se introducen en este mundo. Algunas de estas nuevas tecnologías nos despistan moral y físicamente, y, en vez de ayudarnos a entender y controlar nuestro entorno, aumentan el número de incertidumbres con las cuales tenemos que lidiar, obligándonos a idear soluciones cada vez más osadas, potentes, y hasta peligrosas.

Frente a tal reto es más fácil callar y hablar solo de los aspectos de la ciencia que confirman lo que ya sabemos. Estos aspectos de la ciencia han sido popularizados por numerosos defensores que frecuentemente hablan del «método científico» o del «método experimental» como procesos infalibles para distinguir verdades de falsedades. Este enfoque deja fuera el campo del descubrimiento y la investigación. De los dos filos de la ciencia, uno descarta mientras el otro descubre. Uno nos lleva a cerrar conclusiones, mientras el otro nos acerca a lo inesperado. Uno nos devuelve a lo conocido, el otro nos lanza hacia la invención y la creación de lo nuevo.

En el seno de la ciencia yace esta paradoja: aunque las leyes científicas destacan por ser incuestionables y definitivas, estas siguen siendo mejoradas, pulidas e incluso de vez en cuando revocadas. La ciencia crece cuando los investigadores la llevan a nuevos límites, intentando rebasar en inteligencia a los más inteligentes, en grandeza a los más grandes, en pequeñez a los más pequeños, en lentitud a los más lentos y en velocidad a los más veloces. Las leyes científicas son sólidas, pero no fijas, y nuestra imaginación es la mejor herramienta para ampliarlas y mejorarlas. Los investigadores se enfocan en entender lo que aún no sabemos con nuevos descubrimientos. El vaso de la ciencia está medio vacío y la puerta del Partenón de lo Real está abierta de par en par.

El desarrollo tecnológico de los últimos siglos ha superado las expectativas más precoces. Consideremos como ejemplo las reflexiones del físico Max Born, colega cercano de Albert Einstein. Cuando Born era joven «no había automóviles, ni aviones, ni comunicación inalámbrica, ni radio, ni cine, ni televisión, ni cadenas de montaje, ni producción en masa, ni todo lo demás». El desarrollo de la física moderna en la cual él mismo participó contribuyó al descubrimiento de estas tecnologías, pero ni él ni ninguno de sus colegas pudieron predecir estas innovaciones. Aun cuando los científicos trabajan en las áreas que sirven para entender y desarrollar nuevas tecnologías, los investigadores simplemente no ven los cambios que emergen bajo sus narices. Las consecuencias de sus descubrimientos los sobrepasan. Brindándonos una de las explicaciones más honestas sobre los puntos ciegos de los científicos en cuanto al impacto de sus propias investigaciones, Born admitió: «Si alguien hubiera descrito las aplicaciones técnicas de este conocimiento tal como existen ahora, habría sido objeto de burla». Si los científicos fallan al tratar de predecir los efectos de sus propias investigaciones en la sociedad, los escritores de ficción especulativa, empeñados en imaginar mundos futuros, tampoco aciertan.

¿Cómo explicamos la trayectoria de la ciencia y la tecnología desde la máquina de vapor al microchip, o desde los primeros autómatas de la Revolución Científica a la inteligencia artificial actual? Si no se puede rastrear el desarrollo de las innovaciones tecnológicas en los actos y propósitos conscientes de los científicos, ¿de qué otra forma podemos entenderla? Cada mañana los científicos se levantan, van al laboratorio, escriben artículos, imparten cursos, forman a sus compañeros, reciben algún que otro premio y elogio, se jubilan y mueren. La sociología y la antropología han seguido atentamente cada uno de sus pasos. Esta senda tiene una lógica clara que funciona de forma fragmentaria, pero, en un momento dado del trayecto, parece que irrumpe algo más grande que los

propios actores. Tan compleja es la interconexión entre ciencia y tecnología, tan confuso su desarrollo a lo largo de la historia, que es importante ir más a fondo: ¿qué precede a ambas? La sorprendente naturaleza del descubrimiento y la invención nos hace sospechar que una especie de fuerza inconsciente conspira tras los límites de la razón e impulsa su desarrollo desde el exterior.

Durante el proceso de investigación, algunos de los científicos más exitosos de la historia han usado la palabra «demonio» para designar un ser hipotético que sirve como herramienta heurística para refinar el conocimiento y extenderlo a un territorio novedoso. Cuando el universo no funciona como debería, los investigadores empiezan a buscar inmediatamente a un culpable. Se suele antropomorfizar a estos causantes.

No por ser imaginarios, dejan de ser importantes. Todo lo contrario. Cuando los científicos se lanzan hacia lo desconocido intentando darles vida, diseñando nuevos experimentos y tecnologías para imitar sus hazañas, los demonios salen del mundo de la imaginación. El trueque entre lo real y lo imaginario es lo que nos permite forjar nuevos conocimientos. Podemos aplaudir al Homo sapiens por haber aprendido a planificar y calcular como ninguna otra especie anterior, y al Homo faber por haber utilizado las herramientas mejor que todos sus predecesores, pero parece que hemos olvidado quién fue el creador de la creatividad, el Homo imaginor.

Tras la persecución de nuevas tecnologías yace una gran tradición que abarca cuatro siglos y gira alrededor de la búsqueda de demonios con características, habilidades y vestimentas particulares. «La palabra demonio no debe utilizarse a la ligera», apunté en notas que se convertirían en este libro. Me puse a recabar material para trazar un retrato preciso y detallado sobre estos seres misteriosos. Opté por empezar algunas décadas antes del año 1666 y terminar una década después del año 1999. El expediente que tenía ante mí me convenció de que los científicos no se comportaban para nada como solíamos creer. Estos textos parecían contradecir una de las virtudes más ensalzadas de la ciencia y su hito más indisputable: que la ciencia es un proceso eficaz con el cual podemos distinguir de manera clara y definitiva lo real de lo irreal, tras la extirpación de falsedades, supersticiones, y seres imaginarios y sobrenaturales del mundo verídico.

¿Quiénes son estos seres que pululan las mejores mentes científicas? ¿Cómo pasan de la imaginación a los laboratorios y a otros ámbitos de la cultura? Un

relato de las aventuras de los personajes centrales de la investigación científica es a la vez un retrato del universo tal y como lo hemos llegado a conocer, lleno de misterios y posibilidades. Emocionada y llena de impaciencia, llegué a la conclusión de que, para entender el papel de la ciencia y la tecnología en la gran lucha entre el mal y el bien, nuestro nuevo milenio necesita una demonología moderna para la Edad de la Razón.

INTRODUCCIÓN

Hoy los demonios ya no solo se encuentran en las iglesias, en las pinturas antiguas, o en los grimorios de hechizos y conjuros. Aparecen en textos clásicos de ciencia y filosofía moderna, escritos por pensadores ilustres y científicos reconocidos. A partir del siglo xix, revistas prestigiosas como Nature y American Journal of Physics comenzaron a publicar artículos sobre ellos. Otras publicaciones científicas especializadas, como Scientific American, han narrado sus aventuras. Incluso grandes medios como The New York Times han difundido noticias sensacionales sobre los demonios de la ciencia. Algunos han cobrado tanta influencia que aparecen en libros de texto. Los más importantes entre ellos han sido personajes clave en el desarrollo de algunas de las áreas fundamentales de la ciencia, como la termodinámica, la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica.

Los autores de estos documentos usan la palabra «demonio» para designar algo que no comprenden del todo. Suelen recurrir a esta inquietante denominación al no tener una palabra mejor, usándola a faute de mieux. Una vez dotados con el apellido del científico que empezó a especular sobre su posible existencia, los usan para articular y llenar las lagunas del conocimiento.

Si nos paseamos por la historia de la ciencia y la tecnología, vemos que muchas innovaciones desembocan en arrepentimiento. El entusiasmo inicial del investigador rápidamente se convierte en angustia y da paso a un examen de conciencia: «Pero ¿qué he hecho?». La historia de la ciencia está llena de memorias retrospectivas de científicos que se arrepintieron del uso que se dio a sus investigaciones.

El conocimiento tiene dos filos. Los peligros del conocimiento, desde el mismísimo instante en que nació el concepto, se han interpretado en referencia a los demonios. En la Biblia, la expulsión de Adán y Eva del jardín del Edén presenta el conocimiento como una transgresión. Una criatura diabólica, más astuta que cualquier otro animal salvaje, tienta a Adán y Eva a morder el fruto prohibido.

La mujer vio que el fruto del árbol era bueno para comer, y que tenía buen aspecto y era deseable para adquirir sabiduría, así que tomó de su fruto y comió. Luego le dio a su esposo, y también él comió.

Desde que fueron escritas esas palabras en algún momento del siglo v o vi a. C., se han repetido hasta la saciedad. Aunque son especialmente importantes en la tradición judeocristiana, su influencia sobre las demás culturas ha sido considerable. Hasta hoy, el deseo irrefrenable de adquirir nuevos conocimientos para llegar a la sabiduría sigue considerándose transgresor y, a veces, hasta pecaminoso. El término hebreo arum que describía a la serpiente se puede traducir por «sabia», «inteligente», «astuta», «avispada», «ladina», «sutil», «hábil», «artera» y «taimada».

Antes del relato de Adán y Eva hubo mitos con temas similares. Los mitos de Prometeo e Ícaro se cuentan entre los más conocidos de una lista interminable. La idea de la tecnología como arma de doble filo ya aparecía en la leyenda de Hércules, que disparó sus flechas envenenadas a sus enemigos y luego vio cómo volvían subrepticamente para acabar con su incauto creador. Otro conocido relato antiguo sobre los peligros de la tecnología es el del Gólem. En ese cuento hebreo, el protagonista da vida a un trozo de arcilla que cumple la mayoría de los designios de su creador, pero que al final rompe sus cadenas y deja tras de sí un reguero de destrucción y ruina. Otras narraciones que beben de temas parecidos son las de Talos, un soldado artificial hecho de metal; Galatea, creada por Pigmalión para ser más grande que la vida, y Pandora, quien abrió la caja de los males de Zeus.

En el medievo, los cuentos que denunciaban los peligros morales de la ciencia y la tecnología empleaban tropos similares. En el siglo vi, se solía citar al clérigo Teófilo de Adana para subrayar los peligros de intercambiar el alma por la promesa de un conocimiento total. La leyenda medieval de Fausto recordaba a los oyentes que firmar un pacto con el diablo a cambio de un conocimiento ilimitado podía provocar consecuencias nefastas. El célebre relato de Johann von Goethe dio nueva vida a esos antiguos mitos cristianos y medievales en el siglo XIX. En Frankenstein o el moderno Prometeo, Mary Shelley se inspiró tanto en estos temas que incluso subtítulo su obra con una referencia al antiguo mito.

Numerosos autores menos célebres abordan cuestiones similares, a veces

expresando creencias prosaicas y banales sobre los peligros de saber demasiado. Esta clase de historias suelen estar protagonizadas por personajes como Adán y Eva, tentados por demonios para explorar más y aumentar su saber, hasta que a veces aprenden demasiado y se sienten fatalmente atraídos por conocimientos prohibidos o secretos. Desde la antigüedad, poetas y literatos nos han brindado relatos increíbles sobre los demonios. Algunos los describen como personificaciones del mal; otros, como fuerzas benignas, e, incluso como en el ejemplo del demonio de Sócrates, como vocécitas interiores que afectan nuestra conciencia moral. La literatura clásica y moderna, las películas de terror y los cómics están repletos de demonios y diablos que deambulan indistintamente entre los géneros populares más vulgares y más cultos.

Lucifer, Belcebú y Satanás son algunos de los demonios más ilustres de la religión. El de Sócrates es uno de los más conocidos de la filosofía. En la literatura hay muchos: el Lucifer de Dante, el Próspero de Shakespeare, el Satanás de Milton, el Mefistófeles de Goethe y el Frankenstein de Shelley son algunos de los más conocidos. Estos demonios comparten ciertas características con los demonios de la ciencia, pero no todas. Aunque no son isomorfos —ya que no tienen cola, cuernos, pezuñas ni colmillos—, siguen siendo isofuncionales en ciertos aspectos clave.

El conocimiento nos otorga poder, pero tras obtenerlo tenemos que afrontar la dificultad añadida de que el poder no distingue por sí mismo entre el bien y el mal. Vivimos con el miedo de que nuestras innovaciones más preciadas en ciencia y tecnología caigan en manos equivocadas y sean utilizadas con fines censurables. Incluso en el mejor de los casos, cuando la ciencia y la tecnología se desarrollan con objetivos virtuosos y honorables, se pueden adaptar para fines destructivos. Los pesticidas desarrollados para mejorar la agricultura se han utilizado en cámaras de gas contra personas inocentes; los ingredientes de los fertilizantes se pueden usar fabricar bombas; los cohetes que usamos para explorar el espacio exterior pueden transportar armas de destrucción masiva; las vacunas se pueden modificar perfectamente para la guerra biológica; la cura de una enfermedad genética puede convertirse en la base de las intervenciones eugenésicas, y un implemento que soluciona un problema puede ser utilizado como una herramienta para cometer un crimen. El mismo utensilio puede servir para curar o para herir. Un sueño puede convertirse en una pesadilla en un abrir y cerrar de ojos. ¿Por qué pensamos que la curiosidad mató al gato? Dicho de otra forma, ¿hay algo casi siempre demoníaco en la búsqueda del conocimiento? ¿Por qué la inteligencia y la sabiduría se vinculan tan directamente a lo pecaminoso y

lo anárquico, tanto en el ejemplo bíblico de Adán y Eva como en otros?

DEMONIOS IMAGINARIOS Y RETOS REALES

¿Es puramente una coincidencia que los científicos suelen utilizar la palabra demonio en las fases más preliminares de sus investigaciones para designar algo que aún no conocen bien o comprenden del todo? Los demonios de la ciencia no son monstruosos ni malignos, tampoco son criaturas religiosas o folclóricas. Se refieren a algo o alguien que desafía nuestro conocimiento actual e incluso puede derrumbar una hipótesis o poner una ley natural preestablecida en juego. Su función no es metafórica. Es un término técnico en el argot del laboratorio que aparece en casi cualquier diccionario.

El Oxford English Dictionary define los demonios en la ciencia como «cualquiera de las diversas entidades teóricas que poseen habilidades especiales utilizadas en experimentos mentales científicos». Muchas veces se mencionan de forma epónima, «en referencia a la persona concreta asociada con el experimento», y siguen un patrón originado en René Descartes, el filósofo del siglo xvii conocido por inaugurar la Edad de la Razón. Tradicionalmente se les bautiza con el apellido del científico que abordó el enigma por primera vez. Los demonios de la ciencia no se presentan como antítesis de los ángeles, sino que tienen su propio lugar en una jerarquía de seres similares. Hay investigadores que aluden a esos demonios en masculino; otros, en femenino, e incluso en género neutro.

El demonio de Descartes abrió las compuertas a muchos otros. Le siguió el demonio de Laplace, que podía conocer todo el pasado e incluso el futuro al calcular el movimiento de todas las partículas del universo. Así se convirtió en un modelo para computadoras y ordenadores. Al cabo de poco, el demonio de Descartes y el demonio de Laplace se enfrentaron con el victoriano demonio de Maxwell, que podía causar estragos en el curso normal de la naturaleza. A medida que la ciencia ganaba en prestigio y complejidad, se fueron invocando y bautizando muchos demonios con los nombres de Charles Darwin, Albert Einstein, Max Planck, Richard Feynman y otros así hasta la actualidad.

Las entradas del diccionario revelan un secreto a voces dentro de una comunidad

muy cerrada: «La ciencia no ha acabado con los demonios» y estudiarlos puede ser de lo más útil. Para conocer el mundo, mejorarlo y superar escollos insalvables y callejones sin salida, hay que buscarlos. El progreso de la ciencia y la tecnología ha estado marcado por las investigaciones sobre la existencia o inexistencia de una magnífica y abigarrada comitiva de seres imaginarios, una auténtica camarilla de personajes pintorescos con atuendos, inclinaciones y habilidades características que son capaces de desafiar las leyes establecidas. Para atraparlos, los científicos intentan pensar como ellos. Esta expresión acarrea consecuencias inquietantes por una razón principal: se encuentra lo que se busca.

UN MUNDO SIN DEMONIOS

Comúnmente se piensa que la ciencia puede servir como un arma contra todo tipo de creencias pseudocientíficas y supersticiosas, que nos puede ayudar a combatir las mentiras propagadas por charlatanes farsantes y avivadas por la superstición. El ilustre cosmólogo y divulgador científico Carl Sagan alabó la ciencia precisamente por esa virtud. En su libro de 1996, *El mundo y sus demonios*, Sagan describió el método científico como «el sutil arte de detectar falsedades» que nos permite descartar creencias irracionales de este mundo.

La propuesta de Sagan es certera. Cuando no nos es fácil distinguir lo irreal de lo real, podemos acotar la situación poniéndola a prueba; es decir, haciendo un experimento. Si alguna vez crees haber visto un demonio, piénsatelo dos veces. ¿Estabas nervioso, confundido, ebrio o drogado? Si la respuesta es negativa y lo que viste no parece haber originado de una alucinación mental, otros experimentos pueden ayudarte a comprender tal extraña percepción. Enciende las luces. Comprueba que las ventanas hayan sido cerradas. Busca huellas sospechosas. Anota la hora precisa de su aparición. Prepárate ingeniosamente para atrapar al culpable la próxima vez que venga. Esparce harina por el suelo de la habitación para ver si alguien ha entrado de puntillas. Si no encuentras huellas, es muy improbable que el culpable haya sido un ser bípedo. Haciendo este tipo de pruebas sucesivamente, eventualmente podrás resolver el misterio. Al eliminar hipótesis falsas con un telescopio, microscopio o placa de Petri, el científico actúa como un valeroso caballero que elimina los obstáculos que ofuscan la verdad, como si fuera un gran héroe matando un demonio en forma de

dragón.

Las personas sensatas actúan de la misma manera que los científicos cuando alteran las condiciones de su entorno para descartar hipótesis falsas y llegar al fondo de cualquier asunto desentrañando la verdad. El proceso de «ensayo y error», que caracteriza las técnicas experimentales y forma la base del pensamiento racional, sirve para descartar la existencia de un sinnúmero de seres hipotéticos. Pero no todo lo que nos parece inverosímil e imposible se puede descartar de este mundo para siempre.

Sagan, como la mayoría de los divulgadores científicos, se enfocó en promulgar la función descartadora de la ciencia. Aun así, no dejó de admitir que durante la búsqueda de la verdad frecuentemente surgen novedades imprevistas. «Si supiéramos de antemano lo que íbamos a encontrar, no tendríamos necesidad de ir». Y añade: «Es posible, quizás hasta probable, que [...] durante el proceso científico] encontremos sorpresas, incluso algunas de proporciones míticas».

El hecho de que todavía no se haya encontrado algo no significa que nunca se vaya a encontrar en un futuro. Para demostrar que la búsqueda científica no tiene fin, el filósofo J. Ayer juzgó pertinente el ejemplo del Abominable Hombre de las Nieves. Hasta ahora nadie lo ha encontrado, pero ¿podemos decir que nunca nadie lo encontrará? Ya que sería casi imposible encontrar pruebas incontestables de su inexistencia a lo largo de todo el tiempo y el espacio «no podemos afirmar que no existan los Abominables Hombres de las Nieves». Ayer concluyó: «El hecho de que no se haya logrado encontrar ninguno no prueba de forma concluyente que no exista ninguno». Es importante distinguir entre lo que no existe ahora y lo que nunca existirá.

¿Cómo surgen nuevos conocimientos a partir de leyes previamente acordadas? No buscamos nuevas entidades a ciegas. Antes de indagar en las leyes fundamentales de la naturaleza, los científicos se equipan como navegantes a punto de emprender una larga travesía hacia un fin desconocido. Los programas de investigación bien financiados priorizan los temas que merecen más atención. Los científicos con más experiencia ubican y diluyen la zona de rastro, sabiendo dónde es más conveniente buscar, qué aspecto podrían ostentar los nuevos descubrimientos, qué propiedades podrían poseer y de qué podrían ser capaces. Se necesitan años y años de educación y formación para prepararse, y muchas horas de estudio para conocer de pe a pa toda la bibliografía preexistente sobre un tema.

Una parte esencial del estudio de todo joven científico consiste en agudizar su imaginación. Como dice un refrán popularizado por el científico Louis Pasteur, el azar solo favorece a las mentes bien preparadas. Estas mentes son las que han sabido cómo imaginar.

Al mundo académico siempre le han fascinado los momentos de descubrimiento científico, cuando un científico brillante tiene una idea rompedora. Algo hace clic en la mente de alguien y todo encaja de nueva manera. De repente, parece que lo que hasta entonces era invisible había estado escondido a plena luz del día. Los grandes avances suelen llegar cuando uno menos lo espera. Lo imposible deja de serlo. El resultado aparenta ser pura magia. A todos nos llega la inspiración: escritores, artistas, científicos, tanto como la gente común. Aunque muchos expertos se han propuesto estudiar la imaginación, comúnmente se asume que su papel en la ciencia es secundario e imposible de estudiar. Los momentos de inspiración a menudo se consideran como un «arte privado» demasiado rebelde para ser analizado, embrionario, resbaladizo y sombrío, fuera de los límites de la investigación racional, y tal vez incluso perdido irremediablemente en el inconsciente.

La imaginación en la ciencia se sigue representando como un id incómodo escondido tras el ego científico, como algo que viene de fuera del laboratorio y que se cuelga de vez en cuando ahí con astucia, entrando como un hermano que nos avergüenza o un hijo bastardo proveniente de las artes y las humanidades que se presenta sin haber sido invitado. Pero su fuerza no se detiene cuando los científicos entran en el laboratorio o escriben sus ecuaciones. La imaginación impregna todo el proceso científico, desde la teoría a la publicación de los resultados, pasando por la experimentación.

Los procesos que nos llevan al descubrimiento no se pueden seguir reduciendo a momentos «eureka» entrañables. Tienen su propia historia—retorcida, fascinante y, en ocasiones, aterradora—y su propio vocabulario técnico. Gracias a su particular linaje ancestral, la categoría de «demonio» ha sido particularmente útil para reflexionar sobre las limitaciones del mundo natural.

¿Adónde nos lleva la imaginación? Hay muchas similitudes entre los demonios antiguos, religiosos, populares y científicos. En todas las civilizaciones, ya sean antiguas o modernas, occidentales o no occidentales, sus rasgos clave han sido sorprendentemente constantes. Han causado estragos curiosos en el mundo natural. Los demonios antiguos y modernos aparecen en lugares similares y

actúan de formas muy parecidas tanto en el pasado como en el presente. En una amplia gama de disciplinas y épocas, numerosos pensadores han coincidido a la hora de valorar dónde y cuándo es más probable que el mundo se vierta en sentidos improbables. Aunque se suele decir que la ciencia de hoy es la tecnología de mañana, el nexo histórico de la ciencia con la tecnología no ha sido tan directo ni cristalino. Los mismos científicos tienden a desconocer las repercusiones de sus propias investigaciones, y, a veces, cuanto más metidos están en el tema, más lejos están de comprender sus efectos generales.

EN EL PASADO, ASÍ COMO EN EL PRESENTE

Pese a que hemos querido contenerlos con el poder de la razón, los demonios no han dejado de mutar. Para examinar la transformación de su figura en los tiempos modernos, tenemos que hacer un recorrido mundial por la ciencia. A partir del siglo XVII, los demonios emigraron de los Países Bajos a la Francia revolucionaria. De allí viajaron a la Inglaterra victoriana, antes de llegar con grandes dificultades a Alemania y establecerse de nuevo en Francia. Emigraron de Europa a Estados Unidos en las décadas previas a la Segunda Guerra Mundial. Primero llegaron a los departamentos de Física de Princeton y Harvard y luego se trasladaron a las iniciativas pioneras en cibernética e informática del MIT. De la Costa Este se mudaron hacia poniente, primero a los espaciosos laboratorios públicos del Medio Oeste, luego a California y, por último, a institutos multidisciplinarios y privados esparcidos por todo el país.

Ahora trabajan en todos los campos de la ciencia y por todo el planeta. Célebres físicos, biólogos celulares y evolutivos, neurocientíficos y psicólogos cognitivos, sociólogos y economistas están ojo avizor para leer las últimas investigaciones sobre estas criaturitas. A finales del milenio, nuestras propias sinapsis cerebrales se entendían aludiendo a ellas. Los demonios ya no son externos a nuestra mente ni al propio conocimiento. Sus habilidades se consideran contiguas a las nuestras, en algunos sentidos, al no tener poderes absolutos que las religiones monoteístas suelen atribuir a Dios. Están sometidos al mismo orden natural que nosotros. Son mejores que nosotros en algunos aspectos, ya que a menudo están dotados de mentes y sentidos más agudos y cuerpos más rápidos y ágiles, pero son mucho peores que nosotros en otros sentidos. Su capacidad de acción, como

la nuestra, es limitada.

Pensar en los demonios nos fuerza a ser más listos que ellos. Ellos, tanto como nosotros, tienen que aprender. Tienen que trabajar. Intentan subvertir el orden que los rige, pero solo pueden hacerlo poco a poco y dentro de unos límites. Hacen lo que pueden, y no más. En las leyendas tradicionales tanto como en la ciencia, son diestros manipuladores de las causas naturales explotando lo oculto y lo anómalo. Por eso están a la vanguardia de la tecnología. Para estos innovadores de pura cepa, la originalidad es la norma. Desafían las expectativas y se deleitan con la sorpresa, por lo que descubrir les resulta natural.

Cuando leemos un libro, nos probamos el último casco de realidad virtual, nos sentamos en un teatro de última generación o admiramos el cosmos desde el cómodo asiento de un planetario, nos convertimos adrede en víctimas del demonio de Descartes. El genio de Descartes sigue inspirando a investigadores para crear narraciones y espectáculos más realistas y tecnologías de entretenimiento perfectas. Otro demonio pseudocartesiano ahora es reconocido como el que provoca el sesgo de confirmación en internet, atrapando a sus víctimas en burbujas mediáticas y cámaras de eco y mostrándoles únicamente los hechos en los que quieren creer. Cuando los científicos introducen demonios, los recién nacidos heredan la sagacidad de los ancianos. Lejos de debilitarlos, la edad parece fortalecerlos.

Comprender las semejanzas entre los viejos demonios y los nuevos es tan importante como entender sus diferencias. La cultura científica moderna todavía se basa en prácticas ancestrales. Actividades básicas tales como la clasificación, recolección y almacenamiento son igual de relevantes que siempre. Algunos de los primeros artefactos de la civilización humana, como las ollas y las vasijas de piedra y barro, eran herramientas ideadas para seleccionar y separar. Los demonios clasificadores, que preceden al ser de Maxwell en casi medio milenio, se vinculan a tareas serviles y a la sumisión, tareas repetitivas que se acumulan para provocar grandes efectos. Desde tiempos bíblicos, se ha atribuido a la práctica de clasificación un componente moral y se ha descrito a Dios como el ser capaz de distinguir a los honrados de los injustos, como un pastor que separa las ovejas de las cabras. Esos nexos perviven en la etimología de la palabra inglesa *sorcery* (hechicería), que comparte raíz latina con *sort*, clasificar. En las ilustraciones de las prácticas de clasificación suele haber ángeles y demonios como ayudantes, a veces trabajando con tridentes y otros utensilios. Estos contenedores aislados siguen siendo necesarios para guardar lo que se había

separado. Los yinns (término árabe del que procede la palabra genio) suelen vivir encerrados en botellas. El genio de Aladino, sin ir más lejos, vive dentro de una lámpara y solo se despierta al frotarla o abrirla. En las ilustraciones del infierno cristiano, los pecadores suelen representarse en calderos llenos de líquidos hirviendo. Y la entrada al averno o al cielo suele ser un portón con bisagras vigilado de cerca por un demonio o un ángel. El demonio de Maxwell sigue operando con puertas y recipientes aislados.

Tanto los antiguos como los nuevos demonios se sienten cómodos cambiando el orden regular de los acontecimientos, pero solo de los antiguos se dice que usaban conjuros de magia negra a la inversa para lanzar hechizos y descifrar mensajes ocultos. Ambos se asocian con el ruido, pero solo los viejos demonios se vinculan al estruendo de las tormentas eléctricas, al aullido del viento o al susurro de las hojas. Ambos se encuentran en espacios caóticos, pero solo en los relatos antiguos aparecen demonios cuando dos corrientes meteorológicas chocan durante una tempestad. Tanto los demonios antiguos como los nuevos interfieren en la reproducción biológica, pero solo los primeros lo hacen en forma de íncubos y súcubos.

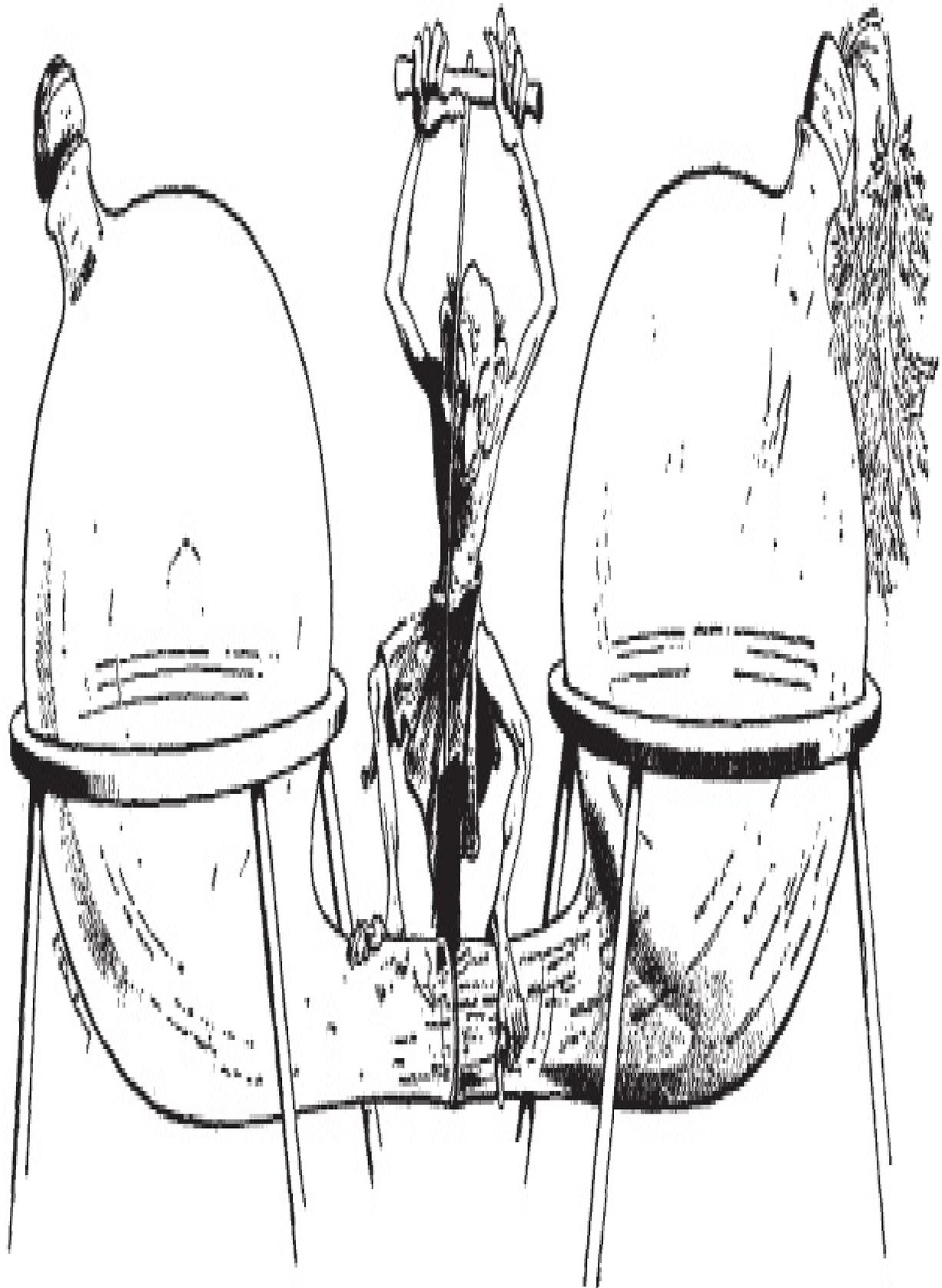


FIGURA 1. El demonio de Maxwell en acción.

Las descripciones científicas de la balanza y el equilibrio, en las que aparece el demonio de Maxwell seleccionando moléculas a diestro y siniestro, comparten las convenciones iconográficas del juicio final. Con frecuencia, los demonios cristianos se representaban interfiriendo en la balanza de los arcángeles, sobre todo en la de san Miguel; eran los psicopompos encargados de pesar las almas. Durante mucho tiempo, la justicia se ha plasmado como una mujer ciega, mientras que los demonios conocidos por interferir en ella aparecen como observadores, tanto en la física como en otros campos. Para cualquier ciencia basada en la medición, el pesaje es elemental. Es un acto que consiste en clasificar, normalmente con los platillos de una balanza. En la física, la exactitud requiere una balanza equilibrada e inalterada por demonios.

Los demonios merodean por parajes donde brilla la oportunidad, como el fulcro o la balanza (símbolo de igualdad y justicia), donde acciones diminutas pueden aumentar la desigualdad. En el pasado, así como en el presente, los demonios se dedicaban a hacer cumplir los contratos. Limitaban el arrepentimiento y pasaban cuentas por los pecados. En la Edad Media, se les solía representar como cobradores de rentas. Cuando alguien se negaba a pagar, solían llevarse un alma o una vida humana a cambio del pago adeudado. En los textos científicos, el demonio de Maxwell y el de Gabor aparecen como cobradores de un universo concebido entrópicamente: nadie puede obtener beneficios de la nada. Cuando aparece un trabajo sin el gasto preceptivo, a menudo se sospecha de un demonio. El ejemplo más claro es el demonio del azar de la teoría económica, así como la criatura de Maxwell.

En la sección Guemará del Talmud se dice que Yosef el sheida poseía el poder de la transmisión instantánea, mientras que otros shedim (vocablo hebreo para referirse a los

demonios) viajaban a velocidades vertiginosas planeando y surcando el aire. Los demonios, diablos y otras criaturas sobrenaturales se han asociado siempre con velocidades extremas y medios de transporte ficticios. La velocidad es típica de los cuentos de hadas y los poemas épicos protagonizados por genios o divs

(«demonios» en persa). Este poder también es fundamental en las representaciones cristianas de la divinidad. Las demonologías del siglo xvii solían hablar de brujas que viajaban muy lejos en una sola noche para celebrar sus reuniones del sabbat, y muchos de los demonios tratados en este libro son rápidos como el rayo. El más evidente es el colega del demonio de Maxwell.

Además de ser extremadamente rápidos, los demonios de Laplace, Maxwell y Maxwell-Szilárd-Brillouin, los demonios cuánticos de Einstein, Compton, Born y Planck y los de nuestras células y cerebros (Monod y Searle) tienden a ser muy grandes o muy pequeños. Los demonios enormes guardan algún parecido con los gigantes de los cuentos teutónicos del norte, que personifican las fuerzas brutas de la naturaleza. Pero a diferencia de esos gigantes, que a menudo son estúpidos y fáciles de engañar, los demonios y diablos cristianos, como el Behemot, suelen ser mucho más difíciles de embaucar. Con un cerebro más grande y una memoria casi infinita, el demonio de Laplace comparte esas dimensiones míticas. La pequeñez extrema también es característica. La mayoría de las criaturas diminutas son pícaras y compensan su reducido tamaño —o, a veces, su falta total de masa— operando a velocidades increíbles y acoplándose a puntos de apoyo con los que casi pueden levantar el mundo. La ciencia intelectual y los conocimientos elevados de los expertos contrastan con la fascinación popular por el tamaño y la velocidad extremos.

Algunos demonios se vinculan con la luz o la oscuridad; el más ilustre es Lucifer. En la física moderna, los demonios de Maxwell, su colega y otros demonios cuánticos son maestros manejando la luz, la electricidad y la información. Ya en Platón se describía a los demonios buenos como transportistas encargados de llevar mensajes de los humanos a los dioses del Olimpo, a veces en forma de plegarias. También eran capaces de llevar la buena voluntad de los dioses de vuelta al mundo humano y anunciar los juicios divinos. Más tarde, se pensó que los demonios maliciosos se diferenciaban de los ángeles porque eran capaces de distorsionar mensajes e información, en lugar de transmitirlos. Los demonios que aparecen en la teoría de la información y la comunicación también transmiten mensajes, y presumiblemente tienen el poder de escuchar las redes de comunicación e interceptar comunicaciones. A los demonios les encanta el ruido y los estados de intoxicación. Los brownianos, con sus movimientos aleatorios e impredecibles «de borracho», personifican las cualidades esenciales del ruido.

Los entornos caóticos con contrastes extremos son una bendición para los

demonios. En la era digital, se encuentran en la frontera entre el cero y el uno, donde pueden ser responsables de convertir uno en el otro. En la radiación de cuerpo negro, operan en la escala de la cantidad mínima de energía necesaria para superar la radiación de los sistemas en equilibrio. Los demonios suelen tacharse de seres que interfieren o distorsionan los recuerdos. En informática, el hándicap que impide a los ordenadores calcularlo todo reside en el tamaño de su memoria y su capacidad para acceder a ella, borrarla, reescribirla y aprender de ella.

A principios del siglo XX, los demonios de la biología se asociaban mucho a una fuerza vital capaz de dar vida a lo inerte. Los demonios suelen interferir en los procesos regulares de la reproducción, influyendo en nuestra comprensión de la fidelidad, entendida como concepto físico y como concepto moral. En la biología moderna, los demonios aparecen en pleno proceso de copia y reproducción, actuando directamente sobre el ADN replicante. Los demonios de la biología, como el de Monod y el de Maxwell-Szilárd-Brillouin, se parecen a los que históricamente se creía que podían reanimar cadáveres.

Las víctimas favoritas de los demonios suelen ser jóvenes doncellas y niños. El demonio de Darwin es un experto depredador y continúa con esa tradición, alimentándose de los débiles y cebándose con los jóvenes. Otros, como los demonios de Loschmidt y Zermelo, pueden operar en un mundo que avanza al revés: el universo invertido les es propicio, y pueden trabajar tanto hacia atrás como hacia delante, en orden inverso y en orden regular. El demonio de Searle encarna otra característica común de los demonios: su limitada agencia y la dificultad para determinar quién actúa, quién piensa y quién tiene la culpa. Esa capacidad está relacionada con su predilección por intervenir en los casos en que es más difícil separar lo natural de lo artificial y la naturaleza de la crianza. El demonio de Darwin también destacaba en esta aptitud.

Los demonios aparecen como manipuladores de partículas atómicas y subatómicas, mensajeros más rápidos que la luz, expertos en retroalimentación, reactores en cadena, detonadores eficientes, oportunistas reproductivos, asistentes de señales, selectores de genes, gestores de datos, seguidores de códigos y malabaristas de la información asombrosamente hábiles («ciertos ARN son meros demonios Maxwell»). Estos cambiapielos maestros del disfraz mudan la vieja piel con la misma facilidad con la que se atavían con la nueva. Saben esconderse. Se hacen pasar por otros. Se adaptan. Cuando se elimina uno, aparece otro. A estos expertos manipuladores del tiempo se les da especialmente

bien actuar casi sin esfuerzo, en momentos clave, urdiendo o cambiando nuestro destino solo con pulsar un interruptor o tirar de una palanca. Pero otros tienen una extraña habilidad para colocarse en lugares estratégicos donde pequeñas acciones pueden acarrear consecuencias incalculables.

Encarnan los opuestos y son paradójicos: estúpidos pero inteligentes, mecánicos pero vivos. Los nuevos combinan facultades de la mayoría de sus progenitores más hábiles. Pueden sembrar el caos en las leyes básicas de la causalidad. Los demonios son capaces de cambiar el objeto, los límites y las reglas del juego y dejar perplejas incluso a las mentes más inteligentes. Pueden actuar predeciblemente hasta que un buen día desaparecen todos los vínculos causales y lo que tomábamos por causalidad se convierte en correlación. Justo cuando creemos que nuestros cálculos están preparados, añaden otra variable. O hacen justo lo contrario, tumbando toda nuestra experiencia anterior. Nuestra memoria se borra y, con ella, desaparece nuestra capacidad de comprender, determinar o predecir el futuro. Cuando esperamos tener otra oportunidad, intervienen de repente y limitan el número de intentos que creíamos tener. Cuando pensamos que los resultados son independientes unos de otros —como cuando lanzamos una moneda al aire una y otra vez esperando que caiga cara o cruz—, en un momento dado descubrimos que los resultados estaban relacionados en sentidos que no habíamos imaginado. La ley de los grandes números de repente no se aplica, y requerimos inventar otras matemáticas. Cuando por fin hemos dado con la respuesta correcta, resulta que la única opción adecuada era «ninguna de las anteriores». De golpe y porrazo, aparecen resultados que son mayores que la suma de las partes. La relación entre ganadores y perdedores se invierte gracias a estos maestros en el arte de subvertir jerarquías.

Su personalidad es un tanto traviesa, aunque no del todo malévola. Al perseguir los demonios de la ciencia que han motivado nuevas investigaciones a través de la historia podemos ver el gran arco de la ciencia y tecnología alzarse frente a nosotros creando maravillas inesperadas al cruzar continentes, desde el Siglo de Oro neerlandés hasta el Silicon Valley de hoy.

I

EL GENIO MALIGNO DE DESCARTES

En 1641 el filósofo francés René Descartes pensó en la posible existencia de un ser maravilloso, llamado *malignum genium* en latín, sobre el que se han escrito libros enteros. En pocos años, ese personaje paso a la historia como el «demonio de Descartes» que hasta la fecha se usa para advertirnos de que la realidad que construimos usando con nuestra vista, audición, gusto, olfato, y tacto puede ser falsa.

¿Cuáles son sus poderes? El demonio de Descartes puede interceptar toda la información que llega a nuestro cerebro pirateando la fuente de nuestras impresiones sensoriales. Después de eliminar el mundo que percibimos a través de los sentidos, puede interponer otros estímulos sensoriales y ofrecernos una realidad alternativa. Trabaja como si fuera un avezado secuestrador, aunque en vez de atraparnos echándonos una manta sobre la cabeza para prevenir que obtengamos información sobre nuestro entorno, nos separa de la realidad al cubrirnos con otra. En cualquier momento bajo su voluntad, el cielo, el campo, o el mar pueden convertirse en una simulación. Las artimañas de tal demonio llegan a ser tan perfectas que las víctimas no se dan cuenta del embuste, y consideran lo que perciben como si fuera la verdad arrolladora. Descartes avivó el temor de que podríamos vivir todos en una inmensa producción cortesía de nuestros falsos sentidos y que los elementos de nuestro universo podrían ser el espectáculo más maravilloso que jamás haya existido, uno prácticamente indistinguible del no espectáculo.

La creación de Descartes nos llevó a desconfiar de las verdades provenientes del mundo sensorial que nos rodea. Nos impuso la responsabilidad de convertir la razón en nuestra guía espiritual y avivó el deseo de desarrollar y llegar a la razón pura. Para combatirlo, hemos desarrollado herramientas y técnicas para comprender mejor la imperfección de nuestros sentidos. Lo combatimos al basarnos en verdades que tal demonio no puede alterar, como las que podemos verificar con la lógica y matemáticas. También nos instó a poner en duda

algunos de los supuestos más comunes, y nos recordó lo importante de cuestionarlo todo siempre y en todas partes, incluidas las autoridades sociales, religiosas y políticas. Gracias a él, el escepticismo y la duda siguen siendo las herramientas más potentes del descubrimiento científico.

Sin embargo, los poderes del demonio de Descartes también nos han seducido. Nos gustaría actuar como él para engañar a los demás y a nosotros mismos. Lo estudiamos para encontrar formas cada vez más perfectas de imitar la realidad y soñamos con encontrar un espectáculo tan perfecto que suplante y supere nuestra cotidianidad. Es el demonio de la razón.

Por eso, es el personaje preferido de los profesionales del mundo del espectáculo, cineastas, publicistas, asesores políticos, gerentes en relaciones públicas, y demás expertos en las áreas de entretenimiento y comunicación. En la actualidad, es más temido por su capacidad para difundir noticias falsas y generar ultrafalsos. Vive en las redes sociales, donde es lanzado por algoritmos que están programados para reproducir sus hazañas, y donde nuevos programas basados en la inteligencia artificial incrementan sus poderes, influenciando nuestra percepción actual del mundo. Tras su primera invocación, el inteligente ilusionista de Descartes se erigió como símbolo del embaucador definitivo: un contrabandista entre la ficción y la no ficción, así como un mago ideal capaz de actuar sin humo ni espejos. En tanto que maestro del trampantojo, encarna las promesas y los peligros de la realidad virtual. Gracias a él, cada vez somos más conscientes de que solo podemos conocer el mundo a través de un cristal oscuro. Nos ofrece las promesas de la realidad virtual pura, una que no depende ni de auriculares ni pantallas. Más que darnos pesadillas, este profesional nos atormenta durante el día, ya que opera tanto en la luz como en la oscuridad. Es una amenaza y una inspiración para científicos y artistas. ¿Cómo podemos resistirnos ante la hipnotizadora belleza del firmamento estrellado y desentrañar los secretos reales del universo?

«Siempre sentí un deseo inmenso de aprender a distinguir lo verdadero de lo falso». Corría el año 1637 y la misión no era precisamente pan comido. Las prácticas populares para juzgar la realidad y distinguir la verdad de la superstición parecían peligrosamente desacertadas, incoherentes y engañosas. ¿Podrían sustituirse por un método mejor, tal vez uno totalmente infalible y racional? Descartes removió cielo y tierra para encontrar la manera de liberarnos de un mundo de ilusiones desesperantes, descubrir un método para distinguir la realidad de la ficción y separar la cordura de la locura. Para ello, articuló las

mejores técnicas que pudo concebir y dio a sus lectores instrucciones detalladas para defenderse del demonio que llevaría su nombre. Por desarrollar este nuevo método fue coronado como el fundador de la filosofía moderna y padre del racionalismo. La era cartesiana resultó ser apasionante y maravillosamente creativa: el cerebro se impuso al músculo. Se suele asociar el comienzo de la Edad de la Razón con su obra, considerada por muchos como el pistoletazo de salida de las ciencias naturales y la inspiración de las filosofías materialistas y seculares que caracterizaron los siglos siguientes.

La solución de Descartes fue anteponer las verdades más indubitables que pudo encontrar en un mundo que, por lo general, es bastante confuso y engañoso. Se enfocó en descubrir el punto débil de tal demonio: era incapaz de adulterar ciertos hechos elementales, empezando por la ineludible realidad de que, si uno piensa, es que existe. «Pienso, luego existo», subrayó el filósofo, escribiendo la frase original latina *Cogito ergo sum*, tan conocida hoy.

«Dos y tres suman cinco», escribió entusiasmado en su primera meditación, y añadió: «Un cuadrado no tiene más de cuatro lados». A partir de ejemplos tan obvios y sencillos como esos, construyó un método para determinar otras verdades más complejas, pero igual de transparentes e ineluctables. Así creó una base sólida para comprender el mundo de un modo completamente racional. El demonio de Descartes fue clave para aposentar la identidad independiente del cerebro y elevarlo como el órgano esencial del pensamiento.

A medida que la atención se desplazó hacia la capacidad del cerebro, nuestro cuerpo se devaluó como máquina a su servicio. En sus *Principios de la filosofía* (1644), Descartes dejó una frase para la posteridad, señalando que no veía «ninguna diferencia entre las máquinas que construyen los artesanos y los cuerpos que la naturaleza por sí misma ha formado». En el dogma cartesiano, a veces denominado «teatro cartesiano», el universo se dividía entre mente y materia. Esta conceptualización dualista, junto con el demonio que la gestó, surgió a raíz de la aparición de los medios de comunicación modernos, empezando por la imprenta, el teatro y la dramaturgia.

FÁBULAS, CUENTOS DE CABALLERÍA

Y UN MALIGNUM GENIUM

Las autoridades eclesiásticas se enfurecieron tras la publicación del Discurso del método, hoy considerado como un tomo que abrió el camino del pensamiento racional moderno, por haber tratado el complicado tema de criaturas con poderes sobrenaturales. La feroz persecución a brujas y nigromantes había marcado los años posteriores y Descartes sufriría de estos acechos inquisidores. Dos teólogos protestantes, Jacobus Revius y Jacobus Triglandius, se opusieron a lo que el filósofo escribió en el último párrafo de su primera meditación. En el texto original en latín, Descartes describía un *malignum genium* (literalmente, un genio maligno). La mera mención de ese sospechoso personaje podía considerarse una herejía. ¿Este ser podría rivalizar con los poderes de Dios? Y, ¿qué derecho tenía Descartes a discutir temas que tradicionalmente eran feudo de los teólogos?

Los enemigos de Descartes en Leiden no tardaron en acusarle públicamente de herejía y blasfemia, poniendo en peligro su reputación y su vida. Corría el riesgo de ser encarcelado, expulsado de los Países Bajos a Dios sabe dónde, o ejecutado. ¿Acaso sus palabras querían decir que Dios era un embaucador maligno?

El filósofo aclaró sus intenciones en una carta apologética enviada a la facultad de teología de la universidad. Sus oponentes habían argumentado que el «genio maligno» podía interpretarse como algo todopoderoso y, por lo tanto, como equivalente a Dios. Esa equiparación sería herética. En su defensa, Descartes lo negó. Lo que describía en la primera meditación era algo más parecido a un demonio. Descartes dio la vuelta a la tortilla y acusó a los dos teólogos de calumnia.

En el polémico párrafo, Descartes concebía un archiembraucador que podía alterar nuestro sentido de la realidad: «Supondré, pues, que no es Dios, fuente de verdad y bondad suprema, sino algún genio maligno [*genium aliquem malignum*] de inmenso poder y engaño [*summe potens & callidus*], quien ha puesto todo su empeño en engañarme». ¿Se refería Descartes a un demonio? El término *genium* estaba relacionado con el vocablo árabe *yinn*, que se usaba para describir criaturas demoníacas. A ambos se les solía atribuir inteligencia y la ambición de ser más astuto que cualquier adversario.

El archiembraucador descrito por Descartes era capaz de modificar nuestro

sentido del mundo exterior suplantándolo por otra realidad: «Consideraré que el cielo, la tierra, los colores, las figuras, el sonido y todo lo externo no son más que ilusiones y sueños de los que este genio se ha servido para tender trampas a mi credulidad». Podía apoderarse de todas nuestras sensaciones, incluso a la hora de mirar el propio cuerpo, alterando la percepción de nuestra propia carne: «Consideraré que no tengo manos, ni ojos, ni carne, ni sangre, ni sentidos y, sin embargo, creeré por error que poseo todas esas cosas».

El terrorífico ataque de ese malvado genio no era infalible. En las *Meditaciones metafísicas*, Descartes nos enseña cómo podemos escapar de su «cautiverio» y despertar de ese mal «sueño». La defensa consiste en emprender un trabajo duro y laborioso, pero necesario. Descartes invita a los pensadores, de los cuales había cada vez un número mayor, a cuestionar el papel de las sensaciones frente al raciocinio a la hora de interpretar la realidad. Numerosos filósofos y científicos utilizaron su ejemplo para indagar en la relación entre cuerpo y alma, y más tarde entre cerebro y mente a fin de explorar la posibilidad de la realidad virtual.

OMNIA DAEMONIA

La enjundia de las acusaciones en contra de Descartes estribaba en el uso que el hacía del término latino *summe potens*, que significa todopoderoso. En su respuesta a los responsables de la Universidad de Leiden, el filósofo argumentó que su frase no atribuía a ese embaucador un poder igual al de Dios. Lo que Descartes tenía en mente era muy distinto. En realidad, era algo más parecido a «todos los demonios, todos los ídolos o todos los poderes paganos [*omnia daemonia, omnia idola, omnia Gentilium numina*]», que tenían habilidades más modestas. Descartes explicó de forma convincente que la criatura descrita era una especie de demonio pagano con poderes limitados, como los anteriores a la era cristiana. No había herejía ni blasfemia en esa afirmación: «Pero me limitaré a decir que, puesto que el contexto exigía la suposición de un embaucador extremadamente poderoso, distinguí al Dios bueno del genio maligno, y mostré que, si per impossibile existiera dicho embaucador, no sería el Dios bueno, [...] y solo podría ser considerado como un genio malicioso».

La figura del diablo como malhechor insuperable, *maleficus maximus*, Príncipe de las Tinieblas, capo maquiavélico de un ejército de secuaces y sirvientes, y villano máximo del universo, surgió como reacción al panteísmo de las tradiciones griegas, paganas y folclóricas, basado en una panoplia de diversas criaturas, algunas de las cuales no tenían nada de malvado. Los demonios paganos y populares y demás seres exóticos no eran como los demonios cristianos; muchas veces eran bastante benévolos. En los cuentos de hadas y los mitos, adoptaban papeles maleables en los que solían transitar entre lo escabroso y lo piadoso, lo inmoral y lo justo, lo imaginario y lo concreto. Operaban a medio camino entre el cielo y la tierra e inspiraban tanto la risa como el miedo.

Al afirmar que ese ser que mencionó en su controversial texto no era en absoluto semejante a Dios, sus acusadores, y no él, podían ser declarados culpables de herejía por la única razón de haber otorgado a ese ejemplo un estatus tan elevado en su interpretación errónea: «Siguiendo esa línea de argumentación, deben sostener que todos los demonios, ídolos o poderes paganos son el verdadero Dios o los verdaderos dioses, porque la descripción de cualquiera de ellos contendrá algún atributo que en realidad solo pertenece al Creador».

La habitual asociación de los demonios con el diablo, entendido como rival de Dios, era una práctica claramente cristiana, un episodio bastante limitado y breve dentro de una historia mucho más extensa. Hasta el final del periodo neotestamentario, en torno al siglo I a. C., los demonios no se consideraron sistemáticamente ángeles caídos rebelados contra Dios. Menos poderosos que el diablo y mucho menos aún que Dios, se les solía considerar malhechores consagrados a imitar pobremente a su amo, serviles esbirros encargados de hacerle el trabajo sucio tentando a sus potenciales víctimas. El filósofo tuvo que hacer estas aclaraciones para evitar mayores confusiones y protegerse de las acusaciones de calumnia y herejía. A raíz de ellas, el ejemplo de Descartes se volvió ampliamente conocido y se acabó traduciendo como «demonio».

LA SOLUCIÓN DE DESCARTES

En su segunda meditación, Descartes continuaba hablando del «embaucador de supremo poder y astucia que me engaña deliberada y constantemente». Según él,

ese embaucador fracasaría en una cosa. Nunca podría impedir a sus víctimas conocer una verdad esencial de su ser: cogito ergo sum, o «pienso, luego existo». Desde entonces, esta frase se ha utilizado en incontables ocasiones para validar el poder de nuestra mente y sigue siendo fundamental para nuestra comprensión de la subjetividad humana:

Pero hay un embaucador de supremo poder y astucia que me engaña deliberada y constantemente. Y, si él me está engañando, no cabe duda de que yo también existo; y, por más que me engañe, nunca conseguirá que yo no exista mientras yo crea que creo que soy. Así pues, tras considerarlo todo muy detenidamente, debo concluir en última instancia que la proposición «yo soy, yo existo» es necesariamente verdadera siempre que la expongo o la concibo en mi mente.

Nuestra capacidad para pensar de forma crítica, de dudar y cuestionar la realidad que tenemos ante nosotros, podría burlar las artimañas de un demonio. La verdad de la existencia de Dios y varias verdades más acompañaban a la verdad de nuestra existencia: «[Por ejemplo,] la idea del triángulo implica la equivalencia de sus tres ángulos a dos ángulos rectos, y la idea de una esfera implica la equidistancia desde el centro de todos los puntos de la superficie». El embaucador manipulador de Descartes no podía alterar ninguna de esas verdades.

Descartes concibió el mundo como una especie de teatro al que asistían los espectadores humanos. Cuando se comprometió a vivir una vida pública, entendió su misión como subirse al escenario y volverse actor del theatrum mundi ofreciéndole a su público una nueva concepción filosófica del universo como algo parecido a una gran producción teatral. «Hasta ahora he sido un espectador en este teatro que es el mundo, pero ahora estoy a punto de subir al escenario». A los cuarenta años, Descartes ya investigaba sistemáticamente la posibilidad de que el mundo que nos rodea fuera una ilusión; todo él, incluyendo lo cotidiano y lo mundano. Este hilo de pensamiento le condujo a otro: se preguntó cómo sería el mundo para nosotros si nos desprendiéramos por completo de nuestros cuerpos y sentidos: «Consideraré que no tengo manos, ni ojos, ni carne, ni sangre, ni sentidos». ¿Qué se sentiría al ser no solo sordo y ciego, sino no poder degustar, oler o tocar?

LOS MOLINOS DE DON QUIJOTE

Y OTROS DEMONIOS

Relacionada con esa concepción del mundo como un teatro con espectadores humanos aparece el Quijote. Los expertos están casi seguros de que Descartes leyó la obra de Miguel de Cervantes y es probable que esa novela contribuyera a alimentar su obsesión por elaborar y sistematizar las leyes de la razón. En concreto, le preocupaban las historias de valerosos caballeros. Descartes advirtió de los peligros de leer novelas como las que fascinaban a cada vez más lectores: «Quienes perfilan su conducta a partir de ejemplos extraídos de esas obras, corren el peligro de caer en los excesos de los hidalgos andantes de nuestros cuentos de caballería, y a concebir planes que exceden sus facultades». Para él, las fábulas eran igual de peligrosas, pues también podían deformar el sentido de la realidad de los crédulos lectores: «Nos llevan a identificar muchos acontecimientos como posibles cuando no lo son». A Descartes le asombraba la facilidad con la que un mundo irreal podía suplantar el sentido de la realidad de cualquiera.

Miguel de Cervantes fue el responsable de estas y otras faltas, conduciendo a sus lectores a vivir una aventura doblemente perversa. Al escribir un superventas que los lectores devoraban, se enganchaban con una obra de ficción sobre un hombre dañado permanentemente por leer ese mismo tipo de obras. Si Don Quijote perdió el juicio leyendo demasiadas historias de caballería, otros lectores podían acabar igual.

En la novela, el vejete emprendía un periplo por las llanuras de La Mancha con el arrojo de un joven y apuesto caballero. Al montar el penco Rocinante, creía cabalgar un hermoso semental. Al coquetear con la rústica Aldonza, estaba seguro de estar conquistando a la dulce princesa Dulcinea. Al arremeter sin cuartel contra los molinos de viento, luchaba contra gigantes. Cuando unos caballeros bienintencionados lo rescataron, estaba convencido de que estaba siendo secuestrado por demonios. Y, entretanto, él y su fiel escudero Sancho Panza discutían sin parar sobre asnos y caballos, doncellas y damas, molinos y gigantes, caballeros y demonios.

«Son demonios que han tomado cuerpos fantásticos», exclama el Quijote, enjaulado y confuso, tras llevarse el enésimo disgusto de sus aventuras. El valeroso caballero fue sacado de las vastas planicies de La Mancha por un grupo de caballeros que veían un hombre trastornado, quizás un poco peligroso. ¿Y quiénes son esos hombres —o, desde el punto de vista del enjuto y desgarrado amo y señor, esos demonios— que ahora parecen controlar sus destinos? La delicada mente de Alonso Quijano le dice que sus captores son «todos unos demonios». Pero su análisis general de la terrible situación en la que se encuentra está llena de contradicciones. ¿Por qué está viajando junto a sus captores despacio en un carro desvencijado, incómodo y tirado por bueyes? En los relatos sobre secuestros que él conocía, los demonios tienden a usar medios de transporte más elegantes. Quijote expresa su sorpresa a Sancho. ¿Por qué no se los llevan «por los aires, con extraña ligereza, encerrados en alguna parda y oscura nube, o en algún carro de fuego, o ya sobre algún hipogrifo u otra bestia semejante»?

El entrañable Quijote ve a sus captores como demonios, pero su fiel escudero no. Para el fiel sirviente, los hombres que se los llevan son simples mortales, hombres fornidos de carne y hueso. Don Quijote piensa distinto. ¿Quién tiene la razón? ¿Cómo podría resolverse la discrepancia entre la percepción de ambos personajes?

La propensión a ver demonios es una prueba de fuego, una especie de barómetro, con la que los lectores pueden calibrar la aptitud mental de los dos viajeros. Sancho es una especie de protocientífico que deja de lado las supersticiones de forma pragmática; un plebeyo cuya simplicidad congénita le lleva a estar más en contacto con la realidad que su noble señor. El Sancho de la novela es un personaje inverso de un Torquemada creyente y fanático que encuentra pruebas de lo angelical y lo demoníaco por doquier, en cada acontecimiento impredecible, y que se siente legitimado para glorificar o perseguir violentamente hasta la más mínima insinuación a los que no ven el mundo como él. El Quijote, al contrario, no se enfrenta al mundo por medio de sus sentidos, sino únicamente de forma indirecta, ensartando su lanza (y otras protuberancias) donde no debe.

Los lectores ven cómo las perspectivas de Sancho y su amo y chocan y se entrelazan. La intriga de la novela reside en cuál de las distintas percepciones dominará, y si habrá manera de limitar los excesos de la inquisición, de la religión, y de la locura. Cervantes pone a prueba el método experimental. ¿Tal

vez se podría diseñar un experimento para llevar a los personajes de la novela a creer en una verdad absoluta?

Quijote insta a Sancho a corroborar su tesis—que sus captores son demonios— con un experimento:

Y si quieres ver esta verdad, tócalos y pálpalos, y verás como no tienen cuerpo sino de aire y como no consiste más de en la apariencia.

El experimento falla. Sancho responde a su amo que ya los ha tocado y olido y que no son demonios, sino hombres fornidos que huelen a dulce ámbar. Quijote insiste en que, si fueran demonios, olerían a azufre, y si estos seres en particular no desprenden ese olor es solo por alguna astuta treta. Tal vez se hayan perfumado para camuflarse. Aunque la hipótesis del Quijote se pone a prueba tocando a los captores, la evidencia que obtienen no cambia las creencias de ninguno de los dos hombres.

El relato cervantino es muy diferente al relato bíblico del Evangelio de san Juan, en el que el apóstol Tomás toca la herida de Cristo. Tal prueba funciona, disipando las dudas de Tomás sobre la resurrección. Para el Quijote, ningún estímulo le sirve de prueba contra su hipótesis. Ningún argumento lo lleva a cambiar de opinión. El hidalgo tampoco se deja convencer por la versión dada por su escudero. El experimento confirma lo que Sancho ya sabe y lo que el caballero ya cree. No hay resolución epistémica. Cervantes no le da ni a sus personajes ni a sus lectores la posibilidad de liberarse de sus ilusiones. La historia termina como una tragedia cómica que lleva a los lectores a cuestionar su propio sentido de la realidad. Al ofrecernos una historia dentro de otra historia, nos lleva a considerar la posibilidad de que todos somos víctimas de nuestras fantasías, como si estuviéramos atrapados en una infinita sala de espejos sin salida. A través del diálogo de sordos y el experimento inconcluso entre un personaje que ve demonios y otro que no, Cervantes nos invita a reírnos con diabólico regocijo en cada página, al tiempo que cuestionamos nuestra racionalidad e incluso nuestra propia existencia. ¿Es posible que seamos personajes de una novela de humor escrita por alguien más? ¿Tiene razón Descartes al desconfiar del mundo teatral?

SHAKESPEARE Y EL MUNDO COMO TEATRO

Estas mismas cuestiones fascinaban a Shakespeare. Hoy no pensamos que estas novelas u obras de teatro contengan lecciones sobre la ciencia, sino que gran parte de su importancia reside en las lecciones que dan a sus lectores sobre la relación entre el arte y la verdad. El Hamlet de Shakespeare es un joven desconcertado por la visión de un fantasma parecido a su difunto padre que no consigue apartar de su mente. Como el Quijote, él también es un personaje que lee demasiado. Su hábito de lector ávido ha puesto en peligro su salud mental, llevándolo a ver muchas otras cosas extrañas (aparte del fantasma de su padre) y de sobreinterpretar el mundo que le rodea. El joven lee hasta las nubes del cielo, y le pregunta a su amigo Polonio: «¿Ves esa nube en forma de camello?». Su amigo asiente cortésmente: «Parece un camello». Hamlet cambia rápidamente de opinión. «Ahora me parece una comadreja», y Polonio asiente de nuevo: «No hay duda, tiene figura de comadreja». «¿O como una ballena?». «Muy parecido a una ballena», responde su complaciente interlocutor. Las corroboraciones de su amigo sicofante solo lo confunden más. El pensamiento grupal exacerba la confusión de Hamlet, que no tiene a nadie que le ayude a distinguir la realidad, desde las nubes a los fantasmas. ¿Cómo puede refrenar su imaginación y recobrar la claridad?

Torturado por no saber si debe confiar en la aparición que se le presenta y que implica al rey en el asesinato de su padre, el huérfano idea una forma imaginativa de probar su veracidad. Encarga una representación teatral para el disfrute de la corte, El asesinato de Gonzago, una obra de teatro que gira alrededor de un asesinato. «La obra de teatro es el cebo con el que atraparé la conciencia del rey». Mediante el uso de la ficción, Hamlet espera poder llegar a la verdad real sobre el fantasma y, por deducción, aprender más detalles sobre la muerte de su padre. Para Shakespeare, la obra dentro de la obra sirve como un experimento que transforma el teatro de la corte en una especie de laboratorio, aunque de índole humanista. Lo usa para poner a prueba la verdadera naturaleza del fantasma y atrapar una conciencia culpable. El resultado de la noche de teatro es claro. El rey se aterroriza durante la representación teatral, que lleva a Hamlet a la conclusión: «Es un fantasma honesto, si me permitís decirlo».

En la época isabelina, Shakespeare y otros dramaturgos perfeccionaron su escritura para engañarnos y hacernos creer que sus creaciones teatrales eran reales. ¿Qué tan lejos podrían llegar? ¿Podrían acaso llegar a tener los poderes del demonio que tanto aterrorizó a Descartes? Dramaturgos y escritores como Cervantes y Shakespeare invocan personajes y criaturas para explorar la porosa frontera entre lo real y lo irreal, lo razonable y lo irrazonable, lo creíble y lo increíble, así como para azuzar nuestra imaginación. El público fascinado por seguir las aventuras de personajes ficticios tenía buenas razones para dudar del testimonio de los sentidos, empezando por el propio. Los nuevos teatros, como el Globe de Londres, se convirtieron en hogares provisionales para incontables criaturas fantásticas que se pavoneaban en los escenarios con desparpajo. Puertecillas escondidas, trampillas, decorados móviles y demás innovaciones escénicas, ayudaron a que los demonios, fantasmas, brujas y otras criaturas fantásticas resultaran cada vez más creíbles. Por primera vez se diseñaron autómatas de articulaciones engrasadas que escupían fuego real, salían a la palestra siguiendo una serie de estruendosos temblores y se esfumaban tras un humo denso y acre.

Las obras puestas en escena abordaron en fondo y forma algunas de las cuestiones que luego ocuparían a filósofos y científicos: ¿debemos fiarnos de nuestros sentidos? ¿Qué debemos hacer cuando nos enfrentamos a algo que parece real, pero que es tan inusual que parece increíble? ¿Cuál es la diferencia entre realidad y simulación, entre vida y teatro? ¿Puede el segundo ser tan perfecto que iguale a la primera? Enrevesadas tramas giran en torno a la relación entre la vida real, la imaginación y la simulación y nos ayudan a averiguar en quién y en qué debemos confiar. En una célebre reflexión, Macbeth dice: «La vida no es más que una sombra pasajera, un pobre actor que se pavonea y consume las horas en el escenario». En la magistral *La tempestad*, que Shakespeare escribió pocos años después de *Macbeth*, los espectadores veían a los demonios descender y sorprender a los viajeros durante una violenta tormenta marítima. «El infierno se ha vaciado y todos los diablos están aquí», exclama el hijo del rey después de que su barco sea alcanzado por un rayo. Con esta frase, Shakespeare allana el camino para otra escalofriante descripción del pandemónium. La preocupación por explorar los límites de la fiabilidad de nuestros sentidos y la razonabilidad de nuestra mente influyó tanto en las artes como en la filosofía y la ciencia. El teatro funcionaba como una placa de Petri para explorar estos temas.

A medida que dramaturgos y escritores fueron poblando sus textos de ficción

con criaturas imaginarias, su trabajo se diferenci6 del de los demon6logos. Los demon6logos se centraban en comprender a los demonios reales y sus acciones. Por ejemplo, *La Daemonologie* (1597) del rey Jacobo I de Inglaterra, que patrocin6 al mismo Shakespeare, contenía descripciones de criaturas ladinas a las que temer. Los dramaturgos y novelistas, en cambio, investigaban las intrincadas formas en que la gente juzga la verdad y la falsedad en un abanico más amplio de casos y contextos. Su oficio consistía en manipular la imaginaci6n de los espectadores para que suspendieran su incredulidad.

EL MUNDO COMO TEATRO

A medida que la ciencia se erigi6 como el m6todo preferido para distinguir entre lo verdadero y lo falso, se fueron refutando más y más apariciones demoníacas y el conocimiento sobre los usos y costumbres de los demonios empez6 a alejarse de la teología. Con el tiempo, las narrativas sobre los demonios se secularizaron, aunque con dificultad y solo parcialmente. A principios de la Edad Moderna, la gente que creía en ellos empez6 a ser tachada de atrasada e id6latra. Mientras tanto, muchos demonios certificados por la Iglesia cristiana heredaron algunos rasgos y habilidades de sus antepasados griegos, romanos, árabes y demás. En la ciencia, seguían remitiendo, en ciertos aspectos, a su antiguo linaje.

Los escritos cartesianos inspiraron muchas especulaciones sobre lo que podría pensar, sentir y percibir un cerebro disociado del cuerpo humano. La distopía conocida como el experimento del «cerebro en una cubeta», muy utilizado por neurofisi6logos y filósofos para ilustrar cómo pensamos, presenta un 6rgano pensante al que se puede engatusar para que crea en una realidad inexistente. ¿Qué ocurriría en un cerebro separado del cuerpo y los sentidos al que se le presenta una realidad alternativa? ¿Tenemos motivos para temer a un científico loco que pueda cultivar ese 6rgano en una sopera? Muchos filósofos de hoy explican el poder del genio maligno de Descartes planteando esas preguntas.

Las nuevas reflexiones sobre cerebros desconectados o quimeras mecánicas arrojaron luz sobre una serie de cuestiones más mundanas: ¿era perjudicial leer cuentos como los de los caballeros andantes medievales? ¿Cómo afectaban los productos que consumíamos a nuestra percepci6n de la realidad? ¿Cómo podían

alterar nuestra mente y nuestra percepción de la realidad? ¿Cuáles eran los límites de la manipulación mental o del adoctrinamiento? Son preguntas que siguen inquietándonos. ¿Cuáles son los poderes de la publicidad y la propaganda y cómo afectan a lo que pensamos?

¿Cuáles son los riesgos de engancharnos a las páginas o las pantallas?

El demonio epónimo de Descartes reveló lo difícil que sería trazar una línea clara entre lo real y lo irreal. Debido a los poderosos trucos fantasmagóricos del genio maligno de Descartes, cada vez más gente se convenció de que no había que tomarse las cosas al pie de la letra. La filosofía se obsesionó con intentar dar respuesta a esas preguntas. Cada vez era más urgente comprender las tecnologías diseñadas para asediar nuestra mente y dificultar o imposibilitar la libertad de pensamiento. Si lo que llegaba a nuestros sentidos no eran más que fenómenos que podían estar ocultando por completo el noúmeno subyacente, ¿no podía ser que, al fin y al cabo, la realidad absoluta fuera imposible de aprehender? Durante años, el pensamiento de la Ilustración destacó por el escepticismo por el que abogaba el filósofo como remedio para la superstición y las creencias erróneas. Es un precedente útil para entender por qué una desconfianza extrema hacia algo tan simple como la cosa en sí considerada (usando la frase de Immanuel Kant) se convirtió en un elemento central de la filosofía. Viendo las proezas de prestidigitación y engaño de las que era capaz el demonio de Descartes, esa cautela no tenía, ni tiene, nada de paranoide.

Por suerte, Descartes dotó a su demonio de poderes limitados. Sus mentiras se frenaban justo después de la retina, ya que solo lograba encandilarnos a través de nuestros sentidos; no podía manipular el cerebro directamente. Frente al poder de nuestra mente, sus fuerzas flaqueaban. Sus dotes teatrales eran imponentes, pero sus conocimientos de neurociencia eran inexistentes. Solo siglos después se inventarían demonios capaces de implantarse directamente en nuestro cerebro.

II

LA INTELIGENCIA DE LAPLACE

El demonio de Laplace nació en tiempos revolucionarios. Sus poderes eran formidables, como los del demonio de Descartes. Sin embargo, en esta ocasión, en lugar de amenazar nuestra realidad sensorial, la conocía a la perfección: podía percibir la configuración atómica exacta del estado actual de la naturaleza y podía analizar estos datos matemáticamente. Así podía averiguarlo todo, incluido todo lo que había ocurrido antes y todo lo que ocurriría después. Se creía que esa criatura poseía un registro perfecto de toda la historia de la humanidad, el planeta y el universo. En lugar de saber cómo montar un teatro, podía ver tras bambalinas y obtener un conocimiento absoluto de la realidad. Su existencia estaba muy ligada a la idea de una «fórmula universal» que describía el universo en su totalidad. Tal idea alimentó el sueño de que, combinando grandes volúmenes de datos con sencillas reglas mecánicas, pronto podríamos resolver todos los problemas del mundo. El demonio de Laplace, siendo una especie de demonio matemático, podía calcularlo todo.

El matemático Pierre-Simon Laplace, miembro de la venerable Académie française de París, llamó a este demonio «une intelligence» en francés, pero en la mayoría de las traducciones de su obra suprimieron el pronombre femenino. La criatura descrita por Laplace recibió la denominación especial de «demonio» muy tarde, en los años veinte del siglo pasado.

La importancia de esta criatura para la ciencia es legendaria. Según afirmó uno de los biógrafos de Laplace: «Canónica es la palabra que designa la idea de una inteligencia infinita que recuerda el pasado y predice el estado futuro de todas las cosas a partir del conocimiento de la posición y el movimiento de cada partícula en cada momento». Según otro filósofo, el demonio de Laplace «se ha convertido en el santo patrón del determinismo». En los años setenta, un físico se refirió a las famosas líneas de Laplace «como el evangelio de la visión determinista del mundo». Y un renombrado economista manifestó en esos años que «casi todos los eruditos y filósofos de la primera mitad del siglo XIX

estaban fascinados por los espectaculares éxitos de la ciencia mecánica en el campo de la astronomía, y aceptaban la famosa apoteosis de Laplace de la mecánica como evangelio del conocimiento científico definitivo». Desde que fue conjurado, el demonio de Laplace se adueñó del universo y decretó que este funcionaría previsiblemente con arreglo a leyes fijas, encarnando la «esencia misma de la causalidad». Nos hizo pensar que tal vez el pasado fuera simplemente el prólogo y que tal vez el libre albedrío no existiera. Los poderes de omnisciencia, previsión y predicción de este demonio eran muy codiciados. Pero también suscitaban un miedo: que pudiéramos calcularlo todo, muriendo en el intento y sin salir más sabios de toda esa minería de datos. La mecanización, el determinismo, la inevitabilidad y la sensación de que la humanidad podía estar atrapada a viajar en una senda fija resultaba aterradora. Hoy, podemos contribuir a esta estabilidad o podemos luchar contra ella. Cuando contestamos «buenos días» a otro, cuando cogemos el ordenador para ejecutar algoritmos, cuando anotamos nuestros planes en el calendario para asegurarnos de cumplir con nuestros compromisos y plazos, cuando pagamos religiosamente el seguro o la hipoteca, y siempre que actuamos de forma previsible en público o en la intimidad, estamos ayudando a la causa del demonio de Laplace.

La idea de Laplace dio pie a la fabricación de máquinas de cálculo cada vez más potentes, primero construidas con engranajes y palancas, luego con válvulas de vacío y, finalmente, con semiconductores y microchips. Cuando se llegó a la conclusión de que aun las supercomputadoras por sí solas no eran lo bastante potentes, los científicos construyeron granjas de computación a gran escala y optaron por conectar miles de ordenadores entre sí creando las primeras redes informáticas.

El científico Inglés Charles Babbage, hoy conocido como uno de los inventores principales de los ordenadores, se inspiró en ella para diseñar la máquina de cálculo más poderosa del mundo. Dos de sus ilustres amigos, Ada Lovelace y Charles Darwin, estudiaron estos nuevos mecanismos para entender el universo de una nueva manera. Lovelace se preguntó si algún día podrían construirse instrumentos mecánicos dotados de inteligencia. Darwin se preguntó si la propia evolución y el origen de las especies surgían de un proceso mecánico y no divino.

LA INTELIGENCIA TOTAL

La primera vez que Laplace mencionó al ser sabiondo que llegó a ser bautizado como «demonio» fue en un artículo sobre la teoría del cálculo publicado en 1773. La descripción del susodicho estaba oculta en mitad del texto: «Si imaginamos una inteligencia [une intelligence] que, en un instante dado, abarque todas las relaciones entre los seres de este universo, ella [elle] podría determinar la posición, los movimientos y, en general, las uniones [affectations] de todos esos seres para cualquier tiempo pasado o futuro». En 1814 volvió a aludir a esta «inteligencia» en la introducción de su innovador libro Ensayo filosófico sobre la probabilidad.

En esa obra, la estadística salía de la zona de confort de las matemáticas especializadas y entraba en el universo de las ideas, la política y la cultura. El texto contribuyó a cambiar la forma en que los ciudadanos comunes veían el mundo, incluidos sus ahorros, su matrimonio, su esperanza de vida y sus oportunidades, o la falta de dichas cosas. Estudiando la conducta humana de forma estadística y agregada, Laplace inauguró el campo de la física social. Esta dio lugar a incontables estudios cuantitativos de las sociedades humanas, que más tarde definirían la disciplina de la sociología cuantitativa.

A partir de unas condiciones iniciales, el hipotético ser de Laplace sería capaz de calcular el movimiento de todas las partículas del universo a través del espacio y del tiempo. Solo necesitaba un cerebro inmenso y conocimientos de física básica:

[...] un intelecto que en un momento dado conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza y las posiciones de los seres que la componen; si ese intelecto fuera lo suficientemente vasto como para someter los datos a análisis, podría condensar en una sola fórmula el movimiento de los cuerpos más grandes del universo, y también el del átomo más ligero. Para un intelecto así, nada sería incierto y tanto el futuro como el pasado estaría ante sus ojos.

¿Avanzaría la ciencia hasta el punto de que algún día podríamos saberlo todo? Esa fantasía, o pesadilla, estaba muy ligada a las investigaciones sobre quién era realmente ese demonio. Los autores posteriores a Laplace usaron diferentes

términos para referirse a este adivino definitivo. En alemán, casi siempre se le llamó Geist, traducible como «espíritu» o «fantasma». En otros lugares se le denominó «intelecto», «mente», «profeta» y «superhombre». En el siglo XX se le nombró demonio, pero nunca encajó del todo en esa etiqueta, pues plasmaba un ideal mucho más amplio. Hubo quienes llegaron a referirse a ella como el «Dios de Laplace». Otras veces se la llamaba simplemente «calculadora» o «supercomputadora».

Más o menos una década antes de que estallara la Revolución francesa, Laplace se dedicó cuerpo y alma a demoler los mitos y supersticiones más arraigados de su época, derribándolos uno a uno. Para lograr su cometido, desarrolló una estrategia simple pero brillante. Le asignaba un peso estadístico en base a la frecuencia de su ocurrencia. Al contrario de Descartes, que buscaba verdades sencillas que se podían probar fácilmente al hacer uno o dos cálculos, Laplace encontró que la verdad a veces se perdía entre una multitud de datos gigantescos. Estas verdades solo se podían comprobar al analizar conjuntos de datos numéricos utilizando análisis matemáticos complejos y novedosos. Al contrario de las verdades claras de Descartes, estas eran curiosas, inverosímiles, contrarias al sentido común y a nuestras intuiciones.

El potencial de la teoría de la probabilidad que desarrolló Laplace iba mucho más allá de las matemáticas: atañía a la religión, la superstición y la razón. Su labor promovió una visión secular y mecanicista del universo como algo que funcionaba al margen de la intervención de los seres religiosos, incluido Dios. Gracias a él, la estadística surgió como una poderosa técnica para distinguir entre lo verdadero y lo falso.

Cuando Laplace hablaba de saberlo todo, lo decía literalmente. Así como los astrónomos podían predecir la trayectoria de un planeta en un momento futuro, se podría seguir a cada paso la «molécula de aire o de vapor» más ligera de la Tierra.

¿Quién podría poseer esas capacidades? La idea revolucionaria de Laplace fue pensar que los matemáticos podían poseerlas. Tradicionalmente, se había creído que solo los espíritus superiores podían adquirir esos poderes intelectuales. El filósofo de la Ilustración John Locke lo había dejado claro en su obra *La conducta del entendimiento* de 1706: «Podemos imaginar que los ángeles y espíritus tienen una ventaja vasta y casi infinita sobre nosotros. Teniendo vistas perfectas y exactas de todos los seres finitos que caen bajo su consideración,

pueden, por así decirlo, reunir todas sus relaciones dispersas y casi ilimitadas en un abrir y cerrar de ojos». Para Locke, que había empezado a reflexionar sobre lo que supondría tener una mente así, pensar en esas posibilidades era «una conjetura extravagante». Para Laplace, no era nada estafalario.

UN UNIVERSO SIN DIOS

Desde niño, Laplace, hijo de un síndico de la parroquia local que provenía de una familia de agricultores acomodados, demostró un talento particular por las matemáticas. Napoleón Bonaparte, cuando era joven cadete, fue su alumno en la École militaire. El futuro emperador no olvidó jamás a su talentoso maestro. Cuando Napoleón ascendió al poder tras su victorioso golpe del 18 de brumario (9 de noviembre de 1799), lo nombró ministro del Interior. El emperador lo puso a cargo de casi todas las ramas gubernamentales de Francia, exceptuando las finanzas públicas y la policía. Pero Laplace solo duró seis semanas en su nuevo puesto. Tras poco más de un mes, Napoleón se dio cuenta de que, fuera de la torre de marfil, esa mente privilegiada servía para bien poca cosa. El dictador se lamentó de que Laplace nunca comprendía «nada en su verdadero significado»: «Buscaba sutilezas por todas partes, solo tenía ideas problemáticas y, dicho llanamente, llevaba el espíritu de lo infinitesimal a la administración». Napoleón concedería a Laplace un buen sueldo y le haría conde del imperio, donde el científico le serviría «como ornamento, pero no como instrumento del Estado». Luis XVIII lo elevaría a la dignidad de marqués.

En un libro de cinco grandes tomos, Laplace expuso los principios de la mecánica celeste que describían un universo mecánico donde no había lugar para Dios, ni para ángeles o demonios. Siguiendo el ejemplo de Laplace, el astrónomo francés François Arago arremetió contra Isaac Newton por atribuir a «una mano poderosa» parte del trabajo más importante para mantener el universo en orden: «Newton creía que una mano poderosa debía intervenir de vez en cuando para corregir el desorden» del universo. Pronto corrió un rumor entre las élites científicas según el cual, cuando Napoleón había preguntado a Laplace sobre el lugar de Dios en su universo, el matemático había contestado: «Señor, no necesito esa hipótesis». Inspirado por Laplace y sus colaboradores, el laicismo se extendió y minó el poder de la Iglesia.

Aunque la gran obra de Laplace fue publicada en 1788, un año antes de que estallara la Revolución francesa, el modelo que proponía era muy estable y predecible: «Esta estabilidad en el sistema del mundo, que asegura su duración, es uno de los fenómenos más notables». A pesar de las vicisitudes sociales, políticas y culturales que lo rodeaban y que se propagaron rápidamente por Europa, la obra celestial de Laplace fue un testimonio de la estabilidad general de todas las cosas, incluido el universo. ¿Saldrá el sol mañana? La probabilidad exacta de que no saliera era de 1 entre 1.826.214.

Laplace investigó los presagios y milagros que eran objeto de veneración en su época. Recontó cómo durante 1456 el terror se había adueñado de Europa. La larga cola de un cometa había iluminado el cielo y había sido interpretado como una señal de la iracunda e inminente venganza divina contra la Tierra. Tras la caída de Constantino, el Imperio romano había ido perdiendo terreno peligrosamente frente a los turcos, y la extraña luz en el firmamento había parecido un mal augurio. El carácter portentoso del cometa se había acabado atenuando, pero volvió a aparecer en 1531, y luego una vez más en 1607 y en 1682. Un avispa astrónomo llamado Edmond Halley observó un patrón. Predijo que el cometa volvería a aparecer a finales de 1758 o, a lo sumo, a principios de 1759. Otros expertos revisaron sus estimaciones y la fecha del regreso del cometa se acabó fijando para principios de abril de 1759. Cuando el cometa hizo su acto de aparición en el momento y lugar adecuados, demostró la solidez del método predictivo. Laplace aplaudió el trabajo de Halley por haber encontrado patrones claros en la llegada de un cometa que llevaría su nombre, y por combatir el miedo y las supersticiones que antes habían marcado tal evento.

Laplace también examinó una curación milagrosa que atraía a cientos de peregrinos al lugar donde se había producido. En el año 1656, durante el reinado de Luis XIV, una muchacha conocida como la petite Perrier contrajo una fístula lagrimal en el ojo izquierdo. La enfermedad era tan agresiva que le deformó la nariz y la garganta. Pero, cuando la niña tocó una reliquia de las espinas de la corona de Cristo, se curó al instante. Se corrió la voz del milagro, la gente acudió en masa a la abadía de Port-Royal y, al parecer, comenzaron a producirse muchos más milagros entre los fieles.

A Laplace no le convencía este hecho milagroso y buscó una explicación alternativa. Era probable que los monjes de la abadía de Port-Royal crearan tal mito porque necesitaban defender su doctrina religiosa del ataque de los jesuitas. Si comprendiéramos todas las circunstancias ajenas y las motivaciones humanas,

exponía Laplace, no solo entenderíamos mejor el mundo, sino que incluso podríamos saber por qué otros tenían creencias distintas de las nuestras. Dicho de otro modo, no solo hay dos versiones detrás de cada historia controvertida, hay muchísimas más que deben entrar en nuestros cálculos y juicios.

Además de reexaminar milagros y presagios, Laplace dio consejos a los ludópatas adictos al juego demostrando que casi siempre era más rentable abstenerse de los casinos y salas de apuestas. Luego fue aún más lejos y demostró que muchos aspectos de la vida estaban sesgados como lo estaba la lotería nacional. Los efectos del clima sobre las cosechas, la proporción de nacimientos de hombres comparados con mujeres y la duración de la vida podían explicarse estadísticamente. Las personas que ejercían profesiones de riesgo, como los marineros, tenían menos esperanza de vida que los agricultores. Las muertes en el mar eran trágicas, sin duda, pero también previsibles.

La teoría de la probabilidad se convirtió en un método para identificar a mentirosos y estafadores, por engatusadores que fueran. En lugar de obedecer ciegamente a las autoridades o imitar a la multitud en asuntos de crucial importancia, los métodos matemáticos de Laplace también permitían mitigar la «influencia de la opinión de aquellos que la muchedumbre considera más informados» comprobando si realmente estaban al corriente de las cosas. Su obra es Ilustración en todos los sentidos de la palabra. Invocando nuestras capacidades matemáticas, Laplace explicó por qué éramos superiores a los animales y cómo podíamos controlar el miedo irracional.

Según Laplace, si uno entra en una imprenta y ve sobre una mesa caracteres tipográficos que deletrean la palabra «Constantinopla», cabe suponer que la disposición de esas letras no es mero azar. La gente suele hacer deducciones generales a partir de casos particulares como este. ¿Por qué? Simplemente porque lo contrario sería aceptar lo «extra-ordinario» como tal. Laplace estaba totalmente de acuerdo con ese tipo de inferencias que llevaban a los afectados a sospechar causas escondidas. En el siglo anterior, un reconocido libro de texto sobre lógica ya había explicado por qué esas inferencias estaban justificadas. Por más poco probable que fuera cualquier suceso, «sería insensato apostar veinte sueldos contra diez millones de libras, o contra un reino, a que un niño pudiera disponer al azar las letras de una imprenta para componer a la vez los veinte primeros versos de la Eneida de Virgilio». Lo poco probable podía ocurrir, y el jugador podría perder su apuesta. No había que descartarlo del todo, ya que lo improbable no era equivalente a lo imposible. Laplace llevó estas

investigaciones un paso más allá. Explicó que, a menudo, se extraían conclusiones erróneas de los casos poco probables. Por ser tan raros, los sucesos extraordinarios comúnmente inspiran a los afectados a buscar causas asombrosas. Pero las leyes de la probabilidad demostraban que a veces los sucesos verdaderamente extraordinarios eran solo eso: extra-ordinarios. Se debían a causas tan extrañas que, por lo tanto, no merecían mucha consideración. Por eso, cuanto más increíble parecía algún suceso, más razones había para sospechar que, si se le daban explicaciones sensacionales, lo más seguro era que estas teorías fueran falsas, por muy convincentes que parecieran.

La obra de Laplace fue inmediatamente admirada en el resto de Europa. Para muchos simbolizaba el espíritu científico progresista, pero para sus detractores representaba un peligroso materialismo filosófico que se asociaba con el secularismo, con la Revolución francesa, y con el libertinaje político y moral que conllevaba. Recaía en hombres como Laplace el mostrar a estudiantes y jóvenes cadetes como Napoleón el camino hacia la era de la Ilustración. El reto del filósofo fue de convertir a los jóvenes en ciudadanos modernos, enseñarles a pensar como ingenieros con visión de futuro, y no como feligreses retrógrados. La enseñanza de las ciencias y las matemáticas sería la base de esta nueva forma de raciocinio secular que dejaría atrás la superstición, la religión y la lealtad ciega a la autoridad de la Iglesia y la Corona.

Los revolucionarios atacaron al clero, lo pusieron en la picota y confiscaron sus tierras, pero la ciudadanía tardó muchas décadas en sustituir las explicaciones teológicas por las científicas. Aunque el culto a la razón avanzaba a trompicones, Laplace no se dio por vencido. El francés tenía razones personales, políticas y profesionales para demostrar las leyes de la causalidad. Incluso los actos de «libre albedrío», arguyó, eran forzosamente «causados» por algo anterior.

Pocas décadas después de que Laplace describiera su poderosa «inteligencia», se empezó a hacer realidad la Edad Moderna tal y como la conocemos: la era de los trenes, el telégrafo, la fotografía y la estadística. Se fabricaron nuevas máquinas —calculadoras mecánicas con engranajes y tambores giratorios— con las que se redujo el tiempo necesario para realizar algunos de los cálculos más complicados. A la calculadora de Blaise Pascal, conocida como «Pascaline», le siguió rápidamente la rueda de Leibniz, una máquina de calcular inventada por Gottfried Leibniz. Cada vez eran más los científicos que usaban esas máquinas para calcular más con mayor facilidad. Gracias a esos avances, las especulaciones de Laplace cuajaron.

Algunos colegas jóvenes de Laplace descubrieron técnicas matemáticas aún más potentes. Entre ellos destacó Joseph Fourier, que desarrolló métodos matemáticos utilizando ecuaciones diferenciales para predecir el futuro, o al menos la parte del futuro que tenía que ver con la distribución del calor. A simple vista, un análisis matemático de la distribución del calor podría parecer una contribución menor y meramente técnica. Pero era mucho más que eso. Fourier explicó que la relevancia de su investigación sobre la distribución del calor tenía grandes repercusiones en ámbitos económicos y hasta cosmológicos: «No es difícil ver el interés que revisten estas investigaciones para las ciencias físicas y la economía civil, y cómo pueden influir en el progreso de las artes, que requieren el empleo y la distribución del fuego». Su investigación prometía ahondar en el conocimiento de uno de los elementos más importantes de la economía nacional y mundial, ya que «no hay teoría matemática más relacionada con la economía pública que esta, dado que puede servir para iluminar y perfeccionar el uso de las numerosas artes basadas en el empleo del calor». Gracias a ella, se podrían ver grandes verdades universales a través del tiempo. Cualquiera que deseara «conocer el espectáculo celestial para épocas sucesivas separadas por muchísimos años» podría utilizar sus ecuaciones para compensar las limitaciones de nuestra propia vida, pues un razonamiento matemático de esa clase revelaba «una facultad del entendimiento humano aparentemente destinada a complementar la brevedad de la vida».

LA FORJA DEL DEMONIO DE LAPLACE

El potencial revolucionario de las matemáticas francesas no tardó en hacerse sentir al otro lado del canal de la Mancha. En 1831, la traducción de su *Traité de mécanique céleste* fue aclamada por el público. La idea de Laplace causó furor en Inglaterra. Un brillante científico e ingeniero se propuso fabricar una máquina real que pudiera hacer casi automáticamente en la práctica lo que la mente de Laplace podía hacer en teoría. Como otros británicos de su generación, este genio se sintió seducido y a la vez alarmado por la revolucionaria política francesa y por la nueva matemática surgida de ese contexto.

Hablamos de Charles Babbage, posteriormente reconocido como uno de los inventores de los ordenadores. ¿Cómo podría un ser imaginario como el de

Laplace procesar todas las pistas que nuestro pasado había dejado sobre nuestra Tierra para calcular nuestro futuro? Parecía haber una infinidad... No había ninguna persona suficientemente rica para construir tal máquina. Al darse cuenta que la iniciativa privada no era suficiente, Babbage pidió enseguida financiación al Gobierno. La llamó «máquina diferencial» y la dotó de botones mecánicos, engranajes, manivelas y palancas para procesar números de gran magnitud. El matemático murió antes de terminar su gran «máquina calculadora», pero sus planos inspiraron a muchos para construir aparatos más eficientes, rápidos y potentes.

¿Qué había hecho Babbage? ¿Era acaso su máquina una especie de inteligencia artificial capaz de rivalizar con la inteligencia humana, o incluso de superarla? ¿Cómo se comparaba con un ser pensante? En la primavera de 1835, Babbage presentó su invento a sus colegas reunidos en la asamblea general de la Real Academia de Ciencias de Bruselas: «Yo mismo estoy asombrado de la potencia que he podido dar a esta máquina; hace un año no habría creído posible este resultado».

Unos años más tarde, cuando volvió a describir su máquina, citó directamente a Laplace: «Imaginemos un ser investido de ese conocimiento». Para introducir al lector en sus ideas, incluyó un pasaje de la *Théorie analytique des probabilités* de Laplace en la nota del apéndice C de su *Ninth Bridgewater Treatise* [Noveno tratado de Bridgewater] (1837). El tratado de Babbage explicaba que el «ser» superior descrito por Laplace tenía que ser poderoso, pero no infinitamente. Solo necesitaba dominar un área de la ciencia, las matemáticas: «Si el hombre dominara mejor el análisis matemático, su conocimiento de estos movimientos sería mayor; pero un ser que poseyera un conocimiento ilimitado de esa ciencia podría prever hasta la más mínima consecuencia de ese impulso primario». Según Babbage, ese «ser» sería racialmente superior al inglés, aunque: «Por muy superior que ese ser fuera a nuestra raza, seguiría estando inconmensurablemente por debajo incluso de nuestra concepción de la inteligencia infinita».

Para el optimista Babbage, nada se perdería definitivamente en el universo, ni siquiera lo que se hundiera en el fondo del océano. Las agitadas aguas servirían como depósitos y las olas del océano enviarían mensajes llenos de significado:

Sobre la superficie de un manso océano, es igual de indeleble la ondulación

causada por una suave brisa que el rastro más inmediato de un navío pesado que, con las velas apenas desplegadas, se desliza por su seno. Las olas efímeras que levanta la brisa pasajera parecen alzarse solo para morir en el mismo lugar que las vio nacer. No obstante, dejan tras de sí una progenie interminable que, reviviendo con energía disminuida en otros mares, visitando mil costas, reflejándose en cada una de ellas y tal vez concentrándose de nuevo parcialmente, proseguirán su incesante curso hasta que el océano se aniquile a sí mismo.

La huella de cada canoa, de cada embarcación que ha perturbado la superficie del océano, ya sea impulsada por la fuerza manual o por el poder elemental, permanece para siempre registrada en el movimiento futuro de todas las partículas sucesivas que puedan ocupar su lugar. En efecto, el surco que dejó es rellenado instantáneamente por las aguas que se cierran; pero estas arrastran tras de sí otras porciones más grandes del elemento circundante, y estas, movidas de nuevo, trasladan el movimiento a otras en una sucesión interminable.

Saberlo todo era interesante para la ciencia, pero lo más alucinante de esa eventualidad era el potencial para descubrir secretos ocultos y crímenes del pasado. «El aire mismo es una vasta biblioteca en cuyas obras está escrito para siempre todo lo que el hombre ha dicho o la mujer ha susurrado». Ningún acto podría ocultarse para siempre: «Pero si el aire que respiramos es el historiador infalible de los sentimientos que hemos expresado, la tierra, el aire y el océano son los testigos eternos de los actos que hemos realizado». Babbage nos enseñó cómo fabricar un motor capaz de descifrar números que contenían mensajes potencialmente reveladores sobre nuestro universo.

En una segunda edición de su tratado publicada al año siguiente, Babbage hizo afirmaciones aún más contundentes sobre los poderes de ese ser mecánico. Dijo que podía «prever sin ambages y predecir por completo las circunstancias y la historia de cada partícula de esa atmósfera para cualquier período de tiempo futuro, hasta el más remoto».

Un ejemplo lo convenció de la importancia de seguir sus investigaciones. En mayo de 1837, frente a las costas de África, el capitán R. Wauchope capturó el buque negrero Adalia con cuatrocientos nueve esclavos a bordo. Durante la persecución, fueron arrojados «por la borda más de ciento cincuenta pobres

desgraciados». Babbage leyó ese fascinante relato en el *Western Luminary*. ¿Y si el barco usado para perpetuar tal crimen hubiera eludido la captura? ¿Un científico como él podía idear una forma de llevar a los culpables ante la justicia? Babbage empezó a pensar que la obra de Laplace podía serle útil. El «amo cristiano» de ese barco negrero podía momentáneamente «librarse de la escasa justicia que el hombre civilizado imparte por esos crímenes cuyo lucro ha blanqueado durante largo tiempo su atrocidad». Pero el crimen no escaparía siempre al escrutinio. La conciencia moral de Europa dependía de la posibilidad de desarrollar máquinas con tales potenciales. Con ellas Babbage esperaba demostrar matemáticamente que lo que va, viene.

LOVELACE Y FRANKENSTEIN

La traductora de Laplace al inglés, la matemática Mary Somerville, era nada más y nada menos que la tutora particular de la aristócrata Ada Lovelace, hija de Lord Byron. Hoy, Lovelace es reconocida como una de las primeras pensadoras en apreciar el gran potencial de las computadoras. Somerville le dio a conocer a la joven las obras de Laplace como parte de su educación en matemáticas. También le presentó a Babbage, que estaba consagrado a la fabricación de la computadora. Rememorando sus días como tutora de Lovelace, Somerville escribió: «Íbamos con frecuencia a ver al señor Babbage mientras fabricaba sus máquinas de cálculo». Lovelace valoraba mucho la creación de su nuevo conocido. En una carta para Babbage, expresó su entusiasmo por el proyecto: «Estoy trabajando muy duro para usted; como el diablo, de hecho (quizás hasta lo sea)».

Décadas antes, Lovelace no había podido ir al viaje a Ginebra organizado por su padre, Lord Byron, con sus amigos y amantes que hoy es reconocido por haber germinado la simiente de dos grandes clásicos de la literatura. Durante una noche de lluvia, Lord Byron organizó un concurso de cuentos de fantasmas y, junto al fuego, Mary Godwin (más tarde, Shelley) empezó a escribir *Frankenstein* o el moderno Prometeo y John Polidori, amigo y médico personal de Byron, compuso el primer fragmento de *El vampiro*.

El cuento de Shelley, tanto como los de Goethe, tenían moraleja y versaban

sobre la arrogancia de la investigación descontrolada. Ambos autores anticiparon uno de los temas más perdurables del siglo y, en algunos aspectos, se adelantaron a su tiempo. Victor Frankenstein define inequívocamente a su criatura como un demonio. En la novela, el creador del monstruo señala que: «El ser que había creado, [...] el miserable demonio que había enviado al mundo» para su destrucción, lo perseguiría durante el resto de su vida. Victor está obsesionado con devolver la vida a los muertos. Inspirado por nigromantes y ocultistas expertos en el arte de invocar demonios, confiesa en sus memorias que: «El despertar de fantasmas o demonios era una promesa generosamente concedida por mis autores favoritos». La creación de Victor se reconoce en esos términos: «Consideraba a Satanás el emblema más adecuado de mi condición, pues muchas veces, como él, la amarga hiel de la envidia se alzaba en mi interior cuando era testigo de la dicha de mis protectores». Cuando el monstruo aprende a leer, uno de sus escritores favoritos resulta ser Johann Wolfgang von Goethe, autor de Fausto.

Cuando Byron organizó su viaje a Ginebra, la madre de Lovelace se había separado recientemente de él y se había llevado a la pequeña Ada a vivir con ella. Procurando que su hija estuviera bien lejos de su mujeriego padre y su camarilla de juerguistas, la madre logró que su hija no siguiera los pasos de su padre hacia la literatura ni el libertinaje. La niña acabó escribiendo sobre ordenadores. En muchos aspectos, los escritos de Lovelace eran más adelantados que los del medio literario de su época, porque realmente abanderaban la investigación científica actual. Vender el alma para obtener el conocimiento total (como en Fausto) y utilizar la electricidad para dar vida a híbridos formados a partir de trozos de cadáveres (como en Frankenstein) entrañaba un evidente riesgo moral. Pero ¿podemos o debemos calcularlo todo? ¿Cuáles son los límites y los peligros del conocimiento aritmético? Estas eran las preguntas que se planteaba Lovelace.

En 1842, Ada publicó una traducción del *Notions sur la machine analytique* de M. Charles Babbage. El autor del texto era Luigi Federico Menabrea, un ingeniero militar y general que había conocido recientemente a Babbage en Turín y que llegó a ser primer ministro de Italia. Su ensayo se había publicado en francés en Ginebra. En él, Menabrea manifestaba que: «Al principio, la imaginación se asombra ante la idea de una empresa de tal magnitud, pero cuanto más serenamente reflexionamos sobre ella, el éxito parece menos imposible». En varios pasajes del ensayo, el autor recalca que la máquina no era «un ser pensante», aunque también sostenía que se le parecía: «No es en sí

misma el ser pensante, pero sí puede considerarse como el ser que ejecuta las concepciones de la inteligencia».

¿Podía llegar a pensar? Lovelace respondió a la pregunta en sus abundantes «notas de la traductora», que firmó únicamente con sus iniciales. Más tarde se consideró que esas notas escondían algunas de las bases más importantes de la teoría de la computación. En sus anotaciones, Lovelace rebatió la impresión común de que una computadora pudiera considerarse un «ser pensante». Pero incluso después de plantear esa salvedad, expresó su temor ante la posibilidad de crear una «máquina capaz de pensar o razonar». Lovelace y Menabrea no lograron contrarrestar del todo la sensación de que los motores de cálculo programables sí podían convertirse una especie de seres inteligentes, y que en el futuro podrían mejorar tanto que llegaran incluso a ser un primate rival al humano. Durante los dos siglos siguientes, muchos científicos y filósofos reexaminaron sus afirmaciones y se esforzaron por mejorar esas tecnologías para intentar materializar el ser de Laplace.

UN VIAJE EN EL TIEMPO

La criatura de Laplace entró en la literatura como una especie de viajero en el tiempo, al cual no le sorprendía nada durante su trayectoria por el pasado y el futuro. Al ser omnisciente, podía hacerse una idea completa del universo. El escritor de ciencia ficción H. G. Wells eligió este modelo en *La máquina del tiempo* (1895) para describir cómo esa criatura experimentaría la historia: «Si “pasado” significara algo, significaría mirar en una dirección determinada; mientras que “futuro” significaría mirar en la dirección opuesta». Para un ser como el de Laplace, viajar en el tiempo no era tan divertido, pero sí podía serlo para un ser menor que viajara con él de polizón. En *La máquina del tiempo* de Wells, un grupo de huéspedes incrédulos se reúne en torno al protagonista de la novela que explica «la enjundia» de su invento. El profesor que construye la máquina en el relato de Wells demuestra su funcionamiento evocando el ejemplo del observador omnisciente de Laplace: «Supongamos que conociéramos con exactitud la posición y las propiedades de cada partícula de materia, de todo lo que existe en el universo en un momento dado: supongamos, por consiguiente, que fuéramos omniscientes». Las consecuencias serían asombrosas: «Si

comprendieras todas las leyes naturales, el presente sería un registro completo y vívido del pasado. Del mismo modo, si comprendieras todo el presente, conocieras todas sus tendencias y leyes, verías claramente todo el futuro». Para ese ser, nada se perdería, nada se olvidaría. «Para un observador omnisciente, no habría ningún pasado olvidado —ningún pedazo de tiempo que hubiera dejado de existir, por así decirlo— ni ningún futuro en blanco de cosas aún por revelar». Para él, el tiempo desaparecería: «En verdad, presente, pasado y futuro carecerían de significado para un observador semejante: siempre percibiría exactamente lo mismo. De algún modo, vería un universo rígido que llenaría el espacio y el tiempo, un universo en el que las cosas serían siempre las mismas. Vería una única serie inmutable de causas y efectos hoy, mañana y siempre».

Al poco tiempo, los científicos se referirían a este universo rígido como el «universo bloque». En teoría, se podía viajar en el tiempo igual que los dedos recorren las teclas del piano; ¿por qué no podía viajar en la práctica, pues? Si Laplace acertaba y nuestro universo era como él suponía, ¿no podríamos aprovechar nuestro conocimiento para avanzar y retroceder en el tiempo? Wells no dio elaborados detalles técnicos. El observador omnisciente de Laplace era lo bastante creíble como para convencer a los lectores de que se subieran a la narrativa. Charles Darwin, por ejemplo, lo adaptó a la biología.

III

EL DEMONIO DE DARWIN

El gran naturalista Charles Darwin se resistió a aceptar las generosas invitaciones que le mandaba Babbage para las animadas cenas que este último organizaba en su casa de Londres. «Le estoy muy agradecido por enviarme tarjetas de invitación a sus fiestas», señaló Darwin en una nota a Babbage, «pero me da miedo aceptarlas, dado que me encontraría allí con algunas personas a las que he jurado por todos los santos del cielo que nunca saldría y, por lo tanto, me avergonzaría encontrarme con ellas». Sin embargo, a medida que creció la expectación en torno a los nuevos motores de Babbage, a Darwin le picó la curiosidad. Su propio demonio se estaba gestando.

Babbage, Lovelace y sus amigos no eran los únicos que se plantearon las semejanzas entre una máquina y un ser vivo, e incluso un ser pensante. Darwin también empezó a valorar estos temas, pero en una dirección diametralmente opuesta, con una conexión con Laplace y, a la vez, una aportación propia. Si Babbage podía construir una máquina a partir de engranajes y tarjetas perforadas que parecía un «ser pensante», ¿era posible que los seres vivos reales fueran igualmente mecánicos? Si las máquinas parecían seres vivos en algunos aspectos, naturalmente Darwin se preguntó si en algunos sentidos los seres vivos podían ser mecánicos. El naturalista empezó a indagar en procesos sencillos, incluso mecánicos, que pudieran dar lugar a especies vivas.

Darwin abandonó sus recelos iniciales y se convirtió en un invitado habitual de Babbage. Llevaba consigo a amigos y familiares a las fiestas y, cuando no podía ir, los enviaba en su lugar. Ya hacía varios años que el naturalista había regresado de su famoso viaje alrededor del mundo a bordo del HMS Beagle. De vuelta a Londres, tuvo que conformarse con estudiar los rituales de apareamiento de la fauna local en las veladas londinenses de Babbage. En casa de Babbage, escribió, asombrado, uno podía «ver el mundo». Al cabo de poco tiempo, le resultó imposible no comparar a los integrantes de su círculo social con las plantas y los animales que había visto en las islas Galápagos.

Al esbozar las ideas principales de lo que acabaría siendo El origen de las especies, Darwin reflexionó sobre un ser «selector» capaz de dirigir la evolución. En bosquejos de él en sus cuadernos y en su correspondencia, Darwin especuló con la existencia de «un ser infinitamente más sagaz que el hombre», que tuviera «previsión» y que «durante miles y miles de años seleccionara todas las variaciones que tendieran hacia determinados fines». Entre paréntesis, se aseguró de señalar que esa criatura no debía confundirse con Dios: «No un creador omnisciente».

¿Ese ser podría engendrar una nueva raza? ¿Podría engendrar lo que quisiera? En sus notas, Darwin planteó un ejemplo: «Ya que en el campo hay más liebres, ¿a un canino no le vendría mejor tener las patas más largas y la vista más aguda?», y así produjo el galgo. ¿Qué diferencia habría entre la labor de ese ser y la de los criadores de animales? «Lo que el ciego insensato ha hecho en unos pocos años» no será nada comparado con lo que «podría efectuar un ser que todo lo ve durante miles de años». ¿Sería capaz de producir mejores animales o alimentos más suculentos? Darwin especulaba con que ese ser pudiera producir «una nueva raza».

Supongamos ahora un ser con la penetración suficiente para percibir diferencias en la organización externa e interna bastante imperceptibles para el hombre, y con una previsión futura secular para observar con infalible cuidado y seleccionar para cualquier objeto la descendencia de un organismo producido en las circunstancias anteriores. No veo ninguna razón por la que no pudiera formar una nueva raza (o varias, si separara la cepa del organismo original y trabajara en varias islas) adaptada a nuevos fines.

Apenas unos años antes de terminar su obra maestra, Darwin volvió a conjeturar otra inteligencia, otra suerte de demonio. En una carta al naturalista estadounidense y profesor de Harvard Asa Gray, escribió: «Supongamos que existiera un ser que no juzgara por las meras apariencias externas, sino que pudiera estudiar toda la organización interna, que no cayera nunca en el capricho y que siguiera seleccionando un objeto durante millones de generaciones». Las posibilidades de esas figuraciones eran espectaculares. «¿Quién sabe de lo que podría ser capaz?», se preguntaba Darwin. Ese ser podría crear cosas aún más

maravillosas que las logradas hasta entonces por el criador europeo, quien «mediante este poder de acumular variaciones, adapta los seres vivos a sus deseos. Puede decirse que hace que la lana de una oveja sea buena para alfombras, la de otra para telas, etcétera». Darwin explicó a Gray que: «Incluso los criadores se han quedado de una pieza al ver sus resultados», y concluyó su carta disculpándose por urdir una teoría tan especulativa: «Su imaginación deberá llenar enormes lagunas».

El «ser sabio y perspicaz» mencionado por Darwin en sus notas de 1840 y su correspondencia de 1850 levantó polvareda vareda antes de la publicación de *El origen de las especies*, pero en el tomo publicado «nunca aparece en escena». Tampoco salió en ninguna de las «versiones posteriores de la teoría». ¿Se esfumó sin más? Al contrario, «pasó a la clandestinidad, desde donde retumbó para indicar su presencia como si fuera la máquina de truenos del teatro renacentista». Darwin quería explicar la naturaleza sin recurrir a «adiciones milagrosas», por lo tanto, en su teoría «la naturaleza ocupa el lugar del ser selector». En una carta a su amigo, el geólogo Charles Lyell, señaló: «Mi teoría de la selección natural no valdría absolutamente nada si requiriera adiciones milagrosas en cualquier fase del linaje». Sobre este punto, era implacable: «Si estuviera convencido de necesitar esas adiciones para la teoría de la selección natural, la rechazaría y la tacharía de porquería».

EL LAPLACE DE LA BIOLOGÍA

Los proyectos de Laplace y Darwin eran comparables en aspectos claves. Admiradores de Darwin consideraban que sus contribuciones ampliaban la visión mecanicista del universo al ámbito de la vida, es decir, que había hecho por la biología lo que Laplace había hecho por la astronomía. Thomas Huxley, uno de los bulldogs más leales de Darwin, explicó que el valor de la obra del naturalista —«la proposición fundamental de la evolución»— estribaba en la concepción de que: «El mundo entero, vivo y no vivo, es el resultado de la interacción que, siguiendo leyes definidas, mantienen las fuerzas que poseen las moléculas que componían la nebulosidad primitiva del universo». La utilidad del ser de Laplace para comprender el universo físico ya había quedado demostrada y, argumentó Huxley, y Darwin había extendido esas ideas al ámbito de la

biología.

Según Huxley, «una inteligencia suficiente, que conociera las propiedades de las moléculas de ese vapor [cósmico], podría haber predicho, por ejemplo, el estado de la fauna británica en 1869 con la misma certeza con la que se puede determinar lo que sucederá con el vapor del aliento en un frío día de invierno». Ese ser inteligente podría identificar todas las moléculas que pululan por el universo, incluso las que constituyen los organismos vivos en su eterna lucha por la existencia. Como los átomos se mueven en el espacio de izquierda a derecha y arriba o abajo, uniéndose y formando nuevas combinaciones, algunas especies se aparean y sobreviven y otras no. Huxley sostenía que «muchas de esas [moléculas], con tendencias diversas, compiten entre sí por la oportunidad de existir y multiplicarse; y, en su conjunto, el organismo es el producto de las moléculas que salen victoriosas tanto como la fauna o la flora de un país es el producto de los seres orgánicos victoriosos que hay en él». Aunque Huxley estaba convencido de que el movimiento previsible de las moléculas podía explicar toda la vida, otros teóricos —entre los que destacaba el biólogo británico Alfred Russel Wallace— seguían observando que otras fuerzas influían en el desarrollo de los seres vivos.

La escisión entre los que pensaban que la selección natural podía explicar mecánicamente la aparición de la vida, como Darwin, y los que no, como Wallace, se convirtió en una de las querellas más irresolubles en los siglos siguientes. Wallace había estado a punto de adelantarse a Darwin en el descubrimiento de la selección natural.

Cuando Darwin descubrió las investigaciones de Wallace, se puso nervioso. Él llevaba tiempo trabajando en una teoría similar, pero aún no había publicado nada. Sus amigos le ayudaron a ponerse a la altura del joven advenedizo, que no tenía sus mismos contactos en la alta sociedad. Darwin pulió rápidamente lo que tenía y lo publicó junto al texto de Wallace, impidiendo así que su rival le ganara. De resultas, el nombre de Darwin se ligaría a la evolución y la selección natural, mientras que Wallace solo pasaría a la historia como codescubridor. Aunque Darwin y Wallace mantuvieron una relación bastante cordial, su interpretación de lo que acababan de descubrir divergió enormemente con el paso de los años. Su fuente de discrepancia era la posible existencia de agentes invisibles que pudieran guiar la evolución.

Wallace criticó a Darwin por utilizar la selección «natural» como una tapadera

para fuerzas —algunas posiblemente sobrenaturales— que afectaban al desarrollo de las especies. Tras la publicación de *El origen de las especies*, Wallace se enzarzó en una discusión con su rival, acusándole de que su teoría necesitaba de estas fuerzas pero no las reconocía como tales. Wallace estaba convencido de que, tras los magníficos resultados que Darwin tildaba de mera «selección natural», se escondía un organismo más poderoso. Por eso le escribió una carta a su privilegiado colega para pedirle aclaraciones sobre su uso del término «selección natural».

Wallace acusó a Darwin de padecer «una especie de ceguera, pues no veis que la “selección natural” requiere la vigilancia constante de un “selector” inteligente, como la selección humana con la que tan a menudo la comparáis». ¿Quién elegía ciertas características específicas? ¿La naturaleza por sí sola? En dicho caso, tal concepción de la naturaleza asumía dirección y agencia. Darwin describía la naturaleza como un proceso muy animado, y eso contradecía afirmaciones de que ofrecía una explicación de la evolución que excluyera la intervención de Dios u agentes derivados. Según Wallace, algunos de los lectores más perspicaces de Darwin también habían llegado a la conclusión de que se necesitaban «elección y dirección» para producir los efectos de la «selección natural», aunque el propio naturalista las intentara negar. Wallace mencionó que el científico y filósofo francés Paul Janet ya había observado esa deficiencia en la obra de Darwin y había formulado críticas similares. «A menudo personificáis la naturaleza señalando que es “seleccionadora”, “preferente”, o “que solo busca el bien de la especie”, etc., etc.», protestó Wallace, alegando que era una debilidad fatal en su argumentación.

En *The Action of Natural Selection on Man* [La acción de la selección natural sobre el hombre] (1871), Wallace señaló las limitaciones del planteamiento de Darwin que hasta entonces solo había abordado en privado. En su libro afirmó sin ambages que, en lo que respecta a la evolución del hombre, «algún otro poder distinto de la selección natural ha intervenido en su producción». ¿Cuál podría ser ese otro poder?

Según su lógica, así como los humanos habían domesticado animales y plantas, alguien más nos había creado a nosotros: «Una inteligencia superior ha guiado el desarrollo del hombre en una dirección definida y con un propósito especial, igual que el hombre guía el desarrollo de muchas formas animales y vegetales». Los lectores de Wallace le respondieron con una ingeniosa crítica: le acusaron de brindar una teoría que presentaba al hombre como «el animal doméstico de

Dios».

«Los ángeles, los arcángeles, los espíritus y los demonios llevan tanto tiempo desterrados de nuestras creencias que es impensable considerarlos existencias reales», explicó Wallace en unas notas añadidas a la segunda edición de 1871 de sus *Contributions to the Theory of Natural Selection* [Contribuciones a la teoría de la selección natural]. No aparecían en los relatos de la mayoría de los pensadores modernos, incluido Darwin. «Nada en la filosofía moderna ocupa su lugar». Pero la extirpación total de esos seres de nuestro pensamiento abría «un abismo infinito entre el hombre y la gran mente del universo», lo cual, según Wallace, era «sumamente improbable».

La interpretación de Wallace, que procedía de un entorno socialmente más desfavorecido y carecía de las conexiones de su oponente, tuvo mucha menos acogida. Tampoco ayudaba el hecho de que Wallace fuera socialista y se interesara por el estudio de los fenómenos espiritistas. No obstante, críticos y expertos seguirían señalando que la teoría de Darwin necesitaba de un agente que decidiera y seleccionara ciertas características de los seres vivos para asegurar su supervivencia. Muchos años más tarde se le conocería a tal agente como «el demonio de Darwin».

IV

EL DEMONIO DE MAXWELL

Si hubiera que destacar solo tres hombres como efigies de la historia de la física moderna, la mayoría de los historiadores situarían a Maxwell después de Isaac Newton y antes de Albert Einstein. Maxwell es conocido principalmente por sus aportaciones a la electrodinámica y se le recuerda por haber predicho la existencia de las ondas electromagnéticas.

En una serie de célebres trabajos científicos, estableció que la electricidad, la luz y las fuerzas magnéticas compartían una misma esencia, y escribió un conjunto de famosas ecuaciones para describirlas. Pasado el tiempo, estas ecuaciones serían consideradas proféticas. Los rayos X, el radar, el wifi, el motor eléctrico y el microondas se siguen entendiendo gracias a las ecuaciones de Maxwell. Recientemente se publicó una biografía del genio con un acertado título: *The Man Who Changed Everything* [El hombre que lo cambió todo].

En el centenario del nacimiento del físico escocés, Einstein dijo de su trabajo que había provocado la «mayor alteración» experimentada por la física «desde que Newton fundó la física teórica». El físico Richard Feynman, que dedicó uno de sus artículos más conocidos al demonio de Maxwell, afirmó que, «si analizamos la larga historia de la humanidad, [...] no cabe duda de que el acontecimiento más significativo del siglo XIX es el descubrimiento de Maxwell de las leyes de la termodinámica». Según Feynman, incluso la guerra civil estadounidense iba a «palidecer hasta la insignificancia provinciana». ¿Qué hizo el matemático escocés para que las generaciones posteriores lo consideraran incluso más importante que la guerra que resultó en la abolición de la esclavitud en Estados Unidos?

Maxwell, a principios de diciembre de 1867, escribió una carta a su colega Peter Guthrie Tait en la que hablaba de las leyes de la termodinámica. Allí se refirió a un «ser finito muy observador y pulcro». A su vez, Tait remitió la carta a su colega William Thomson, uno de los científicos más venerados de su época

posteriormente conocido como lord Kelvin, el primer científico elegido para la Cámara de los Lores. Thomson lo apodó «demonio de Maxwell» e investigó sus habilidades mientras desarrollaba valiosísimas patentes que le dieron riqueza y fama.

Tait consideraba a Maxwell un hombre lleno «de originalidad, fertilidad y tiempo», y así se lo expresó en su carta. El propósito de la misiva era pedirle su opinión sobre un libro que estaba escribiendo sobre la historia de la termodinámica: «¿Está usted lo bastante al día de la historia de la termodinámica como para analizarla de manera crítica y corregir un pequeño tratado que estoy a punto de imprimir, y tendría la amabilidad de aplicarle sus poderes críticos?». Maxwell aceptó, contestándole a Tait con un ejemplo de un «ser finito». Con esa idea fue capaz de «abrir un agujero» en una de las teorías más fundamentales de su época, poniéndolas en cuestión.

Las aportaciones de Maxwell a la electrodinámica y el «agujero» que abrió en la termodinámica ya son archiconocidos. Su demonio se utiliza para demostrar por qué no podemos predecirlo todo siempre a la perfección y por qué tenemos que entender que la segunda ley de la termodinámica —también conocida como la ley de la entropía— solo es válida a nivel estadístico.

Según la primera ley de la termodinámica, la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Según la segunda ley, el calor fluye de caliente a frío y no existen las máquinas de movimiento perpetuo. Las dos grandes leyes de la energía son de las más completas de la ciencia. Abarcan desde la cosmología hasta la biología e incluyen elementos tan básicos y diversos como el tiempo, el calor, los alimentos, la información y la comunicación. La segunda ley explica por qué envejecemos, por qué necesitamos comer para reponer los nutrientes de nuestro cuerpo, por qué las plantas necesitan luz y agua para crecer, por qué el futuro difiere del pasado, por qué percibimos la flecha del tiempo y por qué necesitamos invertir tanto trabajo y esfuerzo en restaurar el orden de las cosas.

En ese contexto nace el demonio de Maxwell, el más famoso de todos los demonios de la ciencia. Sigue activo, trabajando como siempre sin prisa pero casi sin pausa, sin mucho esfuerzo y sin grandes derroches, incansable y eficazmente como una máquina de movimiento perpetuo. Su diminuto tamaño refleja inversamente su poder. Porque es el demonio de lo invisible.

Trabaja manipulando átomos, dejando pasar a los más rápidos por una

puertecilla y previniendo que los lentos se mezclen con ellos. Una taza de café siempre acaba enfriándose, pero lo contrario nunca ocurre. Las zonas calientes en cualquier sopa o en la naturaleza en general eventualmente se desparraman y se diluyen hasta llegar a una temperatura de equilibrio. Las diferencias de temperatura son muy difíciles de mantener, e incluso los mejores aislantes disipan el calor. No obstante, luchamos contra la entropía constantemente, creando y mejorando tecnologías que nos ayudan en ese empeño. El demonio de Maxwell es el experto en invertir estos procesos.

Nació en el mundo victoriano de motores y de redes ferroviarias, eléctricas y telegráficas del gran Imperio británico. Se le conoce también como el «demonio clasificador», porque este discriminador ideal puede manipular objetos minúsculos, desde átomos y moléculas hasta bits informáticos. Es más peligroso que el demonio de Descartes, ya que puede influir directamente sobre el mundo natural sin necesidad de engañar. Puede ganarle al inmenso demonio de Laplace porque tiene la facultad de cambiar el curso de la historia interviniendo a medio camino impidiendo que la naturaleza siga su curso normal y alterando el flujo regular del tiempo, para bien o para mal. Por su culpa, el futuro puede cambiar repentina e inesperadamente.

Trabaja sobre la marcha, adaptándose según las circunstancias a su alrededor, para alterar estratégicamente las fuerzas del equilibrio. Como un katechon bíblico en miniatura, es capaz de retrasar el fin del mundo, deteniendo la entropía, poniendo fin a la degradación e incluso haciendo que el mundo funcione al revés. Es como un pez capaz de comerse a una ballena, un David capaz de vencer a Goliat o la gota que colma el vaso. Se sospecha que está presente allí donde las causas minúsculas pueden acumularse para provocar efectos mucho mayores, como en las grandes avalanchas y explosiones que se desencadenan por lo más mínimo, en los virus que se reproducen a toda prisa hasta llegar a causar pandemias, en las cadenas de ADN que se replican durante el proceso de reproducción, en las enzimas que dan pie a fuertes reacciones químicas, en ciertas partículas subatómicas, hasta en las fuerzas que organizan los copos de nieve en formas maravillosas.

El demonio de Maxwell se usa para explicar cómo funciona todo tipo de mecanismos que operan como conductos unidireccionales (orificios, válvulas, bombas, filtros, membranas semipermeables, trinquetes mecánicos, rectificadores eléctricos, microprocesadores y mecanismos que permiten la selección y transferencia de material genético), y también máquinas que crean

trabajo a expensas del medioambiente, como los motores y las neveras. Nos comportamos de forma muy parecida al demonio de Maxwell cuando demostramos ser inteligentes al realizar actos de discernimiento selectivos que resultan consecuentes. Incluso los humildes bibliotecarios podían participar en una misión para reducir la entropía, ya que «es evidente que el bibliotecario clasificador cumple la misma función que un clasificador en la oficina de correos: es un demonio de Maxwell generalizado que desafía la tendencia al desorden de la segunda ley de la termodinámica».

Cuando surgió el demonio de Laplace, la mecanización suscitaba grandes temores, algunos de ellos relacionados con la posibilidad de que Dios no fuera la fuerza principal tras el funcionamiento del universo. Pero la idea de que otro demonio mostraba los límites absolutos a la mecanización hizo cundir el pánico. Ante esa posibilidad, el mundo acabaría como un motor destartado y sin energía. El fin del mundo—la muerte real del universo— parecía algo ineludible y no necesariamente tan lejano. Durante la época victoriana se cuestionó la estabilidad del universo descrita por Laplace.

Un científico describió recientemente el siglo xix como una época «hipostasiada por dos hipotéticos seres ideales, el demonio de Laplace y el demonio de Maxwell». Del primero decía que «podía predecir el estado completo del universo en un sentido newtoniano de causa y efecto, de acción y reacción, pues conocía la posición y velocidad de todas sus partículas para cualquier instante dado». Los poderes del segundo no eran menos impresionantes: ese demonio podía infringir temporalmente la segunda ley de la termodinámica y, con ello, rivalizaba casi con una máquina de movimiento perpetuo. Un experto en literatura describió su gran impacto sobre nuestra visión moderna del mundo: «Los hombres habían confiado en el Gran Relojero para mantener las cosas en funcionamiento; pero se habían olvidado del Gran Fogonero, y, de repente, parecía que este no podía con tal trabajo. Nuestro universo era mortal, y desde entonces leemos ávidamente su temperatura».

Hoy, puede que el demonio de Maxwell sea «más conocido que su creador». Se han escrito numerosos libros y artículos sobre él. Se le han dedicado biografías y ha tenido una carrera artística estelar: teatral, cinematográfica, literaria e incluso musical. Se han reeditado los artículos más destacados sobre su persona. Dos volúmenes minuciosos con algunas de las investigaciones más importantes sobre él predijeron que «es probable que continúe en activo» y concluyeron: «¡Esperamos que el demonio de Maxwell siga siendo un potente maestro durante

muchos años!». Miles de alumnos aprenden sobre él en las universidades, y su imagen adorna las páginas de muchas revistas y libros de texto científicos. Su vida ha sido cuidadosamente recopilada en exhaustivas bibliografías que documentan cada una de sus apariciones y archivada por bibliotecarios movidos por un afán propio de los paparazzi. La Biblioteca de la Universidad de Cambridge conserva la carta original en la que Maxwell menciona al demonio por primera vez y una nota relacionada con ella titulada Concerning Demons [Sobre los demonios] como tesoros.

¿POR QUÉ DEMONIOS?

Las dos leyes de la termodinámica mencionadas tienen implicaciones incluso para nuestras ideas de la justicia y la equidad, así como las del azar y el destino. Su envergadura permite las excepciones, que los científicos suelen achacar a los actos del demonio de Maxwell. El demonio de Maxwell explica por qué a veces, y a pesar de todo, la naturaleza sigue el camino menos transitado. La criatura de Maxwell podía aprovecharse de la naturaleza estadística de la termodinámica para obtener resultados inesperados. En su carta original a Tait, Maxwell se preguntó si nosotros podríamos también lograr tal hazaña: «Solo que no podemos, pues no somos lo bastante inteligentes». Comprender el poder de nuestras acciones e innovaciones tecnológicas en la lucha contra la entropía resultó ser un enigma enrevesado.

Concerning Demons

MS. 7655/II/11a

- 1° Who gave them this name? Thomson
- 2° What were they by nature? Very small but lively, being ~~capable of obeying orders~~ but incapable of doing work but able to open shut valves which move without friction or inertia.
- 3° What was their chief end? To show that the 2nd Law of Thermodynamics has only a statistical certainty
- 4° Is the production of an inequality of temperature their only occupation? No for less intelligent demons can produce a difference in pressure as well as temperature by merely allowing all particles going in one direction to pass while stopping all those going the other way. This reduces the demon to a valve. As such valve him. Call him no more a demon but a valve like that of the Hydraulic Ram, suppose.

Concerning a molecular ether

If ether is molecular be the molecule 1000 or 1000000 of those of hydrogen, the ether is a gas tending to equality of temperature with other bodies and having a capacity for heat not less than $\frac{3}{5}$ of that of H. O. N. be for equal volume at same temperature & pressure.

Serues corpuscules also form a gas of great viscosity for viscosity increases as the particles get smaller and therefore have longer free paths.

I see you are slowly but surely approaching the magnificent scene described in The Death of Space by R. M., in which Nonentity in circumambient wraps an everlasting Phoenix shall arise.

FIGURA 2.

Entre los papeles de Tait recobrados después de su muerte se encontró una nota sin fecha escrita a mano por Maxwell, titulada «Sobre los demonios». Los expertos creen que Maxwell la escribió hacia 1876. Su estructura seguía de cerca la de un catecismo. Al igual que las oraciones y recitaciones, los catecismos suelen presentar rimas pegadizas basadas en preguntas cortas seguidas de respuestas concisas. Están hechos para ser repetidos mil y una veces, con lo que cumplen una función mnemotécnica. Son herramientas pedagógicas ideales para inculcar creencias. La misteriosa nota decía:

1. ¿Quién les dio este nombre? Thomson.
2. ¿Qué eran por naturaleza? Seres muy pequeños PERO vivos, incapaces de realizar trabajo, pero capaces de abrir y cerrar válvulas que se mueven sin fricción ni inercia.
3. ¿Cuál era su principal objetivo? Demostrar que la segunda ley de la termodinámica tiene una certeza meramente estadística.
4. ¿Solo se ocupan de producir la desigualdad de temperatura? No, dado que los demonios menos inteligentes pueden producir una diferencia de presión, así como de temperatura, simplemente permitiendo que todas las partículas vayan en una dirección y deteniendo todas las que van en la otra. Esto reduce el demonio a una válvula. Considéralo como tal. No lo llames más «demonio», sino «válvula»... como la del ariete hidráulico, por ejemplo.

El cuarto punto de la lista de Maxwell rompía con la pauta de los tres primeros. En él, Maxwell renegaba de su propia creación. «No lo llames más “demonio”», suplicaba el físico. Sus funciones principales podían recaer en una triste «válvula», incluso en una tan simple como una bomba hidráulica, como alegaría en varias ocasiones. Pero ¿durante cuánto tiempo? ¿Un mecanismo así podría desafiar la segunda ley de la termodinámica? En caso afirmativo, ¿podría utilizarse para fabricar una de las máquinas más codiciadas de todos los tiempos: una máquina de movimiento perpetuo?

LA TEORÍA DEL CALOR

¿De dónde salían los poderes del demonio de Maxwell? El demonio podía alterar el curso de moléculas individuales actuando selectivamente sobre ellas e invirtiendo el equilibrio de temperatura. En vez de igualar las mezclas de temperaturas desiguales, podía hacer que una parte se calentara más mientras la otra se enfriaba. Solo tenía que impedir que los átomos veloces que calentaban la temperatura se mezclaran con los lentos, que la reducían.

Maxwell empezó a debatir la idea directamente con Thomson en otra carta. Al invierno siguiente, en una misiva a otro físico, describió al demonio que llevaría su apellido como un humilde «guardagujas de ferrocarril». En la Inglaterra victoriana, la comparación con esa profesión era tan gráfica como evocadora. Una mera palanca podía desviar un tren que fuera desde Londres a Cambridge en vez de a Oxford, y un simple error de sincronización podía causar la muerte de cientos de pasajeros. ¿Un demonio que trabajara con moléculas podría producir efectos similares desviando las moléculas de su ruta predeterminada? Si una acción tan insignificante como mover una palanca tuviera lugar durante un punto de inflexión clave, ¿podría cambiar el destino del universo, tal como un operador de ferrocarriles podría cambiar el destino de un tren?

La primera vez que el célebre personaje de Maxwell apareció impreso fue en 1871, en la última sección de su libro *Theory of Heat* [Teoría del calor], bajo el revelador título «Limitación de la segunda ley de la termodinámica». Allí, el físico escribió: «Antes de acabar, quiero llamar la atención sobre un aspecto de la teoría molecular que merece consideración». Se estaba refiriendo a «uno de

los hechos más probados de la termodinámica»: a saber, que es imposible «producir cualquier desigualdad de temperatura o de presión sin gasto de trabajo». Maxwell explicó: «Esta es la segunda ley de la termodinámica, y es indudablemente cierta mientras podamos tratar con los cuerpos solo en masa y no tengamos la facultad de percibir o manipular las moléculas sueltas de las que están compuestos». Este último punto dejaba inmediatamente abierta una posibilidad muy interesante: «Pero si concebimos un ser con facultades tan aguzadas que sea capaz de seguir cada molécula en su curso, ese ser, cuyos atributos son aún tan esencialmente finitos como los nuestros, sería capaz de hacer lo que en el presente nos resulta imposible».

A continuación, Maxwell describió su ser en el contexto en el que más iban a concebirlo los muchos autores a quienes embelesó: trabajando con dos recipientes aislados unidos entre sí por una única abertura para permitir el paso de ciertas moléculas:

Imaginemos que dicho recipiente está partido en dos porciones, A y B, por una división en la que hay un pequeño orificio, y que un ser capaz de ver las moléculas sueltas abre y cierra ese orificio, de modo que solo las moléculas más veloces pasan de A a B, y solo las más lentas pasan de B a A.

Con sus delicados movimientos, ese ser podía «contradecir» la segunda ley. Y podría hacerlo casi sin esfuerzo: «Así, sin gasto de trabajo, elevará la temperatura de B y bajará la de A, en contradicción con la segunda ley de la termodinámica».

En su *Theory of Heat*, Maxwell también revisó las aportaciones de Fourier, que había propulsado la obra de Laplace para comprender mejor la transmisión del calor. Como la economía mundial dependía cada vez más del carbón, los estudios sobre la disipación del calor eran más pertinentes que nunca. Maxwell no daba crédito a lo que se había logrado gracias a Fourier: «Mediante un conocimiento profundo del estado térmico del cuerpo en un instante dado, ahora somos capaces de determinar la velocidad a la que la temperatura de cada parte cambiará, y por lo tanto somos capaces de predecir su estado en el instante siguiente. Sabiendo esto, podemos predecir su estado al cabo de un instante,

luego al cabo de otro, y así sucesivamente». Con unas pocas mediciones, «tendremos datos suficientes para calcular la temperatura de cada punto durante todo el tiempo venidero».

Maxwell y sus colegas no dejaban de hablar del diminuto personaje. Su fama se disparó. Pero la denominación pública de título «demonio de Maxwell» se produjo casi media década después, cuando Thomson dio una ponencia ante la Royal Society de Edimburgo el 16 de febrero de 1874. Sus arrebatadoras palabras se acabarían publicando en dos sitios, en los Proceedings oficiales de la sociedad y en la revista Nature. El periódico local, el Edinburgh Courant, propagó la noticia del enigmático personaje en un artículo publicado el martes siguiente. En sus artículos y presentaciones, Thomson explicaba la tendencia al equilibrio citando un demonio ausente: «Si las moléculas sueltas no son guiadas por ninguna influencia selectiva, como la del “demonio” ideal, el resultado medio de sus movimientos y colisiones libres debe ser, en general, igualar la distribución de energía entre ellas».

La criatura volvió a aparecer en el controvertido libro *The Unseen Universe* [El universo invisible], coescrito por el físico Balfour Stewart, director del observatorio de Kew, y Tait. El texto se publicó de forma anónima en 1875 y fue reeditado muchas veces, levantando una gran polvareda en torno a la criatura y su posible existencia. Cuando el matemático William Kingdon Clifford lo leyó, quedó sorprendido por las numerosas referencias a criaturas sobrenaturales: «No solo hay lugar para que las deidades rijan sobre sus propiedades y funciones, la existencia, la energía y la vida, sino para toda la demás maquinaria de la mitología cristiana: cuerpos espirituales repletos de energía, ángeles, arcángeles, encarnaciones, demonios moleculares, milagros y la gehena universal».

LA INVERSIÓN DEL TIEMPO

¡Ojalá pudiéramos retroceder en el tiempo! ¿Por qué no? Ya hemos visto con el demonio de Laplace cómo surgía este deseo secular en el ser humano. El demonio de Maxwell podía hacerlo, podía viajar en el tiempo trabajando en contra de la dirección causal regular de las partículas físicas. En un universo compuesto por moléculas de movimiento, esa reordenación equivalía a invertir

el tiempo.

Thomson fue uno de los primeros científicos en articular las consecuencias que provocarían las excepciones a la ley de la entropía en el flujo del tiempo. En su histórica conferencia publicada en Nature el 9 de abril de 1874, «The Kinetic Theory of the Dissipation of Energy» [La teoría cinética de la disipación de la energía], describió cómo sería el mundo si de repente empezara a funcionar a la inversa:

La burbuja de espuma que estalla al pie de una cascada se recompondría y bajaría al fondo del agua. [...] Las rocas recuperarían del lodo los materiales necesarios para recuperar su forma anterior, y se recompondrían en la cima de la montaña de la que se habían desprendido, [...] los seres vivos crecerían a la inversa, conociendo conscientemente su futuro, pero sin memoria del pasado, y volverían a ser nonatos.

A posteriori, Thomson especuló con la posibilidad de emplear un «ejército de “demonios inteligentes” de Maxwell» para producir esos efectos. El asterisco en su evocadora frase remitía a una nota a pie de página en la que explicaba el significado del término: «La definición de “demonio”, según el uso que a esta palabra le da Maxwell, es un ser inteligente dotado de libre albedrío y [de] una organización táctil y perceptiva tan sutil como para tener la facultad de observar y manipular moléculas de materia».*

La conferencia de Thomson versaba sobre la energía, el trabajo y el calor en relación con el movimiento de las moléculas subyacentes. Como Maxwell antes que él, investigaba casos regulares y excepcionales, haciendo hincapié en los procesos de difusión que conducían al equilibrio de temperatura. Aunque la difusión era la norma, «ese proceso de difusión podría impedirse perfectamente mediante un ejército de “demonios inteligentes” de Maxwell, estacionados en la superficie, o en la interfaz, como podríamos llamarla». ¿Cómo operaría ese ejército de demonios? «El deber de cada demonio sería vigilar su parcela, haciendo retroceder a las moléculas o permitiéndoles pasar por uno u otro lado, según ciertas órdenes definidas». El ejército estaría bien equipado: según él, «el arma del ejército ideal sería un garrote o, en su defecto, un bate de criquet

tamaño molecular». El ejército montaría guardia en posiciones designadas: «Cada demonio debería mantenerse lo más cerca posible de un puesto determinado, y realizar solo las excursiones que requiriera el cumplimiento de sus órdenes». Para ese soldado o deportista, sería esencial tener una buena sincronización, una excelente coordinación visual-corporal y una firmeza escultural: «Podría planear sus golpes de tal modo que nunca se moviera a una distancia considerable de su sitio».

Los efectos del ejército de los demonios invisibles de Thomson podían medirse y calcularse. Para ilustrarlos, Thomson eligió el ejemplo de una barra de hierro calentada por un extremo. «Operando selectivamente sobre átomos individuales, el demonio puede invertir la disipación natural de la energía, haciendo que la mitad de un frasco cerrado de aire (o de una barra de hierro) fulgure de ardor, y que la otra mitad esté helada». Si metemos una cuchara en sopa caliente, el mango se calienta y la sopa se enfría hasta que ambos llegan a la misma temperatura. En el caso de una barra de hierro aislada calentada por un extremo, la temperatura de toda la barra termina alcanzando el equilibrio: los lados opuestos acaban teniendo la misma temperatura. Pero ¿qué probabilidad hay de que el calor fluya en la otra dirección? Es poco probable que ocurra, pero tampoco es completamente imposible: «Es muy improbable que en el transcurso de mil años la mitad de la barra de hierro se caliente por sí misma un grado más que la otra mitad». Las probabilidades son escasas, pero reales: «La probabilidad de que esto ocurra antes de un millón de años es mil veces mayor que en el transcurso de mil años». Thomson estaba seguro de que ese efecto se produciría en algún momento: «En el transcurso de una eternidad, sin duda ocurrirá». Los actos de su ejército de demonios eran tan reales y palpables como cualquier otra cosa en este planeta, aunque fueran improbables y raros a escala humana.

Thomson siguió reflexionando y dando conferencias sobre el demonio de Maxwell durante años. En una conferencia del viernes 28 de febrero de 1879, ante la Royal Institution de Gran Bretaña, animó a los oyentes a pensar en términos positivos sobre la elección del término: «La palabra demonio, que en el original griego significaba “ser sobrenatural”, nunca se ha utilizado correctamente para designar a una personificación real o ideal de malignidad». Para él, el demonio de Maxwell era «una criatura de la imaginación». Pero si era puramente imaginario, ¿cuál era su propósito?: «La concepción del “demonio clasificador” [...] reviste un gran valor para la ciencia puramente física», y aclaró que «no se inventó para ayudarnos a tratar cuestiones relativas a la influencia de la vida y de la mente en los movimientos de la materia, cuestiones esencialmente

fuera del alcance de la mera dinámica». Su valor particular era que podía «ayudarnos a comprender la “disipación de la energía”» en la naturaleza. Thomson tildó al demonio de animalesco: «Un ser sin cualidades preternaturales que difiere de los animales vivos reales solo en su extrema pequeñez y agilidad». También lo consideraba «puramente mecánico».

Como ese ser era similar a nosotros y poseía «atributos [...] tan esencialmente finitos como los nuestros», Thomson señaló que podíamos aprender de él. Su concepción del demonio como una criatura que podría enseñarnos cómo lograr algo imposible evocaba la propia explicación de Maxwell sobre la utilidad de su ser. Al concebirlo por primera vez, Maxwell subrayó que «sería capaz de hacer lo que en el presente nos resulta imposible», pero que podría materializarse en el futuro.

MINÚSCULOS LEVIATANES

El demonio de Maxwell era pequeño, pero no por eso se le debía de tomar por un debilucho. Las moléculas que podía desviar viajaban a velocidades tremendas. Se movían a más de mil quinientos kilómetros por hora y tenían más energía que el mítico Leviatán. Como expuso Maxwell: «Las moléculas del aire en esta sala vuelan en todas direcciones, a una velocidad de unos veintisiete kilómetros por minuto». Eran «muy veloces al lado de las balas», tanto como la velocidad de un proyectil «salido de la boca de un cañón». Era, cuando menos, «mayor que cualquier velocidad obtenida en las prácticas de artillería». No notamos el impacto de estas minúsculas balas porque vuelan en todas direcciones y chocan entre sí, con lo que tienden a anular sus grandes fuerzas. Los científicos calcularon que cada partícula de hidrógeno sufría una media de 17.700 millones de colisiones por segundo y cambiaba de dirección unos 17.700 millones de veces durante ese intervalo.

Según Thomson, el demonio podía hacer aún más. Podía agarrar dos átomos, unirlos y «apretar con las dos manos» para crear nuevos compuestos moleculares. «Aplicaría las dos manos» para «partirlos en dos» y podría descomponerlos. ¿Qué sería capaz de hacer si, en lugar de pertenecer a un ejército equipado con bates y garrotes, pudiera escoger y separar con suma

delicadeza?: «Puede detener, golpear, impulsar o arrastrar cualquier átomo de materia a placer y, así, moderar su curso natural de movimiento». ¿Y si tuviera las manos y la habilidad de un pianista? Pues: «En el caso ideal de que tuviera manos y dedos (dos manos y diez dedos bastarían), podría hacer con los átomos lo mismo que un pianista con las teclas de un piano; incluso un poco más, pues podría impulsar o arrastrar cada átomo suelto en cualquier dirección».

Con estos atributos, el demonio de Thomson podía transformarse en un maestro químico capaz de crear mezclas explosivas y combustibles. Si le das agua, a cambio podría devolverte «la mezcla explosiva de oxígeno e hidrógeno». Si le das el ácido carbónico que exhalamos regularmente, podría proporcionarte «los combustibles separados: carbono y oxígeno». Esas dotes le permitirían producir codiciados combustibles y explosivos y resolver un problema cada vez más acuciante: la contaminación urbana. Podía convertir constantemente residuos químicos en combustible sin ningún coste, cumpliendo el sueño de las fuentes de energía renovables: recuperar la energía perdida y reutilizar el combustible consumido.

La investigación de Thomson sobre el demonio culminó el trabajo de toda una vida. También fue la materialización de muchos sueños infantiles que había compartido con su hermano. El movimiento perpetuo era la fantasía de todo niño, y los dos hermanos Thomson no eran ninguna excepción. Hijos de un profesor de matemáticas e ingeniería de la Royal Belfast Academical Institution, su educación fue de las mejores de Irlanda del Norte. William admiraba a su hermano mayor, James, que aprendió el funcionamiento de las máquinas por las malas. En la década de 1840, el pequeño William se acercó a su hermano tras llegar a una «curiosa conclusión respecto a la fuerza motriz del calor, razonando sobre principios similares a los que desarrolló Carnot», refiriéndose al francés Sadi Carnot, que a principios de siglo había determinado por qué la eficiencia de los motores estaba ceñida por límites infranqueables. William creía haber dado con un modelo de máquina de movimiento perpetuo: como el volumen del agua se expandía al convertirse en hielo, pensó que tal vez se podría utilizar la fuerza de la expansión para producir trabajo. El bosquejo utilizaba la fuerza expansiva del hielo para empujar un pistón dentro de un motor: «El agua se expande al congelarse. De ello parecía deducirse que, si una cantidad de agua estuviera congelada dentro de un recipiente con un pistón móvil, el movimiento del pistón provocado por la expansión, con la resistencia de la presión, generaría trabajo mecánico sin gasto correspondiente; en otras palabras, se podría crear una fuente perpetua de trabajo mecánico, comúnmente llamado “movimiento perpetuo”».

El mayor de los hermanos Thomson sabía que no era así: «Mi instinto fue pensar que era imposible». James solo tenía que averiguar por qué. Por ello conjeturó que el punto de congelación del agua debía disminuir con la presión. «Para evitar el absurdo de suponer que podía obtenerse trabajo mecánico de la nada, se me ocurrió que el punto de congelación tenía que disminuir a medida que aumentaba la presión a la que estaba sometida el agua». William no consiguió crear la máquina de sus sueños, pero James pudo publicar su artículo en el Cambridge and Dublin Mathematical Journal y en las Transactions of the Royal Society of Edinburgh.

James también recibió un rapapolvo en lo concerniente a la invención de nuevas máquinas. Se lo dio un amigo mayor que él que había conocido en la escuela y que se había convertido en un hombre de negocios e ingeniero de éxito. James pensó que había descubierto el prodigio del movimiento perpetuo y escribió una carta a su amigo en la que describía el «croquis de una máquina para propulsar barcos contra la corriente». Su interlocutor le respondió sin contemplaciones y sin pelos en la lengua. Era «muy ingenioso», pero, lamentablemente, alguien lo había sopesado ya: «Aunque no lo conozcas y ostentes el mismo mérito como inventor, se probó en Francia hace muchos años». Su amigo le recordó «la gran dificultad de dar con un plan útil que no se haya intentado antes, así como la necesidad de pensarlo bien antes de dedicarle tiempo». Básicamente, le dijo a James que volviera a sus estudios: «De hecho, si estuviera en tu piel —y estoy seguro de que disculparás mis palabras de aprendiz veterano—, por el momento evitaría cualquier intento de inventar maquinaria del tipo que sea». Antes de fanfarronear, le dijo a su amigo: «Intentar descubrimientos útiles sin conocimiento previo me parece una pérdida de tiempo tan grande como que una persona se esfuerce por resolver los problemas más ambiciosos de la astronomía sin haber pasado antes por el cálculo». Y acababa despidiéndose con sequedad: «Créeme, mi querido James».

A partir de ese momento, los dos Thomson persiguieron el sueño del movimiento perpetuo con más madurez. Para ello estudiaron detenidamente los «innumerables [...] croquis propuestos y probados para conseguir una combustión perfecta del carbón en los hornos» antes de intentar mejorarlos. A mediados del siglo XIX, personas llamadas fogoneros vigilaban los hornos en las máquinas para maximizar su eficiencia. Su trabajo consistía en separar los carbones negros de los rojos para que ardieran de manera más uniforme. El trabajo requería mucha mano de obra y enseguida su labor fue sustituida por unas nuevas máquinas denominadas hornos «autoalimentados». Pero aún

quedaba mucho margen de mejora. Por más que los científicos se esforzaran en perfeccionarlos, los motores desperdiciaban la mayor parte de la energía que consumían. A mediados de siglo, la eficiencia de los motores se situaba en torno al dieciocho por ciento. La culpa era de la fricción, el ruido y el sobrecalentamiento. Pese a estas dificultades, los hermanos Thomson no cesaron en sus intentos de desarrollar máquinas que se acercaran lo máximo posible al ideal del movimiento perpetuo. James solía diseñarlas, mientras que William escribía los artículos científicos que explicaban la ciencia que las sustentaba, incluidos sus dos famosos ensayos sobre el demonio.

De adultos, los dos hermanos no solo estudiaron la rapidez con que las locomotoras consumían el carbón. También pensaron en el día en que el sol se quedara sin energía: «En cuanto al futuro, podemos afirmar con igual certeza que los habitantes de la Tierra no podrán seguir disfrutando de la luz y del calor esenciales para su vida durante muchos millones de años más, a menos que el gran almacén de la creación prepare fuentes de energía que ahora nos son desconocidas». Para ciudadanos victorianos como ellos, el modelo más apropiado para el universo ya no era el mecanismo de relojería de la era newtoniana, sino el de un motor de carbón. ¿Qué haríamos cuando su energía se agotara? Ya se debía de empezar a pensar en semejante apocalipsis.

MARAVILLOSA AGILIDAD

En esos tiempos, la ciencia se enfrentaba a otro problema que también dependía de la posible existencia del demonio de Maxwell. Las leyes de la mecánica eran perfectamente reversibles, pero muchas de las cosas que ocurrían en el mundo no. La dificultad de conciliar leyes reversibles con procesos irreversibles dejó pasmadas a algunas de las mentes más privilegiadas del siglo XIX. Maxwell ofreció una solución.

Según Tait, Maxwell demostró una forma de resolver tal acertijo; el único problema con su solución era que «requeriría la intervención de seres finitos, pero infinitamente más agudos y capaces que cualquier ser humano (o incluso que el máximo ideal que un ser humano puede concebir)» para manipular eficazmente las moléculas contra las fuerzas del equilibrio y la disipación. Tait

entendió que los «seres imaginarios» de Maxwell eran «pequeñas criaturas sin inercia, de aguzados sentidos y gran inteligencia, y con una agilidad maravillosa». Explicó que Thomson se refería a estos seres «provisionalmente» como demonios:

Si esos seres imaginarios, a los que sir W. Thomson llama provisionalmente demonios —pequeñas criaturas sin inercia, de aguzados sentidos y gran inteligencia, y con una agilidad maravillosa—, observaran las partículas de un gas contenidas en un recipiente con un tabique lleno de trampillas, también desprovistas de inercia; si se prepararan para abrir y cerrar esas compuertas de modo que las partículas más rápidas salieran del primer compartimento para llegar al segundo, y que un número igual de las más lentas escaparan del segundo compartimento para llegar al primero, podrían abstenerse de hacer ningún trabajo y, pese a ello, darían al sistema la capacidad de hacer una cierta cantidad de trabajo sin ayuda de cuerpos externos.

A pesar de la agilidad de esos demonios, Tait advirtió que sus poderes eran limitados. Por eso avisó a sus lectores:

«Hay que tener cuidado de no creer que se produce una ganancia o creación de energía, pues ni siquiera un demonio podría lograr eso; se produce una ganancia en su capacidad de transformación, un ligero aumento en la escala de disponibilidad... voilà tout».

Los casos más interesantes se encontraban en las muestras con unas pocas moléculas. Según Tait, esos casos demostraban que «la restauración de la energía tiene lugar constantemente, pero a una escala muy limitada, en cada masa de gas». De vez en cuando, podía aparecer una molécula rápida donde deberían dominar las lentas. No todas las partículas estaban perfectamente distribuidas: «En caso de que solo hubiera unos cientos de partículas en un pequeño recipiente de gas, lo más probable sería que, si lo cortáramos de repente por la mitad, detectáramos una diferencia considerable de temperatura entre ambas partes».

Esos casos permitían a Tait albergar la esperanza de aplicarlos a mayor escala, aunque el físico no era muy optimista ante la idea de fabricar un motor reversible

casi perfecto que apenas consumiera combustible. Según Tait, para nosotros era imposible: «Porque, ¡diantres!, no somos demonios (en el sentido de Maxwell)».

La reputación del demonio de Maxwell quedó sellada en una descripción bajo la entrada de «energía» en la novena edición de la Encyclopædia Britannica:

Clerk Maxwell concibió dos compartimentos, A y B, llenos de gas a la misma temperatura y separados por un tabique con varias trampillas, cada una de las cuales podía abrirse o cerrarse sin ningún gasto de energía. Una criatura inteligente o «demonio» con poderes ilimitados de visión se coloca a cargo de cada puerta.

La entrada acababa afirmando: «Con solo aplicar la inteligencia, una porción de gas de presión y temperatura uniformes puede dividirse en dos partes, en las que tanto la temperatura como la presión sean diferentes, y de las que, por lo tanto, pueda obtenerse trabajo a expensas del calor. [...] Tampoco parece haber límite a la medida en que puede llevarse a cabo esta operación». El autor advertía que estos logros aún no se habían realizado, ya que «el principio de la disipación de la energía solo controla las acciones de esos agentes cuyas facultades son demasiado toscas como para manipular esas porciones de materia», pero no descartaba que agentes menos «toscos» pudieran hacerlo en el futuro.

V

EL DEMONIO DEL AZAR

Los avances científicos condujeron a la revisión de los demonios de Laplace y Maxwell en el último cuarto del siglo xix. El 14 de agosto de 1872, el fisiólogo Emil du Bois-Reymond dio una conferencia titulada «De los límites de nuestra comprensión de la naturaleza» en la segunda reunión general de la Asamblea de Naturalistas y Médicos Alemanes en Leipzig. Lo que dijo ese día cambió la forma en que los científicos pensaban sobre el demonio de Laplace —sobre esa inteligencia absoluta que hemos visto que Darwin trasladó a la biología— y sobre los límites de la ciencia para los siguientes cien años. Tras publicarse, el texto tuvo una gran acogida, fue reimpresso y se tradujo a múltiples idiomas. En ella, Bois-Reymond se refirió al ser de Laplace como «Geist». En la traducción francesa se le llamó «profeta» y en la inglesa se tradujo como «mente» o «experto vidente». Bois-Reymond y otros empezaron a estudiar a fondo las elucubraciones del francés sobre una mente capaz de calcularlo todo. ¿Qué podía saber y qué no?

Muchos lectores de du Bois-Reymond se quedaron fascinados por el «Geist de Laplace» y ensalzaron sus talentos con coloridos ejemplos. «Nadie ha descrito con tan elegante insistencia la capacidad práctica de la fórmula de Laplace como nuestro gran fisiólogo berlinés Du Bois-Reymond», señaló el físico Walther Nernst. «Es obvio que la conclusión, no exenta de ironía, fue la siguiente: con un conocimiento preciso de la constitución de Goethe y de todas las influencias externas, ese espíritu [Geist] podía dictar literalmente el Fausto con ayuda de las leyes pertinentes de la naturaleza; y por supuesto no solo el Fausto impreso, sino también todos los borradores anteriores». El filósofo Ernst Cassirer fue otro de los muchos que plantearon la misma cuestión: «Emil du Bois-Reymond rescató la fórmula laplaciana [Weltformel] de su largo olvido y la colocó en el epicentro de la discusión epistemológica y científica».

La conferencia de Bois-Reymond sigue siendo una de las reflexiones más imponentes sobre los límites del conocimiento, y su éxito le valió un lugar entre

los científicos más influyentes del siglo XIX. Llegó a monopolizar los círculos intelectuales de Berlín y Potsdam, entre otros lugares. Según Bois-Reymond, los científicos que entendían el mundo como átomos en movimiento no debían temer las incertidumbres del azar: «Si supusiéramos que todos los cambios del mundo físico se deben a los movimientos atómicos, ley y azar serían solo nombres diferentes de la necesidad mecánica». Según este punto de vista, el azar era apenas el reflejo de algo aún desconocido, un incordio superable. ¿Qué tan difícil sería eliminar todas nuestras incógnitas para siempre? El fisiólogo se planteó si era posible. Se trataba de un «si» importante que había que dilucidar profundizando en los textos de Laplace, en sus matemáticas y en su filosofía.

Laplace se había mostrado efusivo respecto a nuestra capacidad para saberlo y calcularlo todo, pero Bois-Reymond terminó su intervención proclamando «¡Ignorabimus!»». Según el célebre conferenciante, la creación de Laplace era «muda» en un aspecto esencial. No era más que un experto mecánico, una calculadora abotargada que no sentía ni comprendía nada de lo que veía.

Eso no impidió a Bois-Reymond atribuir mucho a la mente laplaciana. Aplicando su «fórmula universal», era capaz de ver el pasado y el futuro. Podía resolver crímenes e incluso misterios históricos. Podía revelar la identidad del «hombre de la máscara de hierro», encarcelado en la Bastilla a finales del siglo xvii y cuya identidad seguía siendo un misterio. ¿De verdad podía ser el hermano ilegítimo de Luis XIV, como apuntaban los rumores? Según Bois-Reymond: «Así como en las ecuaciones lunares el astrónomo solo necesita dar un valor negativo al tiempo para determinar si el sol estaba eclipsado en el Pireo cuando Pericles se embarcaba hacia Epidauro, la mente concebida por Laplace podría aplicar convenientemente su fórmula universal para decirnos quién era el hombre de la máscara de hierro, o cómo se perdió el presidente».

Las tesis de Bois-Reymond sobre la previsibilidad se basaban en los célebres éxitos de la astronomía: «Igual que el astrónomo predice con años de antelación el día en que un cometa volverá a emerger de las profundidades del espacio para cruzar el cielo, esa mente podría determinar con sus ecuaciones el día en que la cruz griega brillará en la mezquita de Santa Sofía, o cuándo Inglaterra habrá agotado sus reservas de carbón».

El científico alemán alababa las técnicas matemáticas desarrolladas para el estudio de la distribución del calor y la energía, y admiraba la avispada técnica de emplear una t para el tiempo en las ecuaciones. Al parecer, esas innovaciones

permitirían a los científicos imaginar el principio y el fin de toda creación.

Si en su fórmula universal estableciese $t = -\infty$, podría descubrir la misteriosa condición primigenia de todas las cosas. [...] Supongamos que deja crecer t ad infinitum en sentido positivo; en dicho caso, sabría si el teorema de Carnot amenaza al universo con una inmovilidad congelada en un tiempo finito o solo infinito.

La mente descrita por Laplace había cobrado prácticamente vida. «Nos parecemos a esa mente en la medida en que la concebimos», insistía Bois-Reymond. La diferencia entre ella y las mentes reales era solo una cuestión de grado: «Podríamos preguntarnos incluso si una mente como la de Newton no difiere menos de la mente imaginada por Laplace que la mente de un australiano o de un salvaje fueguino difiere de la de Newton».

Pero había dos cosas que ni siquiera esa mente podría saber jamás: «Hay dos posiciones en las que incluso la mente imaginada por Laplace se esforzaría en vano por avanzar, y en las que estamos estancados». La mente de Laplace no podría desvelar nunca los misterios de la vida ni de la conciencia. Podría ver «dónde y con qué forma apareció la vida por primera vez: o bien en el fondo del mar profundo, como protoplasma Bathybius, o bien con la cooperación de los rayos solares ultravioletas, aún excesivos, y con una presión aún mayor de ácido carbónico en la atmósfera». Pero ¿qué sentido tendría ver esas transformaciones? «Con la ayuda de la fórmula universal, la mente de Laplace podría saber» dónde y cuándo surgió la vida. «Pues, cuando la materia inorgánica se fusiona para formar materia orgánica, solo es cuestión del movimiento, de la disposición de las moléculas en estados de equilibrio más o menos estable, y de un intercambio de materia producido, en parte, por la tensión de las moléculas y, en parte, por el movimiento del exterior». Todo esto se sabría.

Sin embargo, sería un «espectáculo mudo», dado que esa «mente» nunca podría adivinar lo que hizo que todas esas partes operaran de repente como un todo orgánico. Podrá ver átomos «cruzándose en su curso, pero no comprenderá su pantomima». De ahí que «el mundo de esa mente seguiría sin tener sentido». El ser de Laplace podría resolver un «problema mecánico extremadamente difícil»,

pero nunca resolvería el misterio de la vida y la conciencia.

En las primeras décadas del siglo XIX, la creación de Laplace se había convertido en un verdadero chivo expiatorio para destacados pensadores que sostenían que su conocimiento era inferior: un conocimiento del mundo predecible e inmutable, estéril a la hora de comprender transformaciones profundas de clase, y no solo de grado. El pedante sabelotodo surgido de la imaginación de Laplace podía ser un simple Fachidiot, un inepto total ante retos complejos.

UNA BURLA DE LA LEY ETERNA

El célebre físico y fisiólogo Hermann von Helmholtz era uno de los mejores amigos y colaboradores de Bois-Reymond. Entre sus muchos logros está la formulación de la ley de conservación de la energía, configurada en un artículo que se acabaría considerando clave para la termodinámica, además de sus trabajos en óptica, fisiología e incluso filosofía.

Unos meses después de la conferencia de Bois-Reymond, Helmholtz señaló que no podía quitarse de la cabeza un verso pegadizo de Goethe que aprendió de niño:

Llueve cuando llueve,

y a cántaros llueve;

y cuando ha llovido lo suficiente,

cesa de repente.

Cuando confesó que tenía esa rima de su niñez metida en la cabeza, Helmholtz ya tenía cincuenta y pico años: «Este Verslein lleva alojado en mi memoria desde tiempos inmemoriales, evidentemente porque toca un punto sensible en la conciencia de un físico y se burla de él». Helmholtz decidió plasmarlo en un lugar perfecto: un artículo sobre tornados y tormentas eléctricas.

Cuando se usaba la ciencia para examinar el clima, y ya no digamos predecirlo, las predicciones casi siempre fallaban. Para Helmholtz, era mucho más lógico preguntar a un granjero local sobre lo que presagiaban las nubes en el horizonte que consultar a un científico encerrado en su oscuro laboratorio con mapas, termómetros y demás instrumentos. El progreso científico en ese campo era dolorosamente lento «a pesar de todos los nuevos conocimientos adquiridos sobre el contexto de los fenómenos naturales, y a pesar de todas las estaciones meteorológicas nuevas y del sinfín de observaciones».

¿Por qué era tan difícil predecir el clima? En el cielo, donde reinaban las nubes tormentosas, Helmholtz no podía evitar ver la mano del «rebelde y absolutamente acientífico demonio del azar», Dämon des Zufalls. La especialidad de ese demonio era burlar el «imperio de la ley eterna». Helmholtz se preguntaba si algunos fenómenos naturales se resistirían siempre a los avances de la ciencia. En caso afirmativo, también cabía preguntarse por qué: «¿Podemos alegar razones por las que el demonio rebelde y absolutamente acientífico del azar sigue defendiendo ese feudo contra el imperio de la ley eterna, que es a la vez el dominio del entendimiento del pensamiento?».

¿Cuánto tiempo más podría mantener su reinado de terror, ese demonio del azar? Solo lo podría vencer «un espíritu que conociera con exactitud los hechos y que pensara con la rapidez y precisión suficientes para prever los acontecimientos». Ese Geist opositor «vería el poder armonioso de las leyes eternas en el capricho más salvaje del tiempo y, en igual medida, en el curso de las estrellas». Mientras Helmholtz y Bois-Reymond debatían sobre la fuerza de la criatura de Laplace en comparación con el demonio del azar, otros empezaron a analizar con más detenimiento las capacidades del demonio de Maxwell.

ESTADÍSTICA CONTRA DEMONOLOGÍA

Los demonios de Maxwell llegaron a Alemania bajo la denominación en plural Dämonen que se comparaban con el Geist de Laplace. Aparecieron en una breve reseña en una revista de investigación especializada. En ella se hablaba de Dämonen (demonios) con «la capacidad de apoderarse de cada molécula en cada momento».

A estos demonios les había costado viajar de Inglaterra al continente, y los científicos alemanes y franceses no los tenían en muy alta estima. En lugar de llevar a los científicos a aceptar la interpretación estadística de la termodinámica defendida por Maxwell y sus colegas más fieles, la mayoría de los científicos del Viejo Continente desestimaron su importancia por depender de estos marcos explicativos. Entre los científicos desconcertados por las demoníacas teorías británicas estaba Rudolf Clausius, uno de los fundadores de la termodinámica que hoy es reconocido por haber aclarado la relación entre las dos leyes de la termodinámica.

Clausius descubrió el demonio de Maxwell al leer la segunda edición del *Lectures on Some Recent Advances in Physical Science*, de Tait. Entre sus muchos logros, Clausius había introducido el concepto de la entropía en la ciencia, usando un término que acuñó a partir de las raíces griegas ἐν- (en) y -τροπή (transformación). Tenía motivos para preocuparse. El libro denunciaba que la teoría de Clausius no lograba explicar casos raros donde algo podía enfriarse más que su entorno en lugar de alcanzar el equilibrio. Casos así eran evidentes cuando intervenía el ser humano, por ejemplo, al cerrar las ventanas en un día caluroso para mantener el interior fresco. Además, con maniobras como estas, ciertos lugares podían mantenerse a una temperatura distinta durante un tiempo limitado pero significativo.

Según Tait, Clausius no había sabido cómo explicar esos casos aparentemente excepcionales. No había sido capaz de demostrar de manera convincente «que es posible, pero posible solo de una forma muy curiosa, y en un grado extremadamente limitado, salvar esta aparente dificultad: hacer que un cuerpo se enfríe más que los objetos a su alrededor y, por consiguiente, obtener trabajo de él». Esa dificultad por sí sola era «absolutamente fatal para el razonamiento de Clausius», por lo que invalidaba toda su contribución. Para Tait, el primero en señalar el problema había sido: «Clerk Maxwell, no hace mucho tiempo». Para resolverlo, demostró que «una forma de salvar el escollo requeriría la intervención de seres finitos, pero infinitamente más agudos y capaces que cualquier ser humano (o incluso que el máximo ideal que un ser humano puede

concebir)».

Los comentarios de Tait horrorizaron a Clausius. El alemán no solo criticó al científico escocés por tergiversar sus aportaciones, sino también por promover ideas muy equivocadas. Los dos rivales no tardaron en enzarzarse en un pulso para determinar quién había descubierto las leyes de la termodinámica. Clausius contraatacó en una sección titulada «Otra objeción de Tait», incorporada a la segunda edición de su libro. En ella, acusó a Maxwell y compañía de elaborar una teoría que funcionaba «solo con la ayuda de demonios». La superioridad de su obra era evidente en el hecho de que él no se ocupaba «de lo que el calor puede hacer con la ayuda de los demonios, sino de lo que puede hacer por sí mismo». Clausius criticó incluso la explicación de la naturaleza de Tait, pues afirmaba que «lo que los demonios podrían hacer a gran escala realmente sucede sin su contribución (aunque a muy pequeña escala) en cada masa de gas».

Al poco tiempo, el astrofísico y experto en ilusiones ópticas Johann Karl Friedrich Zöllner entró en el debate. Zöllner, que ocupaba la prestigiosa Cátedra de Astrofísica en Leipzig, recogió las objeciones de Clausius y las amplió en un artículo titulado «Los demonios de Thomson y los fantasmas de Platón» (la segunda parte del título aludía a la famosa alegoría de La República sobre los prisioneros de una caverna que interpretan erróneamente las sombras reflejadas en la pared como la realidad misma). El defensor de Clausius se erigió enseguida como enemigo de Tait. Tait tiró de ironía para comentar el texto de Zöllner en *Nature*: «Al parecer, ¡el profesor Zöllner piensa que Clerk Maxwell, Thomson y yo mismo creemos en la existencia de esos seres imaginarios (inventados por Maxwell y llamados “demonios” por Thomson)! Lo cierto es que se introdujeron con el único propósito de mostrar la verdadera razón por la que la comunidad de científicos físicos ha ratificado como un hecho probado la segunda ley de la termodinámica».

Zöllner era un blanco fácil. En un artículo publicado en el *Quarterly Journal of Science* en 1878, el astrofísico había indagado en la posible existencia de espacios cuatridimensionales y de seres que pudieran habitarlos: «Si entre nosotros hubiera seres capaces de producir a voluntad movimientos cuatridimensionales de sustancias materiales, podrían atar y desatar esos nudos con mucha más facilidad». En términos matemáticos, esto último era imposible para los seres tridimensionales. Para Zöllner, la ciencia no había descartado la existencia de esos seres, aunque advertía que: «No es en absoluto necesario —es más, ni siquiera es probable— que dichos seres tengan una conciencia

contemplativa de los actos de su voluntad».

Al margen de estas cavilaciones, la reputación de Zöllner se vio fatalmente comprometida cuando mordió el anzuelo de un médium: Henry Slade. En una velada espiritista con Slade, Zöllner se convenció de haber vislumbrado a esos seres. En sus descripciones de las sesiones espiritistas a las que asistió, Zöllner ofreció a sus lectores detalles tangibles de la extraña, repentina y misteriosa aparición de manos fantasmales que salían de la nada y podían anudar cuerdas conectadas por ambos cabos. Tait ridiculizó con fervor a Zöllner. Separó los demonios de Maxwell de los de Zöllner y Slade, que eran de dudosa reputación, y distinguió su investigación de la realizada en sesiones espiritistas destinadas a conectar con espíritus y otros habitantes del mundo sobrenatural. Sus ataques fueron tan certeros que la reputación del científico alemán y la del médium en quien tanto había confiado nunca se recuperaron. A medida que se exorcizaban los demonios de Zöllner, crecía la importancia de los de Maxwell.

Pese a las polémicas por el papel de los seres imaginarios en las explicaciones científicas, *Theory of Heat* de Maxwell hizo importantes incursiones en Alemania y el traductor de las conferencias de Thomson asumió pronto el reto de publicarla en alemán. La primera traducción salió en 1877 y fue seguida por otra al año siguiente.

Un joven físico llamado Max Planck leyó ambas versiones y expresó de inmediato su descontento con ese tipo de termodinámica, señalando el lugar exacto del libro donde Maxwell había invocado a su ser imaginario. El problema le animó a buscar otras explicaciones del calor que no se basaran en la termodinámica molecular. La alternativa que desarrolló, la mecánica cuántica, acabaría cambiando el curso de la física.

ETERNO RETORNO

A pesar de los intentos de los científicos británicos por llevarse el mérito de inventar la termodinámica, en el continente seguía habiendo resistencia a su doctrina particular. Al cabo de poco, los científicos austríacos oyeron hablar de otro demonio de tamaño molecular cuyo descubrimiento había precedido supuestamente al de Maxwell. Conocido como «el demonio de Loschmidt»,

también podía hacer que el mundo funcionara al revés. El físico austríaco Josef Loschmidt era conocido, entre muchas otras cosas, por haber determinado con gran exactitud el tamaño y la forma de las moléculas y por haber creado algunos de los modelos más útiles para ellas.

Loschmidt también calculó la probabilidad del eterno retorno. ¿Por casualidad un grupo de moléculas podía encontrarse en el mismo lugar exacto en el que ya había estado? Si terminaban en el mismo estado que antes, su organización en el instante siguiente sería exactamente igual, y en el siguiente también, y en el siguiente... La historia se repetiría. Siguiendo los pasos de Loschmidt, muchos científicos de toda Europa empezaron a calcular cuánto tiempo podría tardar en suceder algo así. Si «después de un tiempo τ lo suficientemente largo para obtener el estado estacionario, suponemos de repente que las velocidades de todos los átomos se invierten, se obtendría un estado inicial que parecería tener el mismo carácter que el estado estacionario». Y añadió: «El estado estacionario se deterioraría poco a poco y, con el paso del tiempo τ , volveríamos inevitablemente a nuestro estado original».

La conclusión era asombrosa: «Huelga decir que, en todo sistema arbitrario, el curso de los acontecimientos debe volverse retrógrado cuando se invierten las velocidades de todos sus elementos». ¿Cómo podría hacerse? Loschmidt señaló: «El problema relevante de deshacer lo ocurrido no se ha resuelto, pero se ha formulado con sencillez mediante la instrucción simple de invertir de repente las velocidades instantáneas de todos los átomos del universo».

Como tantos otros, el físico estaba fascinado por «el nimbo terrorífico de la segunda ley», que «la hace aparecer como un principio destructor de toda vida en el universo». Su fantasía era eludirla. Cada vez estaba más fascinado por una posibilidad rara pero real: una vez las moléculas alcanzaran el equilibrio, se podría realizar una ligera intervención para que el mundo funcionara al revés y todo volviera a empezar, solo que hacia atrás, antes de avanzar de nuevo. En los años siguientes aparecieron más libros de física (entre ellos el influyente *Elementary Principles of Statistical Mechanics* [Principios elementales de la mecánica estadística] (1902) de Josiah Willard Gibbs, profesor de física matemática en la Universidad Yale) para explicar cómo funcionaría el proceso y cuánto tiempo podría tardar en producirse de manera espontánea.

Las especulaciones y los cálculos de los científicos con respecto al eterno retorno tuvieron amplias implicaciones. El filósofo Friedrich Nietzsche valoró

precisamente esa posibilidad y preguntó a sus lectores:

¿Qué pasaría si un día o una noche un demonio te persiguiera en tu más solitaria soledad y te dijera: «Esta vida, tal como ahora la vives y la has vivido, tendrás que vivirla una y mil veces más; y no habrá nada nuevo en ella, sino que cada dolor, cada alegría y cada pensamiento y suspiro y todo lo indeciblemente pequeño o grande de tu vida tendrá que volver a ti, todo en la misma sucesión y secuencia. Volverá incluso esta araña y este claro de luna entre los árboles, e incluso este momento y yo mismo».

Si todos los seres del universo, incluidos los animados, estuvieran formados por los mismos elementos materiales que los que constituyen la arena y el polvo, esa pesadilla podría parecerse más a la realidad de lo que cabría imaginar: «¡El eterno reloj de arena de la existencia gira una y otra vez, y tú con él, polvo del polvo!».

En el mismo texto en el que especulaba sobre el eterno retorno, Nietzsche escribió algunas de las líneas más controvertidas del siglo. «Dios está muerto. Dios sigue muerto. Y nosotros lo hemos matado». Sus tesis sacaban a relucir las implicaciones extremas de otra especulación científica muy discutida y popular por aquella época: la posibilidad de viajar más rápido que el mensajero más veloz: «El rayo y el trueno requieren tiempo. La luz de las estrellas requiere tiempo; las obras, aunque se lleven a cabo, requieren tiempo para ser oídas». La extrema velocidad de la luz había fascinado a filósofos y científicos por igual durante siglos, pero el descubrimiento de que era medible, o quizás incluso franqueable, la había hecho aún más asombrosa.

Nietzsche imaginó que, en un rincón remoto del universo, alguien presenciaba la muerte de Dios, vivía para contarle y venía a la Tierra a dar la noticia. Para él, no cabía duda de que ese mensajero sería considerado un loco. Pero, si era juzgado con tanta severidad, quizás era solo por el desajuste entre la velocidad relativa del mensajero y la del propio hecho mientras ambos viajaban por el universo. Según Nietzsche, quizás el infeliz que anunciaba la portentosa noticia vería que nadie le creía y caería en la cuenta de algo: «He llegado demasiado pronto. Aún no ha llegado mi hora. Este tremendo acontecimiento está aún en camino, de

viaje; aún no ha llegado a oídos de los hombres».

En la época en que Nietzsche escribió estos aforismos, los físicos estaban obsesionados con realizar mediciones cada vez más precisas de la velocidad de la luz. Sus hallazgos dejaron huella en *Die fröhliche Wissenschaft*, traducida habitualmente como *La ciencia gozosa*, cuyo título se inspiró en las investigaciones punteras de su época.

TRANSFERENCIA DE CALOR

A pesar de las críticas suscitadas en el continente y en Estados Unidos, la fama del demonio de Maxwell se extendió enseguida por el mundo anglosajón. En esos años, el demonio de Maxwell empezó a utilizarse para explicar más efectos que parecían contradecir el orden habitual de las cosas. La ósmosis, la tracción del fluido en las plantas de la raíz a la copa y la «evaporación espontánea en la superficie de un líquido a un gas no saturado, como la atmósfera» se añadieron a la lista cada vez más larga de «acciones moleculares del “demonio clasificador”». El matemático y genetista Karl Pearson, protegido de Francis Galton, primo de Darwin, y uno de los estadísticos más destacados de su época, citó enteros varios párrafos destacados de *Theory of Heat* en uno de los libros científicos más leídos de su época, *The Grammar of Science* [La gramática de la ciencia]: «Este ser ha pasado a la fama como el demonio de Clerk Maxwell». Pearson subrayó una frase en la interminable descripción de Maxwell. En una nota al pie, señaló: «Clerk Maxwell supone los atributos del ser “esencialmente finitos, como los nuestros”». Pero como esa finitud era «una peculiaridad que no suele asociarse a los demonios», tal vez la criatura de Maxwell no necesitara definirse con una etiqueta tan controvertida. Era evidente que Pearson era muy escéptico con el uso del término, y dijo que el demonio poseía: «una facultad perceptiva que difiere de la nuestra más bien en grado que en calidad». Probablemente, la brecha entre su capacidad perceptiva y la nuestra era similar a la que existe entre nosotros y los demás animales, o entre el «hombre civilizado» y los «salvajes» y los niños: «El demonio de Clerk Maxwell percibiría la naturaleza como algo totalmente diferente a nuestra naturaleza. En menor medida, es muy probable que eso sea cierto para el mundo animal, e incluso para el hombre en diferentes etapas de crecimiento y civilización». Como Pearson

dijo en su conclusión: «Los mundos del niño y del salvaje difieren ampliamente de los del hombre civilizado normal». La diferencia en la capacidad perceptiva del «hombre civilizado normal» y la del demonio de Maxwell podría entenderse en términos similares.

El escritor estadounidense Henry Adams nunca se recuperó del todo de la impresión que le causó *The Grammar of Science* de Pearson. La obra le motivó a pensar en la historia en términos de entropía y termodinámica, y en su economía como un sistema «en el que solo el demonio del pensamiento de Clerk Maxwell podía crear valor». La perspectiva de Adams sobre esa criatura estuvo marcada por su experiencia como embajador del presidente Abraham Lincoln en el Reino Unido, donde empezó a considerar las acciones del demonio de Maxwell en clave geopolítica. En su correspondencia, Adams señaló: «Alemania es y ha sido siempre un ejemplo notablemente apto de la concepción de Maxwell de los “demonios clasificadores”. Tras los golpes que se da con todos sus vecinos y que recibe de ellos, acaba obteniendo y proporcionando un movimiento común». Durante aquellos años, el recuerdo de la derrota de Francia a manos de Alemania durante la guerra franco-prusiana estaba más vivo que nunca. Ambos países seguían armándose alimentados por su sed de venganza, y no querían arriesgarse a sufrir una humillante derrota. Durante un viaje a Francia, Adams «devoró» *La ciencia y la hipótesis* (1902) del físico francés Henri Poincaré, que le aportó muchos más detalles sobre el demonio de Maxwell. Inmediatamente empezó a pensar en cómo esa criatura podría servir a su país. En 1903, pocos años después de que el presidente William McKinley fuera asesinado y Theodore Roosevelt asumiera la presidencia, Adams escribió con ironía a su hermano Brooks: «El demonio de Clerk Maxwell que rige la segunda ley de la termodinámica debería ser nombrado presidente».

CON O SIN SU AYUDA

Tras la muerte de Loschmidt en el verano de 1895, los demonios volvieron a ser el centro de atención. Ludwig Boltzmann, a quien hoy conocemos sobre todo por la famosa fórmula de la entropía que lleva su nombre ($S = k \log W$), fue uno de los más íntimos amigos y colaboradores de Loschmidt. Boltzmann se empeñó en proseguir el programa de Loschmidt. Gracias a él, la termodinámica estadística y

la visión molecular de la naturaleza de Loschmidt siguen vivas todavía. Y fue él quien evitó que los investigadores alemanes que rechazaban esas explicaciones hirieran de muerte al demonio de Maxwell.

Boltzmann dio una filiación, parentesco e interpretación diferente al demonio asociado con Maxwell. Según él, la idea había nacido en Austria. Durante un discurso en memoria de su colega recién fallecido, Boltzmann afirmó que Loschmidt había sido el primero en «inventar un pequeño ser inteligente capaz de ver las moléculas de gas sueltas y, mediante cierto tipo de artificio, separar las lentas de las rápidas». Esa criatura imaginaria «solo se había mencionado de paso en unas pocas líneas de un artículo, pero más tarde se insertó en la teoría del calor de Maxwell y fue objeto de mucho debate». Poco le importaba a Boltzmann que Loschmidt no hubiera utilizado esa palabra. Loschmidt había ayudado al físico a pulir su trabajo imaginando algunas de las conclusiones más aterradoras derivadas de la «paradoja de la reversibilidad»; a su vez, Boltzmann había ofrecido una solución a la paradoja desarrollando su famosa fórmula que demostraba que los movimientos moleculares podían ser reversibles a nivel atómico, pero raramente en conjunto.

En términos científicos, ¿qué importancia tenían casos que casi nunca sucedían? Si las leyes de la física tenían salvedades, ¿no sería mejor descartarlas? La alternativa «energética» de Wilhelm Ostwald y la investigación sobre la radiación térmica, como la de Eddy y más tarde la de Planck, competían fuertemente contra las teorías de Boltzmann. El austríaco no iba a permitir que unas pocas excepciones arruinaran una teoría tan prometedora y completa como la suya. Boltzmann respondió a las críticas justificando claramente por qué los sucesos raros, cualquiera que fuera su origen, no eran suficientes para descartar las leyes estadísticas de la termodinámica molecular. Así como las compañías de seguros sobrevivían y sacaban beneficios pese a algunos casos impredecibles, ¿por qué deberían preocuparse los científicos?

El hecho de que fueran raros era razón suficiente para dejarlos fuera de la contabilidad general del universo. Según Boltzmann: «Se puede admitir que eso equivale prácticamente a nunca si se recuerda que, según las leyes de la probabilidad, en este lapso de tiempo habrá habido muchos años en los que todos los habitantes de un gran país se habrán suicidado, puramente por accidente, el mismo día, o todos los edificios se habrán incendiado al mismo tiempo; sin embargo, las compañías de seguros se las arreglan bastante bien ignorando la posibilidad de esos sucesos». Con Boltzmann, el demonio del azar salió

debilitado, pero no acabado.

Albert Einstein devoró las investigaciones de Boltzmann mientras preparaba sus propias y famosas contribuciones a la ciencia. A su novia de entonces le escribió: «Ese Boltzmann es magnífico. Estoy a punto de terminarlo. Es un expositor magistral y estoy firmemente convencido de que sus principios teóricos son correctos». Desde joven, se esforzó mucho por perfeccionar las teorías moleculares en las que se basaba la investigación de Boltzmann. Todavía no tenía forma de saber que, en pocas décadas, sus colegas desarrollarían una nueva manera de interpretar el mundo atómico que los llevaría a nombrar a un nuevo demonio, el de Einstein.

VI

LOS DEMONIOS

EN EL MOVIMIENTO ALEATORIO

Ciertas micropartículas y microgotas permanecen suspendidas en el aire durante largos periodos de tiempo, aparentemente desafiando las leyes de la gravedad. Cuando un rayo de luz entra en una habitación oscura, a veces se pueden ver estas diminutas partículas en el aire, danzando en todas direcciones. ¿Por qué se mueven así? ¿Quizás la criatura de Maxwell las empuja de aquí para allá? ¿O las provoca otro demonio?

No solo a veces podemos ver partículas de polvo volar mágicamente sin asentarse, también sabemos que los virus y bacterias se propagan en el aire transmitiendo enfermedades contagiosas a distancia. ¿Cómo es posible? Cuando los científicos observaron esas partículas a través de sus microscopios, algunos pensaron que podían estar viendo, efectivamente, al demonio en acción. A principios del siglo XX, muchos científicos empezaron a considerar la posibilidad de que ese demonio fuera real en algún sentido, que se le pudiera sacar partido y que pudiera haber otros como él.

¿Qué impide que esas partículas desciendan? Cuando una pelota rueda por un camino, la fricción la ralentiza hasta que se detiene por completo. Va perdiendo impulso y velocidad poco a poco hasta quedarse quieta. Pero las partículas que miden alrededor de una milésima de milímetro pueden flotar en el aire y en la superficie de los líquidos y desafiar esas limitaciones. Su extraño movimiento recibió finalmente el nombre «movimiento browniano», después de que el botánico escocés Robert Brown llamara la atención sobre ellas. Daba la impresión de que las impulsaba algo, o alguien. ¿Podría aprovecharse su energía para hacer funcionar motores o incluso ordenadores?

Fascinado por estas partículas, Albert Einstein las estudió para comprender mejor el movimiento de las moléculas y la naturaleza del calor. Sus

investigaciones dieron respuesta a muchas preguntas, pero también crearon nuevos enigmas sobre el origen de la vida, el comportamiento de los sistemas caóticos, la naturaleza de la inteligencia y los efectos de nuestra conciencia en el universo.

El joven Albert Einstein no era muy partidario de atribuir a los demonios el movimiento de esas micropartículas flotantes de movimiento tan extraño, ni de ninguna otra cosa del universo. Decidió buscar respuestas en otra parte. Su primer trabajo de investigación sobre este tema, «Sobre el movimiento de pequeñas partículas suspendidas en líquidos estacionarios», apareció en la prestigiosa revista *Annalen der Physik* en 1905. Fue uno de los cuatro grandes artículos de Einstein que se publicaron ese año (ahora conocido como su *annus mirabilis*) y que cambiaron el curso de la historia. Los cuatro artículos revolucionarios abordaron temas que hasta entonces se habían tratado con ayuda de los demonios. Pero, a diferencia de sus colegas, Einstein rechazó esa terminología. Con ello demostró que lo que se había explicado con los demonios podía explicarse simplemente con las nuevas teorías físicas que estaba desarrollando.

Al cabo de muchos años, el presentador del Premio Nobel de Einstein recalcó: «Durante la primera década de este siglo, el movimiento browniano estimuló el más vivo interés». La contribución de Einstein había sido «fundar una teoría cinética para explicar este movimiento, mediante la cual dedujo las principales propiedades de las suspensiones, es decir, de los líquidos con partículas sólidas suspendidas en ellos». El colega y amigo de Einstein, Max Born, resumió el trabajo del genio tachándolo de clave para fundar las teorías atomísticas más generales: «Esas investigaciones de Einstein han hecho más que cualquier otro empeño para convencer a los físicos de la existencia de los átomos y las moléculas». El propio Einstein estaba encantado con su logro. Born, a quien ahora recordamos por sus contribuciones a la mecánica cuántica, también felicitó a su amigo por mostrar «la parte fundamental de la probabilidad en las leyes naturales». De ese logro, Einstein no se mostró tan orgulloso, pues había una interpretación de la naturaleza asociada durante mucho tiempo al demonio del azar.

Los historiadores suelen atribuir las primeras descripciones de esas partículas animadas a Lucrecio, que en su poema *De Rerum Natura* del siglo I a. C. describió las partículas de polvo que podían verse flotando en el aire cuando los rayos de sol entraban en un edificio. Otros observadores, como Robert Brown,

pusieron su atención en el polen que flotaba en los charcos de agua de lluvia. Estos investigadores pensaron que las partículas podían estar en movimiento porque eran organismos en miniatura, animálculos vivos que se agitaban, bailaban y zigzagueaban. Para poner a prueba su hipótesis, los investigadores hicieron un experimento: cambiaron el polen por polvo. Las partículas de polvo también se movían. Luego las metieron en un frasco para ver cuánto duraba el movimiento y, al cabo de un año, se asombraron al comprobar que las partículas seguían moviéndose como el primer día.

Al principio fue difícil reconocer la importancia del trabajo de Einstein sobre las «pequeñas partículas suspendidas en líquidos estacionarios» en parte porque el alemán había llegado tarde al tema. El matemático y polímata francés Henri Poincaré llevaba más de una década obsesionado con esas partículas vinculándolas al demonio de Maxwell. El joven investigador intentaba colarse en los planes de investigación de alguien mucho más reconocido y mayor que él. Einstein leyó la investigación de Poincaré sobre el movimiento browniano casi inmediatamente después de que se publicara. Tardó más de tres años en publicar algo propio.

EINSTEIN, POINCARÉ Y SU DISPUTA

SOBRE DOS DEMONIOS

Poincaré hoy es recordado por ser uno de los científicos que anticipó muchas de las ideas principales de la teoría de la relatividad, pero, al contrario de Einstein, no las consideró de tal importancia. Muchos de los historiadores pintan al francés como un erudito retrógrado que no pudo ver las implicaciones revolucionarias de las investigaciones que él mismo inició, pero la relación entre Poincaré y Einstein es mucho más compleja. El foco de su disputa yacía no en los resultados actuales de la ciencia, sino en la posibilidad de llegar a futuros descubrimientos. En particular, Poincaré y Einstein diferían en la posible existencia de dos demonios, uno el de Maxwell, y otro «su colega», un ser que podía viajar más rápido que la velocidad de la luz.

Durante sus vidas, Poincaré y Einstein mantuvieron una relación distante y complicada. El pedigrí distinguido del francés contrastaba con la del rebelde

proveniente de una familia judía alemana que se encontraba en apuros económicos. Poincaré era burgués y católico, un destacado miembro de la clase política y científica de la Tercera República. Contaba entre sus primos con un primer ministro y un presidente de Francia y, a una edad temprana, se había ganado la reputación de ser un «monstruo de las matemáticas». Además, era veinticinco años mayor que Einstein. A Einstein no se le daban muy bien las matemáticas, y, al no poder conseguir un puesto académico después de obtener su doctorado, de joven se conformó con ser un empleado de patentes de segunda clase.

A Poincaré le fascinaba el movimiento browniano. Le intrigaban especialmente las afirmaciones de un científico que creía haber vislumbrado el vaivén de las diminutas partículas microscópicas del demonio de Maxwell suspendidas en líquidos. El físico que presenció ese espectáculo fue Louis Georges Gouy. En 1888, Gouy informó a las autoridades científicas de lo que había visto y poco después empezaron a llegar informes de más testigos. Científicos de toda Europa empezaron a visitar los archivos y a releer los anales de la ciencia en busca de pruebas que lo corroboraran.

En *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, Gouy expuso casi todo lo que se sabía hasta el momento del movimiento browniano. Dijo que lo que había visto era de sobra conocido por los microscopistas, pero que aún no había captado «la atención de los físicos». Claramente cautivado, escribió que era: «Una visión de lo más increíble, una especie de enjambre o trepidación general. Cada partícula parece moverse independientemente de sus vecinas». Parecían moverse «en cualquier dirección». A veces, una partícula giraba «sobre sí misma de forma irregular». Y cuanto más pequeñas eran, más rápido se movían. Cuando su tamaño se reducía a una milésima de milímetro, eran tan rápidas que apenas se percibía su movimiento.

Gouy dejó lo mejor para el final. ¿Y si pudieran explotarse estas partículas para hacer funcionar molinos de viento en miniatura? En el último párrafo de su artículo, especuló con la posibilidad de que esas observaciones condujeran a la creación de una máquina de movimiento perpetuo: «Podemos recuperar el trabajo [...] en contra del principio de Carnot». Era «obvio que el trabajo se gasta» y que «se podría concebir un mecanismo para aprovechar una parte de ese trabajo». A partir de ese momento, estas pequeñas partículas adquirieron la dudosa reputación de ser minúsculas infractoras de la segunda ley de la termodinámica. Sobre todo, las investigaciones de Gouy causaron sensación

porque contradecían una de las máximas más sólidas de la ciencia. Desde las primeras décadas del siglo, los científicos habían denunciado elocuentemente la locura y la insensatez de creer en las máquinas de movimiento perpetuo. Pero Gouy afirmaba que se podían encontrar en un mundo de «dimensiones comparables a una micra».

Los estudios sobre las teorías moleculares del calor, el movimiento browniano y el demonio de Maxwell podrían ampliar nuestra comprensión de los componentes básicos de nuestro universo, pero también podrían ser útiles para explorar la posibilidad de aprovechar su energía, combatir la entropía y la decadencia, y detener o invertir el tiempo. Con un diminuto molino de viento sin fricción ni reposo, se resolverían los problemas energéticos del mundo; quizás incluso los de todo el sistema solar. ¡Quién no soñaría con ampliar de escala este pulgarcito de la energía! El sueño de encontrar motores u ordenadores brownianos sigue cautivando a los científicos de hoy.

Pero ¿se podía fabricar realmente el molino en miniatura de Gouy? Gouy nos instaba a imaginar lo que ocurriría si uniéramos una rueda de trinquete muy ligera a la partícula utilizando un hilo muy fino: «La rueda giraría y podríamos recuperar el trabajo». Por mucho que lo intentara, «no veía ninguna razón teórica para que no funcionara». El científico admitía humildemente que sus especulaciones seguían siendo «irrealizables, por supuesto», al menos por aquel entonces. Eso sí, su razonamiento teórico era sólido. Como si resolver el sueño de «producir» trabajo «a partir del calor ambiente» en «contra del principio de Carnot» no fuera lo bastante emocionante, Gouy remataba su artículo con otra especulación trascendental: los «tejidos vivos» podrían funcionar del mismo modo.

Antes de las investigaciones de Gouy, habían llegado las del economista británico William Stanley Jevons. Cuando observó las partículas en el vino de Oporto, Jevons vislumbró la codiciada piedra filosofal: «Este experimento no me deja ninguna duda de que el sedimento del vino de Oporto está en un estado de movimiento perpetuo, hasta que finalmente se asienta y se adhiere al vaso». ¿Cuánto tardaba en acabarse tal fuerza motriz? «Es natural preguntarse cuánto durará el movimiento pedético. ¿Se agota enseguida? Es maravilloso el grado en que los experimentos que he realizado llevan a la conclusión contraria». Al mezclar caolín y agua, el movimiento parecía incluso aumentar después de permanecer intacto durante años: «Así, después de un ensayo de ocho o nueve años de duración, nos encontramos ante el prodigio de que el poder suspensorio

y el movimiento pedético aumentaban aparentemente con el tiempo». El efecto era tan ostensible que Jevons concluyó: «Lo cierto es que este movimiento pedético parece la mejor aproximación descubierta hasta ahora a un movimiento perpetuo».

¿Qué las movía? Había que descubrir la «fuente continua de energía para explicar el fenómeno». Los investigadores no parecían aburrirse. Un microscopista británico las estudió «a intervalos durante treinta años». El propio Jevons realizó «casi ochocientas» observaciones que registró con esmero. Probaban casi cualquier polvo fino que caía en sus manos, desde minerales a vegetales, y estudiaron los efectos de la luz y el calor sobre ellos. Jevons describió con pelos y señales cómo lograr el espectáculo en cuestión: «Tomando una gota de tinta común antigua que haya estado expuesta al aire durante varias semanas y examinándola bajo un cristal fino con un poder de aumento de quinientos o mil diámetros». Jevons llegó a la conclusión de que el movimiento no podía deberse a ningún agente químico específico: «El fenómeno aparece con sustancias de las más variopintas características químicas, y es difícil establecer diferencias claras en la actividad del movimiento en función de la naturaleza química».

EL ADUANERO DEL UNIVERSO

Las investigaciones sobre el movimiento browniano no tardaron en cruzarse con las del demonio de Maxwell. Poincaré compartió sus reflexiones sobre el demonio de Maxwell en un artículo publicado en el primer volumen de *Revue de métaphysique et de morale* en 1893. En sus primeras investigaciones sobre el tema ya sacaba conclusiones de esa criatura que atemperaban su aceptación de la concepción totalmente «mecanicista del universo» que, según él, había «seducido a tantos hombres de bien». Él no era uno de ellos.

Poincaré señaló que el demonio nació de los intentos por explicar efectos irreversibles a partir de las leyes reversibles: «Para comprenderlos mejor, Maxwell introduce la ficción de un “demonio” cuyos ojos son lo bastante sutiles para distinguir las moléculas y cuyas manos son lo bastante pequeñas y rápidas para agarrarlas». Poincaré también explicó lo que esa criatura podría hacer: «Si

hay que creer a los defensores de un enfoque mecánico [les mécanistes], un demonio así no tendría ninguna dificultad en pasar el calor de un cuerpo frío a otro caliente».

A continuación, abordó la diferencia entre los efectos reversibles y los irreversibles pidiendo a los lectores que consideraran lo que ocurría cuando se mezclaba un grano de cebada con cien litros de trigo. El grano se perdía en el trigo y resultaba «casi imposible volver a encontrarlo». Esa acción era irreversible en la práctica, pero no en la teoría. Los defensores del demonio de Maxwell lo utilizaron para explicar por qué a nivel molecular las acciones eran reversibles, pero a nuestro nivel no. Según Poincaré: «Maxwell invirtió un gran esfuerzo e ingenio en triunfar, pero no estoy tan seguro de que lo haya logrado», y acabó valorando negativamente las aportaciones del escocés.

A Poincaré, al igual que al sinfín de investigadores que empezaban a analizar estos temas, le preocupaba que se utilizaran explicaciones estadísticas para descartar ciertos efectos. Algunos científicos se contentaban con la explicación simple: las probabilidades de que los efectos se invirtieran a escalas macroscópicas eran bajas, mientras que a escalas microscópicas eran altas. Sin embargo, Poincaré recordó a sus lectores y colegas que, incluso cuando había pocas probabilidades de algo, si se esperaba el tiempo suficiente, era probable que sucediera. Con un tiempo infinito, tenían que ocurrir. Esto era cierto cuando se trataba de la transmisión y disipación del calor: «Según esta teoría, para ver pasar el calor de un cuerpo frío a otro caliente, no será necesario tener la aguzada visión, inteligencia y destreza del demonio de Maxwell; bastará con algo de paciencia».

En la irónica formulación de Poincaré, «algo de paciencia» podía equivaler a muchos órdenes de magnitud más que la presunta edad del universo. Aunque algunos científicos veían justificado descartar los efectos menos probables cuando pensaban en el universo en su conjunto —desde sus humildes comienzos hasta su trascendental final—, otros, como Poincaré, creían estar obligados a tener en cuenta esos efectos. De lo contrario, se arriesgaban a perderse la historia completa del cosmos.

Para Poincaré, las teorías cinéticas británicas tenían extrañas implicaciones, y el francés disfrutaba describiéndoselas al público general. Una de ellas era que, en un universo acotado, y considerando el tumultuoso movimiento de las moléculas del mismo, llegaría un momento en el que todas las moléculas acabarían

necesariamente por serendipia en el estado que habían detentado en un momento anterior. De ocurrir tal cosa, todo volvería a suceder igual que antes: cada estado anterior del universo se repetiría idénticamente, con lo que crearía un estado de retorno sin fin. Sí, según el matemático, lo más probable es que ese extraño suceso tardara «muchísimo tiempo» en producirse, pero, si se siguieran las actuales teorías moleculares de la ciencia hasta sus conclusiones lógicas, seguramente tendría lugar en algún momento: «Por consiguiente, ese estado no sería la muerte definitiva del universo, sino una especie de sueño del que despertaría al cabo de millones y millones de siglos».

Poincaré esperaba que los astrónomos no tuvieran que esperar mucho para presenciar ese espectáculo: «Uno quisiera poder detenerse en este punto y esperar que algún día el telescopio nos muestre un mundo en proceso de despertar, en el que las leyes de la termodinámica estén invertidas». Más adelante, la extraña posibilidad del eterno retorno (recurrencia) detallada por Poincaré se relacionó con dos demonios: el demonio de Loschmidt y el demonio de Zermelo, este último en referencia a la obra del lógico alemán Ernst Zermelo.

En el año 1900, Poincaré dio un giro de ciento ochenta grados al destino del demonio de Maxwell. Lo encontró escondido en el lugar más insospechado: ante sus narices. Asombrado, levantó la cabeza de un microscopio con el que estaba observando partículas brownianas en movimiento y anotó: «Uno pensaría que está viendo trabajar al demonio de Maxwell». Después de él, muchos otros científicos empezaron a ver estas fuerzas demoníacas. Lo que veían era de lo más impactante.

El francés presentó sus ideas sobre el demonio de Maxwell y el movimiento browniano al público en el Congreso Internacional de Física de 1900. Entre los presentes estaban William Thomson, ya nombrado lord Kelvin, y Gouy. Ante ellos, Poincaré proclamó: «Hablemos de las ideas originales de monsieur Gouy sobre el movimiento browniano. Según ese científico, este singular movimiento debería infringir el principio de Carnot». Su presentación elevó de inmediato el perfil de Gouy y el del movimiento browniano en general. Estas investigaciones iban mucho más allá del movimiento de partículas pequeñísimas. Poincaré explicó que su interés por el demonio se había despertado ante todo por la «paradoja de la reversibilidad», surgida al utilizar leyes mecánicas perfectamente reversibles para explicar un mundo macroscópico que, evidentemente, no era reversible: «Todo parece avanzar en una dirección, sin esperanza de recurrencia».

Los físicos moleculares no sabían explicar los fenómenos irreversibles «tan rebeldes» que caracterizaban casi toda la experiencia humana y que les habían llevado a «suponer que la irreversibilidad era solo aparente». A escala macroscópica, el exceso de partículas hacía que nuestros «ojos burdos» vieran un mundo tendente a la uniformidad. Pero el demonio de Maxwell vivía cómodamente en medio de átomos y partículas hiperfinas y percibía el mundo de otra manera con sus sentidos ultrasensibles. El científico francés añadió otra capacidad a esa improbable criatura, además de las ya señaladas por Gouy: podía invertir la dirección del tiempo: «Solo un ser de sentidos infinitamente sutiles como el demonio imaginario de Maxwell podría desenredar esta madeja y hacer que el universo corriera en sentido inverso».

A medida que la termodinámica fue ganando aceptación, aumentó el número de oyentes que iban a escuchar a los científicos disertar sobre el tema. Los demonios empezaron a viajar de las conferencias científicas internacionales a las ferias mundiales. En la Exposición Universal de St. Louis, Missouri, de 1904, el público se congregó para escuchar la charla magistral de Poincaré, en la que subrayó la importancia del demonio de Maxwell y del movimiento browniano para la física. Su célebre conferencia fue traducida, publicada y reeditada en numerosas ocasiones. Según Poincaré, con el movimiento browniano las especulaciones originales de Maxwell habían abandonado el ámbito de la teoría pura y adquirido una renovada urgencia. Hasta entonces, todas las objeciones a la segunda ley de la termodinámica «seguían siendo teóricas y no eran muy inquietantes». Pero, una vez que el movimiento browniano entró en escena, esa escena cambió. Como dijo Poincaré: «Para ver el mundo volver hacia atrás, ya no necesitamos el ojo infinitamente sutil del demonio de Maxwell; nos basta con el microscopio».

Sublimes cisnes negros, tréboles de cuatro hojas... Hacemos bien en descartar como inconsecuentes la mayoría de los sucesos raros porque sabemos lo infrecuentes que son, pero hay algunos que no son tan fáciles de descartar. Pongamos como ejemplo cuando los tríos de ases y los dobles ceros aparecen en la mano del crupier o en la mesa de la ruleta. En el lugar indicado y con el catalizador adecuado, esos sucesos raros que, con razón, ignoramos en la mayoría de los contextos pueden llegar a ser explosivos. Casi todo es posible con el lubricante perfecto: el más mínimo empujón basta para que algo siga y siga. Con una ligerísima pluma, el punto de equilibrio perfecto se puede inclinar y desencadenar una pandemia, una avalancha, un terremoto o un tsunami. Para los demonios que solo pueden actuar en contadas ocasiones, el contexto es crucial.

En ciertos casos, pueden cambiar drásticamente el destino y causar circunstancias felices o desastres impredecibles.

Poincaré fue de los que nunca descartó la ínfima posibilidad de que los actos del demonio de Maxwell fueran consecuentes. En el momento y el lugar adecuados, ciertos cambios minúsculos podían actuar o combinarse para provocar efectos exponenciales. La evolución del universo, la naturaleza de las nebulosas y el sorteamiento de la muerte térmica del universo dependían de lo que pudieran hacer los demonios de Maxwell. Si el universo era finito, no podían hacer mucho. Si era infinito, podían hacer mucho más. Según Poincaré: «Nuestros pequeños demonios acumularán a la derecha todas las moléculas rápidas y a la izquierda, todas las lentas». Podrían separar un gas que estuviera a una misma temperatura en «dos partes con temperaturas diferentes». El resultado sería asombroso: «Darían la vuelta al principio de Carnot». Poincaré relató los trabajos de los astrónomos que ya habían encontrado pruebas de esos petits demons en el universo y que «creían haber encontrado un mecanismo análogo producido de forma natural» en las franjas más externas de las atmósferas planetarias y en las nebulosas. Tras observar los actos del demonio con su microscopio y suponer que también debía de estar operando en otras zonas del universo, Poincaré elevó el demonio de Maxwell a la categoría oficial de «aduanero» del universo. Era el ser que acababa determinando dónde podían reunirse, mezclarse y acumularse las moléculas en el espacio.

EL CATALIZADOR Y EL GATILLO

Hoy conocemos al científico e ingeniero Alan Archibald Campbell-Swinton por haber trazado el primer modelo teórico de la televisión, pero también fue uno de los científicos que quedaron encandilados por las cualidades del movimiento browniano para retardar la entropía. En su discurso presidencial ante la Röntgen Society en 1911, titulado «Sobre el progreso y las perspectivas de la ciencia», explicó que, gracias al movimiento browniano, pronto tendríamos «de los medios para producir el movimiento perpetuo soñado por los filósofos medievales». Dando rienda suelta al optimismo ante lo que podía aportar la investigación de esas cuestiones, Campbell-Swinton destacó el movimiento browniano como una de las disciplinas más interesantes de la nueva década:

«Simple y llanamente, los movimientos moleculares desordenados que nos indica el movimiento browniano (movimientos que constituyen el calor) serían dirigidos durante un tiempo de la manera particular necesaria para aportarnos el poder que requerimos». Y concluyó: «Así, por fin lograríamos la lámpara de llama perpetua que aparece en los libros de cuentos, esa que no consume aceite; el fuego perpetuo de la zarza ardiente que no requiere combustible».

¿Cómo le fue al demonio de Laplace con esas nuevas investigaciones? El filósofo Wildon Carr citó el «conocido pasaje» en el que Laplace había imaginado «un calculador ideal que conocería a fondo el estado del universo en cualquier momento futuro». Para esos pensadores, el futuro solo se podía predecir si el mundo era predecible, así que Laplace quedaba reducido a un mero calculador, algo así como un autómatas, y nada más que eso. Sin embargo, para la mayoría estaba claro que no era así. «Para poder predecirlo, el mundo debe verse como algo uniforme, sujeto a la ley natural». Carr comparó a ese «calculador imaginario», desprovisto de toda comprensión real, con alguien que permaneciera «sordo como una tapia» en un «mundo sonoro».

Así como las acciones de Laplace seguían reglas y eran predecibles, las operaciones improvisadas de Maxwell parecían potencialmente más pertinentes debido a su puro valor para sorprender. Poco importaba que esas operaciones fueran pequeñas. Carr describió los efectos del demonio de Maxwell como una chispa que detonaba una pila de explosivos o un gatillo sensible que, al pulsarse, activaba un obturador ultrarrápido y lo atrapaba todo y a todos por sorpresa. Como explicó, «los ejemplos consabidos del gatillo, o de la chispa eléctrica que hace explotar la mezcla en el cilindro» eran similares a «la idea de un demonio de Maxwell que cronometra la apertura y el cierre de un obturador sin fricción».

Los científicos habían determinado que el demonio de Maxwell solo podía funcionar en un mundo realmente diminuto o en casos muy raros. Pero no lo habían eliminado del todo. Los efectos puntuales de una sola molécula que se moviera en una dirección inesperada podían ser mayores que el movimiento regular del resto.

PASEOS ALEATORIOS

El tema del movimiento browniano era muy competido cuando llegó Einstein. En su primer artículo de 1905, el genio alemán repitió algunas de las conclusiones a las que ya habían llegado otros científicos: «Si realmente es posible observar el movimiento del que hablaremos aquí, y teniendo en cuenta las leyes que se espera que obedezca, entonces la termodinámica clásica ya no puede considerarse cien por cien válida ni siquiera para espacios microscópicamente distinguibles». Pero, a diferencia de los maxwellianos y de Poincaré, Einstein intentó explicar esa anomalía sin recurrir a los demonios. En su opinión, las fuerzas moleculares subyacentes eran las únicas responsables de impulsar esas partículas de un lado a otro.

El año en que Einstein publicó sus estudios sobre el movimiento browniano, el estadístico Karl Pearson publicó una duda en la revista Nature. Estaba buscando una solución a un difícil problema matemático: el del «paseo aleatorio». Si «un hombre parte de un punto 0 y camina x metros en línea recta, luego gira en cualquier ángulo y camina otros x metros en una segunda línea recta, repitiendo el proceso n veces», ¿dónde es más probable que acabe? ¿Dónde debería ir un equipo de rescate a buscar a un vagabundo sin rumbo? Cuando n era grande en comparación con x, la respuesta era clara: «A campo abierto, el lugar más probable para encontrar a un borracho capaz de mantenerse en pie es cerca de su punto de partida». Cuando n era pequeño respecto a x, el hombre ebrio era mucho más difícil de encontrar. El ejemplo de Pearson del «paseo aleatorio» o la «caminata del borracho» se identificó casi de inmediato con el movimiento browniano y se hizo muy famoso.

El científico francés Jean Perrin se sumó a estas investigaciones y acabó ganando un Nobel por sus contribuciones. Lo que más fascinaba a Perrin era cómo el movimiento browniano podía utilizarse para demostrar una visión molecular de la naturaleza. Al final, llegó a la conclusión de que las partículas no se movían por nada que fuera ni remotamente demoníaco; su movimiento se debía tan solo al movimiento subyacente de las moléculas que componían el líquido en el que flotaban. Como explicó el hombre que presentó el Premio Nobel de Física de Perrin: «La única explicación irrefutable de este fenómeno atribuye los movimientos de las partículas a los choques que se producen entre ellas y las propias moléculas del líquido». Las investigaciones de Perrin acabaron «definitivamente con la larga pugna sobre la existencia real de las moléculas».

Al principio, Perrin optó por subrayar que la segunda ley no era más que una

aproximación: «El demonio imaginado por Maxwell era lo bastante rápido para discernir las moléculas individuales y hacer pasar el calor a voluntad de una región fría a otra caliente sin trabajo», y era una prueba de que la segunda ley estaba sujeta a ciertas excepciones. Según Perrin, el movimiento browniano demostraba la realidad de los actos constatables «una realidad palpable [réalité sensible]» de ese demonio. «El movimiento browniano no cesa nunca», explicó unos años más tarde: «Es eterno y espontáneo». ¿Se podía aprovechar la energía inagotable de las partículas? Perrin aseguraba que no. «Si no fuéramos más grandes que las bacterias», podríamos emplear el movimiento browniano como una máquina perpetua «para construir una casa sin tener que pagar por levantar los materiales». Pero lo cierto era que los humanos éramos mucho más grandes y las partículas del movimiento browniano, por desgracia, eran demasiado pequeñas para producir ningún trabajo significativo a escala humana. «Evidentemente, el sentido común nos dice que sería absurdo confiar en que el movimiento browniano colocara los ladrillos necesarios para erigir una casa». Pero el riesgo de caer en lo absurdo casi nunca ha impedido a científicos reconocidos. Consideremos las posibilidades de producir un trabajo útil a partir del movimiento browniano. Estadísticamente, se tardaría «bastante más de $(10^{10})^{10}$ años» en ver «un ladrillo subir a un segundo nivel gracias al movimiento browniano». Pero, a ciencia cierta, el ladrillo acabaría subiendo.

Inspirándose en el trabajo de Einstein, Perrin inmunizó a la ciencia de algunas de las consecuencias más alarmantes del demonio de Maxwell. Era un ser demasiado pequeño para producir trabajo útil, y demasiado lento para que esos efectos fueran provechosos. Las probabilidades de que se produjera eran demasiado escasas como para causar un daño significativo o producir cantidades significativas de trabajo. Al fin y al cabo, el demonio de Laplace podía estar a salvo del demonio de Maxwell.

UN CASINO HUMANITARIO

El físico polaco Marian von Smoluchowski también había estudiado las partículas brownianas hacía años, al mismo tiempo que Einstein. Como señaló uno de los biógrafos del alemán: «Es bastante notable la frecuencia con la que Smoluchowski y Einstein abordaron simultánea e independientemente

problemas similares, cuando no idénticos».

A diferencia de Einstein, Smoluchowski escribió explícitamente sobre la relación entre el movimiento browniano y el demonio de Maxwell. «No parece tan imposible perseguir moléculas con la ayuda de un demonio maxwelliano», afirmó, entusiasmado, en su investigación. Aunque los resultados de esos tres investigadores (Einstein, Perrin y Smoluchowski) eran casi idénticos, las conclusiones a las que llegaron no lo eran. En el universo de lo que se consideraba «casi imposible», Einstein y Perrin hicieron hincapié en el «imposible» y Smoluchowski, en el «casi». Los trabajos de Einstein sobre el movimiento browniano le valieron numerosos elogios, pero fueron las especulaciones de Smoluchowski en relación con los «seres inteligentes» las que alimentaron la imaginación de los científicos venideros. A medida que se indagó más en los demonios brownianos, empezó a calar una idea que fascinaría a los científicos durante el siglo siguiente: la de aprovechar su energía.

Smoluchowski no estaba dispuesto a descartar de un plumazo las especulaciones sobre el uso de esos movimientos para esquivar la segunda ley. Aventuró su conclusión final en una conferencia celebrada en la universidad de Göttingen en Alemania, con una frase ya ilustre. Como cabía esperar, comenzó afirmando que «no existe ninguna máquina de movimiento perpetuo automática y permanentemente eficaz, a pesar de las fluctuaciones moleculares», pero luego añadió: «Dicho eso, quizás ese dispositivo podría funcionar con regularidad si fuera manejado por seres inteligentes». Ese «si» tan intrigante obsesionó a los científicos durante los siguientes cien años. Con esa afirmación, Smoluchowski dejó abierta la posibilidad de aprovechar las fluctuaciones microscópicas del azar para producir un motor. Einstein se contentó con la interpretación estadística de la termodinámica; Smoluchowski prefirió estudiar cómo podía utilizarse el poder de nuestra mente y nuestra inteligencia para aprovechar la energía molecular.

A nivel estadístico, el movimiento de vaivén de las partículas brownianas recordaba al juego de mano de un crupier experto que recoge las fichas en el tapete de la ruleta. Pero el movimiento de las partículas era diferente en un aspecto: en ciertos casos las probabilidades favorecían al jugador y desfavorecían al casino. Su movimiento perfectamente aleatorio generaba oportunidades. Eran como un «casino humanitario en el que un jugador en bancarrota podía seguir jugando y acabar llevándose el premio gordo». La buena noticia era la siguiente: como el movimiento concedía sus premios

aleatoriamente, era extraño que la gente tuviera una mala suerte total. La mala noticia era que tampoco podía haber suerte siempre.

Uno de los consuelos de la mala fortuna de algunos era la certeza de que otros se llevaban el premio. Uno podía deleitarse con episodios momentáneos de schadenfreude por las desgracias de otros porque sabía muy bien que, la próxima vez, pagarían ellos. Smoluchowski afirmaba que el tiempo estaba en una relación de potencia de dos con las ganancias netas. Para él, era una «absoluta certeza» científica que cualquier jugador acabaría encontrándose una partida en la que el ganador se lo llevaría todo. Según Smoluchowski, cualquiera que tuviera suficiente «tiempo y capital» podía ganar un juego de azar «justo», siempre que se diera una condición: tenía que permanecer en el juego y esperar a ganar, y no verse obligado a abandonarlo abruptamente al quedarse sin fichas. El físico no recomendaba jugar para «obtener ingresos fijos», porque hacía falta mucho tiempo y capital para sacar un beneficio. No obstante, a Smoluchowski le intrigaba la posibilidad de sacar provecho de esos resultados, por raros que fueran.

Según Smoluchowski, «ya no necesitamos un demonio de Maxwell», porque ahora podemos ver «con nuestros propios ojos» cómo un «dispositivo automático» podría funcionar como él. Con una simple válvula o una bobina con delicados pelos como pestañas, podríamos dejar pasar ciertas partículas por el orificio de un recipiente e impedir la entrada de otras. Sin duda, construir esos mecanismos era difícil, pero no estaba tan claro que fuera imposible. Para Smoluchowski, si esa construcción era posible a priori, las dificultades en el diseño técnico no valían como objeción. Pero había otro problema que no parecía ser solo práctico: había una «imposibilidad fundamental». Cualquier válvula que funcionara contra corriente hacer el trabajo del demonio eventualmente acabaría fluctuando y dejando de funcionar. Necesitaríamos otro tipo de mecanismo, un tipo de válvula muy distinto. Concebirla parecía imposible en esa época, pero Smoluchowski siguió dándole vueltas.

Su conferencia recibió el provocativo título «Límites de la validez de las leyes termodinámicas». En ella, el físico polaco siguió comparando el movimiento browniano con los juegos de azar. También reconsideró la búsqueda del perpetuum mobile. Él había renunciado a cualquier máquina puramente «automática», pero dejó abierta la puerta a que una «criatura o cosa inteligente» (intelligente Wesen) pudiera producir esos efectos libres de entropía. ¿Qué tipo de criatura u objeto podría hacerlo? La respuesta estaba clara: un deus ex

machina.

Un movimiento perpetuo es posible. Solo se necesita un ser humano que experimente y sea percibido como un deus ex machina según los estándares habituales de la física, que esté informado con precisión del estado actual de la naturaleza y que pueda poner en marcha o interrumpir en cualquier momento los procesos macroscópicos de la naturaleza sin realizar ningún trabajo. Por lo tanto, no tiene por qué ser un demonio de Maxwell capaz de atrapar moléculas individuales; eso sí, se diferenciaría bastante de los seres vivos reales en los puntos antes mencionados.

A pesar de los avances de la termodinámica y la mecánica estadística, Smoluchowski llegó a la conclusión de que, en vista de estas cuestiones, la ciencia de los tiempos «modernos» seguía siendo igual de «especulativa» que siempre.

VII

LOS FANTASMAS DE EINSTEIN

En los círculos de divulgación científica del siglo xix y principios del xx, abundaban las descripciones de viajeros más rápidos que la luz. A los niños, incluido el joven Einstein —de quien ya hemos constatado que los demonios no le convencían—, les fascinaban las historias protagonizadas por estas criaturas. Einstein conoció a esos viajeros a los doce años, cuando un amigo de la familia le regaló un libro de divulgación científica. El joven devoró las aventuras sobre viajes en el tiempo y un volumen sobre el tema se convirtió enseguida en uno de sus libros favoritos. Años más tarde, en su autobiografía, reconoció haberlo leído «con lupa». Esas historias no solo eran divertidas y entretenidas; según Einstein, sus elucubraciones durante la tierna infancia fueron el «núcleo» o «germen de una paradoja que ya había desentrañado a los dieciséis años». De hecho, ese descubrimiento desembocó en la teoría de la relatividad.

«Leyendo libros de divulgación científica llegué a la convicción de que gran parte de los relatos de la Biblia no podían ser ciertos», explicó Einstein. De niño había sido muy religioso, pero su «profunda religiosidad» terminó de golpe y porrazo: «Encontró un final abrupto a los doce años». La ciencia ocupó el lugar que hasta entonces había ocupado la religión. «El paraíso religioso de la juventud», que antes había adorado, «se perdió para siempre». El joven Einstein abandonó la Biblia y empezó a leer «como un poseso», según él mismo, todos los libros de ciencia que caían en sus manos. Para él, esos libros llegaron a ser «más sagrados» que el Talmud.

La capacidad de este demonio para ver el mundo en el pasado dependía de la velocidad finita de la luz. De niño Einstein se puso en su lugar, imaginándose a sí mismo propulsado por el espacio persiguiendo un haz de luz: «Si persigo un haz de luz con la velocidad c (velocidad de la luz en el vacío), debería observar ese haz de luz como un campo electromagnético». Desde ese momento, Einstein empezó a buscar algo o alguien que pudiera viajar más velozmente que la luz. Con los años, se dio cuenta de algo asombroso: «No parece existir tal cosa, tanto

si nos guiamos por la experiencia como por las ecuaciones de Maxwell». Desde una edad muy temprana, Einstein se empeñó en seguir esos pensamientos infantiles hasta las últimas consecuencias hasta que dio con su famosa teoría de la relatividad. Y siguió refutando demonios durante mucho tiempo.

El libro *The Grammar of Science* [La gramática de la ciencia], del científico británico Karl Pearson, fue uno más leídos de finales del siglo xix y principios del xx. El texto incluía largas descripciones sobre dos demonios. Uno era el de Maxwell; el otro, su colega. Si el demonio de Maxwell era un portero perfecto, su colega era más bien un teletransportador ideal que podía viajar a velocidades infinitas gracias a su poder de transmisión instantánea. Dotado de inmensos poderes visuales, podía actuar a enormes distancias de forma simultánea e instantánea, transmitiendo mensajes y registrando las noticias del universo. Los delincuentes le temían tanto como al demonio de Laplace, porque, como superdetective, podía ver a grandes distancias. Pearson lo describió como alguien «dotado de una agudeza visual enormemente intensificada, con lo que podía observar desde muy lejos los acontecimientos de nuestra Tierra». ¿Cómo vería el mundo al saltar de estrella en estrella?

Einstein eligió el libro de Pearson para leerlo con un grupo de amigos íntimos. En un trabajo revolucionario que escribió poco después, logró refutar la posible existencia de ese ser. Einstein dijo que sus propias contribuciones habían eliminado los «fantasmas» del tiempo y el espacio absolutos. El colega del demonio de Maxwell no fue el único demonio eliminado por Einstein. El astrónomo británico Arthur Eddington, que demostró la teoría de la relatividad durante una famosa expedición a un eclipse en 1919, aclamó al alemán como un «exorcista» que había desterrado a otro demonio, con características similares al del colega de Maxwell que podía actuar instantáneamente a distancia: el demonio de la gravitación.

Debido a la velocidad finita de la luz, la imagen de las estrellas llega a nuestras retinas con retraso. Todas las estrellas que vemos son imágenes del pasado. La luz del sol tarda unos ocho minutos en llegar a nuestros ojos, así que, cuando lo vemos, estamos viendo cómo fue hace ocho minutos. Urano queda aún más lejos de la tierra, así que lo vemos con unas dos horas y media de diferencia. Para un observador que nos mirara desde esos lugares, la situación era la contraria: nos vería en el pasado. Dependiendo de la distancia a la que viajara un observador, un retraso de varias horas podía convertirse en días, años o siglos, si no más.

Eso acarreaba curiosas consecuencias. Al poder viajar a velocidades mayores que la luz, el colega del demonio de Maxwell podría ver cómo el mundo visual se formaba alrededor de él, y al modular su velocidad podría repasar cada momento a su antojo. Si lo imagináramos alejándose «de nuestro planeta a una velocidad superior a la de la luz, claramente todos los procesos naturales y toda la historia se invertirían para él». Cuando viajaba a la misma velocidad que la luz, podía congelar cualquier escena y analizarla a placer. Ningún detalle le pasaba desapercibido. Veía y se comportaba de las formas más insólitas, e incluso podía ser testigo del desarrollo inverso del mundo... de su retrodesarrollo. Según Pearson, las investigaciones sobre la posible existencia de ese demonio eran de «un gran interés desde el punto de vista de la relatividad pura de todos los fenómenos» ya que para él, todo era relativo, incluido el paso del tiempo.

MÁS VELOZ QUE LA LUZ

Einstein tenía muchas fuentes de inspiración. Los viajeros más rápidos que la luz galopaban por el universo de su juventud y saltaban sobre haces de luz para desplazarse velozmente por el aire. El autor favorito del joven físico era Aaron Bernstein, un famoso escritor de divulgación científica que cautivó a muchísimos niños de su edad. Pero es posible que Bernstein también fascinara a Einstein por otra razón, pues se movía con soltura entre la ciencia y la religión. Comparaba las afirmaciones bíblicas con las científicas y decidía a cuáles dar crédito. Todos sus relatos se fundaban sobre los conocimientos más actualizados de la ciencia, incluida la investigación sobre la velocidad de la luz. Bernstein reveló que la fuente original de sus narraciones había sido un «librito» titulado *The Stars and World History* [Las estrellas y la historia del mundo], publicado anónimamente en 1846 y escrito por un «agudo pensador» que conducía a los lectores aventureros por ese particular «juego mental [Gedankenspiele]».

El autor, que había firmado la obra con iniciales seudónimas, resultó ser Felix Eberty, un jurista y escritor alemán que describió a un «observador con el poder de seguir el reflejo de un suceso transitorio sobre las alas de la luz». Este veloz viajero competía con otro aún más rápido que podía saltar a una estrella lejana y esperar tranquilamente a que le llegaran las ondas de luz, mucho más lentas que

él. Eberty tildó a este ser de «espíritu superior o más elevado» y de «ser provisto de un grado superior de poder humano», y lo comparó con un «habitante» de una estrella remota «que se alejara a lomos de las imágenes y los rayos de luz». Ese observador podía desplazarse a toda velocidad para alterar el tiempo que tardaban los acontecimientos del mundo en llegar hasta él.

Eberty se ciñó tanto como pudo a la ciencia de su época. Situado en una estrella distante de magnitud doce, «vería la Tierra actualmente tal como existía en tiempos de Abraham». Saltando de una estrella lejana a otra, «a los ojos de este observador, toda la historia del mundo, desde la época de Abraham hasta nuestros días, pasaría en el espacio de una hora». Con agilidad: «Podrá centrarse tan deprisa como le plazca en el momento de la historia del mundo que quiera observar con tranquilidad y comprender con su mirada ese torbellino de imágenes consecutivas». Tendría un «microscopio para el tiempo» con el que analizaría procesos biológicos como la floración o el vuelo de una mariposa.

En los cuentos que llegaron a Einstein a través de Bernstein, se pedía a los lectores que se imaginaran viajando cada vez más rápido hasta alcanzar la velocidad de un telégrafo eléctrico. «¿Viajamos por el agua? ¿A caballo? ¿En tren? ¡Nada de eso! Viajamos con la ayuda del telégrafo eléctrico». Si uno pensaba en comunicación veloz, ya no hacía falta figurarse «caballos alados» atados a «carros celestes». En la versión de Bernstein, el telégrafo eléctrico había asumido el papel de esas criaturas. En otro volumen, se especulaba con la posibilidad de superar la velocidad de la luz y con el hecho de que eso pudiera llevar a presenciar el mundo al revés.

En un punto del espacio se empieza a atisbar la luz de los hechos de la Revolución francesa. Aún más lejos, la invasión de los bárbaros acaba de convertirse en el orden del día y Alejandro Magno sigue conquistando el mundo. [...] Y si vamos aún más lejos en el espacio, la representación del pasado de la Tierra a través de la luz acaba de avanzar hacia el futuro, y acontecimientos históricos que para nosotros murieron hace mucho tiempo acaban de cobrar vida.

Bernstein aseguraba a sus lectores que esos posibles escenarios «ya no eran mera fantasía». No eran «invasiones fantasmales [geistreiche], sino conclusiones

reales basadas en verdades naturales».

Como muchos coetáneos suyos, Eberty había sido testigo de grandes avances en la velocidad de transporte y las tecnologías de la comunicación: «Con un coche de vapor podemos recorrer una milla geográfica en diez minutos, y con el telégrafo eléctrico podemos hacer sonar en un segundo una campana que se encuentre a diez millas». Era natural que los pensadores de su época extrapolaran esos avances al futuro: «Del mismo modo, cabe suponer que podamos desplazarnos de un lugar a otro a una velocidad superior a la de la luz».

Los grandes poderes de esos seres eran ideales para la ciencia forense, perfectos para resolver crímenes y delitos: «No solo la mancha de sangre del asesinato queda incrustada de forma indeleble en el suelo de la habitación, sino que el hecho es observable cada vez desde más lejos en el espacioso firmamento». Cuando se tradujo el libro de Eberty al inglés, el reverendo y rector de la Universidad Harvard Thomas Hill escribió el prólogo. Allí, Hill expresó su asombro ante la posibilidad de vigilar por completo, no solo el presente, sino también el pasado: «Estoy convencido de que la difusión de este libro beneficiaría tanto a la ciencia como a la religión». Hill citaba y celebraba la afirmación de que todo podría llegar a dilucidarse algún día, incluidas las fechorías.

POINCARÉ, EINSTEIN Y LAS SEÑALES

MÁS RÁPIDAS QUE LA LUZ

Mientras Einstein descubría esas historias leyendo a Bernstein en alemán, Henri Poincaré las leía en francés por boca del astrónomo y divulgador Camille Flammarion. Según Poincaré: «Flammarion imaginó una vez a un observador alejándose de la Tierra a una velocidad superior a la de la luz». ¿Qué vería?: «Para él, el tiempo tendría su signo cambiado, la historia se invertiría y Waterloo llegaría antes que Austerlitz». Poincaré añadió otro elemento a las especulaciones anteriores: nuestra comprensión de la causalidad y el azar daría un vuelco. No solo veríamos imágenes ordenadas sucediéndose a la inversa, sino que descenderíamos poco a poco hacia el caos a medida que el universo se alejara del equilibrio: «Pues bien, para ese observador, los efectos y las causas se

invertirían; el equilibrio inestable ya no sería la excepción. Debido a la irreversibilidad universal, todo le parecería salir de una especie de caos en equilibrio inestable; toda la naturaleza se le antojaría sometida al azar». Poincaré, al contrario de Einstein, no veía ninguna objeción científica: creía que en teoría no había ninguna limitación universal que prohibiera la transmisión de mensajes a velocidades mayores a la de la luz. Las limitaciones eran, según él, solo prácticas y de grado.

Esas historias tenían un lado serio: las premisas científicas que las sustentaban derivaban de las últimas investigaciones en física, astronomía y cosmología. Poincaré habló de las señales más rápidas que la luz y describió los demonios y el movimiento browniano en su charla ante la Exposición Universal de St. Louis, Missouri: «¿Qué ocurriría si uno pudiera comunicarse mediante señales no luminosas con una velocidad de propagación diferente a la de la luz?». Para Poincaré, el futuro descubrimiento de esas señales no era «inconcebible». Algún día podría descubrirse que algo o alguien viajaba más rápido que la luz. Las ondas gravitacionales podían resolver el misterio, con lo que sugería que esas señales podían existir: «Y si admitimos, como Laplace, que la gravitación universal se transmite un millón de veces más rápido que la luz, ¿son inconcebibles esas señales?».

En su trabajo sobre la relatividad especial de 1905, posiblemente el texto más famoso de la historia de la ciencia, Einstein señaló que, si la velocidad de la luz era independiente de la fuente de su movimiento (como ya se había demostrado en varios experimentos), el tiempo indicado por los relojes y las longitudes de las reglas se dilataría en función de su velocidad. Para llegar a esa conclusión, Einstein valoró una vez más cómo sería una fuente de iluminación para «un observador que se acercara a una fuente de luz con velocidad V ». Cuando la velocidad de ese observador que viajaba por el espacio se aproximaba a la de la luz, las cosas se volvían muy extrañas.

La concepción clásica del tiempo y el espacio, basada en los efectos de la acción a distancia, corría el riesgo de resquebrajarse. Por eso Einstein aventuró que tal vez no existiera el «espacio vacío» en el sentido tradicional del término, ni tampoco el tiempo universal. Pero los efectos o viajeros más rápidos que la luz no tenían por qué preocuparse: «Para velocidades supralumínicas, nuestras consideraciones carecen de sentido». Einstein aún no estaba preparado para descartarlas por completo del universo y de la ciencia.

EL LUMEN DE FLAMMARION

En las especulaciones de Flammarion sobre seres ultrarrápidos, el protagonista se llamaba Lumen, «rayo de luz» en latín. Lumen había sido humano, pero ahora vivía en el más allá. En el momento en que su cuerpo humano pereció, Lumen había salido volando por una ventana abierta. Pero Lumen seguía atado en cierto modo al mundo de los mortales y era incapaz de desprenderse del todo de su pasado. Volvía diligente y periódicamente a la Tierra para conversar con su amada. Era un alma inquieta: «No tenía cuerpo, pero no era incorpóreo. No puedo decirte gracias a qué ley, ni a qué poder, las almas pueden transportarse tan deprisa de un lugar a otro», pero él podía hacerlo. Incluso después de marcharse a un lugar recóndito del universo, sería capaz de volver «a la Tierra en menos de un día». Esa criatura era «un pájaro de las regiones superiores» capaz de descender subrepticamente donde quisiera, con solo un ligero «crujido»: «Como si un recién llegado hubiera caminado sobre hojas muertas». Los mortales más sensibles podían percibir su presencia con sutileza: «Como si un aliento tocara mi frente».

¡Grandes poderes tenía Lumen para hacer zoom en el tiempo y expandirlo! Podía ampliar «sesenta mil veces la duración de un relámpago». Podía detener una cascada, una avalancha e incluso un terremoto. Podía mantener en su visión el más ligero destello de luz. «¡Qué pandemónium!», exclamó Lumen al descubrir sus nuevas habilidades. Era el dueño total de «un mundo que, por su propia fugacidad, se oculta a la visión imperfecta de los mortales».

Flammarion pormenorizó todas las paradojas derivadas del hecho de que «la luz se transmita muy deprisa, pero no instantáneamente, como creían los antiguos». Cuando observaba la Tierra en tiempos pasados, Lumen era capaz de verse a sí mismo incluso al nacer, o al morir. Sus interlocutores se quedaban atónitos ante sus descripciones. «No puedes ser dos personas», le recriminaba un amigo. Pero, en cierto sentido, era justo lo que era, y Lumen respondía: «¿Puedes encontrar en toda la creación una paradoja más formidable que esta?». Su amigo y él hablaban de cómo los mensajes podían llegar mucho después de que los remitentes hubieran muerto, incluidos los que eran transportados por la luz. Puesto que podían existir viajeros más rápidos que la luz, el universo era un

lugar de constante «conversación entre los vivos y los muertos».

Al igual que Eberty y Bernstein, Flammarion dijo que su criatura era capaz de saber con pelos y señales lo ocurrido durante toda la historia del mundo y del universo. Los delincuentes no podrían ocultar sus fechorías a los futuros investigadores, a menos que hubieran tomado la precaución de evitar cualquier filtración de luz. En uno de sus relatos clásicos, Flammarion explicaba: «Un crimen se perpetúa. Escapa sin ser descubierto»; «se ha lavado las manos... [y piensa que] su hazaña es ya una realidad incontestable», pero se equivoca. El crimen «se transmitirá eternamente al infinito», arrastrado por una ola. Si un demonio viajara a la misma velocidad que la luz y analizara la imagen de un pedazo de historia, esa imagen estaría congelada, así que podría estudiarla con tranquilidad. El mundo sería «como una fotografía que no cambia, mientras que su original envejece con el paso del tiempo».

VIAJEROS MÁS RÁPIDOS QUE LA LUZ

Richard Proctor era un astrónomo de la época y miembro de la Royal Astronomical Society. En su *Other Worlds than Ours* [Otros mundos aparte del nuestro] de 1896, Proctor analizó con mirada crítica esos relatos de viajes en el tiempo y estudió en detalle: «Un pequeño tratado titulado *Las estrellas y la Tierra*, publicado anónimamente varios años atrás», en el cual se trataban «de manera muy interesante algunos resultados de los descubrimientos modernos sobre la luz». Pero el astrónomo dedujo que había algún error en ellos. Criticó que el autor parecía haber olvidado que la Tierra rotaba, de modo que todas las ondas de luz enviadas desde nuestro planeta llegarían a un observador lejano como un pretzel trenzado casi imposible de desenredar.

En su relato del universo, Proctor no necesitaba ningún demonio para conseguir esas hazañas viajeras, sino un hombre dotado de «supervisión» y situado en algún paraje recóndito del universo: «Imaginemos un ser situado en algún orbe lejano desde donde la luz tardaría miles de años en llegar a nosotros. Si ese ser volviera su mirada hacia nuestra Tierra, y si su visión fuera la adecuada para informarle de su aspecto, percibiría los acontecimientos que ocurrieron en su superficie hace miles de años». Si ese «ser» aumentara poco a poco sus

capacidades, los lectores podrían aprender otras lecciones sobre el universo.

¿Y qué pasaría si sus «facultades de locomoción» le otorgaran el poder del «vuelo instantáneo»? Sumados a los poderes de visión, los frutos podrían ser asombrosos: «Ahora imaginad que a ese ser se le concedieran poderes de locomoción acordes con sus maravillosos poderes de visión. En un instante de tiempo, podría salvar la enorme distancia que le separa de nuestra Tierra». Para Proctor, los nuevos servicios telegráficos de reparto de noticias eran el punto de comparación obvio: «En ese sentido, igual que un periódico diario nos cuenta lo ocurrido en Londres más tarde que lo ocurrido en provincias, y lo ocurrido en provincias más tarde que lo ocurrido en el Continente, y esto último después de los sucesos ocurridos en América, Asia, África o Australasia, del mismo modo la inteligencia aportada por la luz respecto a los diversos miembros del sistema solar pertenece a épocas diferentes». Un «neptuniano inteligente» estaría más lejos. Vería la Tierra en un momento que, para nosotros, habría pasado mucho tiempo atrás.

En otro relato escrito por el sacerdote jesuita y teólogo Joseph Pohle, el viajero más rápido que la luz aparecía completamente desprovisto de cuerpo. Era denominado simplemente como un ojo superrápido que podía observar la historia del mundo como un conjunto de «cuadros vivientes en cambio fulgurante» que también podían aparecer a la inversa: si un observador pudiera moverse más rápido que la velocidad de la luz, entonces «la historia del hombre y de la Tierra daría un vuelco total. Primero se vería a la gente en el lecho de muerte, luego postrada en cama, después en la flor de la vida y finalmente como un bebé en la cuna». Su autor reiteraba las descripciones habituales del mundo de esa criatura, donde los hombres podrían morir antes de nacer: «Las relaciones perceptivas serían francamente paradójicas si el ojo se moviera a un ritmo más rápido que la luz: tendría que darse el caso imaginario de que los acontecimientos se invirtieran».

LOS FANTASMAS DEL TIEMPO Y DEL ESPACIO

A principios de 1914, Einstein terminó el manuscrito de un artículo que se publicaría en primavera. En él citaba fantasmas recurriendo al vocablo alemán

Gespenster. En la traducción francesa del artículo, los personajes de Einstein se llamaban revenants. Allí, el físico decía que su trabajo eliminaba esas criaturas. El tema principal del artículo era el concepto del espacio absoluto, que Einstein ya no consideraba un marco estable o una especie de escenario en el que todo debía suceder. Lo que la mayoría de sus contemporáneos consideraban real no lo era. Su primer objetivo era nada más y nada menos que la concepción tradicional del espacio.

«Nunca creí en los fantasmas, así que no puedo creer en esa cosa gigantesca de la que me hablas y a la que llamas espacio. No soy capaz de ver tal cosa ni de concebirla». La traducción francesa era aún más sobrecogedora, pues comparaba la noción clásica del espacio con la creencia en algo o alguien que había regresado de ultratumba. Con esas palabras, Einstein equiparaba las nociones tradicionales del espacio que pretendía refutar con la creencia en esas criaturas.

Pocos meses después de que Einstein publicara su artículo en Scientia, el archiduque austríaco Francisco Fernando y su esposa fueron asesinados por un pistolero solitario. Poco después, Rusia, Alemania, Francia y Reino Unido se vieron arrastrados a la Primera Guerra Mundial. Los años siguientes fueron duros para Einstein. Cuando estalló el conflicto acababa de trasladarse a Berlín, y cada vez era más crítico con el militarismo alemán. A finales de 1915, por fin había conseguido ampliar su teoría de la relatividad para hacerla más general, incorporando la gravitación y la aceleración. En una carta a un amigo, admitió haber «pasado una de las épocas más estimulantes y agotadoras» de su vida, pero «también una de las más fértiles». A otro amigo, le dijo que estaba «contento, pero kaputt». Einstein desarrolló una nueva forma de entender el universo como la deformación del espacio-tiempo en torno a los objetos masivos.

La teoría de Einstein era tan complicada que casi nadie la consideraba necesaria. El tiempo se ralentizaba cuanto más se acercaba un observador a esas masas, y el espacio también se deformaba a su alrededor. Toda la estructura del universo era no euclidiana. En él, las líneas paralelas podían cruzarse, la línea más corta entre dos puntos no era recta y el tiempo era simplemente otra dimensión más aparte de las tres dimensiones espaciales. ¿Qué podía hacer Einstein para reformularla y convencer a los demás de su relevancia? Tenía que esforzarse más para ultimar todas sus implicaciones. Einstein decidió cambiar de marcha y dejar momentáneamente de lado el complejo trabajo científico y técnico para centrarse en popularizar su teoría. Su intención era proporcionar a «alguien unas cuantas horas agradables de pensamiento sugestivo» y, así, dar a su trabajo una mayor

acogida. A finales de año había terminado su primer libro de divulgación científica.

Einstein animó a sus lectores a imaginar las repercusiones de la teoría de la relatividad preguntándoles cómo sería el universo para alguien que «se dirigiera a toda velocidad hacia el rayo de luz» o que «cabalgara por delante del rayo de luz». En muchos aspectos, el libro era como la mayoría de las historias de viajes en el tiempo, pero, a diferencia de las obras de divulgación de la época, los observadores de Einstein ya no podían ver los mágicos efectos inversos porque eran incapaces de superar los límites de la velocidad de la luz. Como mucho, podrían viajar a esa velocidad, y lo que verían no tendría nada de excepcional: no verían nada diferente de lo que veían cuando estaban en reposo. Los viajeros más rápidos que la luz ya no eran capaces de ver el pasado de la forma tan maravillosa que habían descrito Ebert, Bernstein y Flammarion.

Einstein tenía otras ideas respecto a los viajeros superrápidos. Para él, el hecho de no poder superar la velocidad de la luz no era solo una limitación tecnológica. Su teoría de la relatividad prohibía la existencia de dichos viajeros. Al final, llegó a la conclusión de que esa imposibilidad era una propiedad del universo en sí.

El público alemán había empezado a caer hechizado por nuevas películas que rivalizaban con las producciones operísticas y teatrales tradicionales. Había nacido el género del terror. Einstein dijo que algunos de los conceptos en los que él creía provocaban los mismos miedos. «Un escalofrío místico» le recorría la espalda provocado por «una sensación no muy distinta a la que generan esos fantasmas del teatro». Es el escalofrío que «se apodera de los no matemáticos cuando oyen el término “cuatridimensional”». Pero el genio alemán llamó a la calma y declaró que una persona que entendiera bien la «vulgaridad» del universo cuatridimensional podría desarmar a los aterradores «fantasmas del teatro» [Theatergespenst].

En un fragmento posterior de la narración, Einstein describía a un ser que jugaba con una persona atrapada en una celda sin ventanas. Ese ser podía atar un «gancho» en el techo exterior de la celda, ligarlo a una «cuerda» y empezar a tirar. La persona dentro subiría y bajaría a su antojo. Einstein pedía a los lectores que se imaginaran a sí mismos sintiendo la presión del suelo en las piernas, como si estuvieran encerrados en un ascensor arrastrado hacia arriba desde el exterior por una criatura hasta alcanzar velocidades «fantásticas». Si el tirón se

produjera a una velocidad constante, el impulso de la aceleración sería prácticamente indistinguible del de la gravitación, y eso reforzaba la tesis de que ambas eran fuerzas equivalentes. ¿Quién era ese «ser» que jugaba desde fuera?, se preguntaba el físico. Según Einstein, la respuesta «era irrelevante para nosotros», ya que el propósito de introducir la criatura era únicamente ver que su idea podía descartarse una vez que se aceptara la curvatura en el espacio-tiempo cuatridimensional.

Einstein volvió a escribir sobre «fantasmas» en un manuscrito inédito que resumía las ideas básicas de su teoría. El tema principal de la obra ya no era el espacio, sino el tiempo. Según Einstein, «solo los fantasmas [Geister]» serían capaces de percibir un enorme reloj extendido por todo el espacio. Evidentemente, los mortales no podían captar los sonidos de «un tictac eternamente uniforme». Y eso no quitaba que casi todo el mundo creyera en esos fantasmas sin cuestionárselo. Si se le «[preguntaba] a un hombre inteligente que no fuera un erudito» por el tiempo, su respuesta mostraría que entendía el tiempo como ese fantasmal «tictac». El físico ahuyentó enseguida esos fantasmas: «No hay ningún tictac audible en todo el cosmos que pueda considerarse tiempo». En varios pasajes de su obra, Einstein alegó que los reputados miembros de su comunidad y la mayoría del público lego eran hostigados por nociones fantasmales del tiempo y el espacio. A un colega, le dijo: «El fantasma [Gespenst] del espacio absoluto persigue [spukt]» a la física.

Al año siguiente, Einstein sufrió una crisis nerviosa. Su salud empeoró a un ritmo vertiginoso y no estaba claro que fuera a sobrevivir. Su matrimonio se había desmoronado, acababa de escribir una necrológica para Ernst Mach y tenía que escribir otra para Smoluchowski. Un frío día de diciembre, escribió que los últimos años habían sido una «Weltkatastrophe».

EINSTEIN, EL EXORCISTA

Justo cuando estaba a punto de perder toda esperanza, Einstein encontró a un salvador: el astrónomo Arthur Eddington, un cuáquero británico y compañero pacifista que se empeñó en poner a prueba las hipótesis del físico. Eddington hizo mundialmente famoso a Einstein. Aunque el propio Einstein llevaba años

convencido de los méritos de su teoría, necesitaría mucho más para persuadir a sus colegas y al público de su importancia. Eddington fue clave en ese sentido. Con su ayuda, el alemán pudo convencer por fin al gran público del absurdo de creer en velocidades superiores a la luz: nada ni nadie podía viajar más deprisa. Eddington, que planeó una famosa expedición a un eclipse para poner a prueba la teoría del físico alemán, se referiría pronto al «agente que hace esas jugarretas» con la persona atrapada en la celda sin ventanas descrita por Einstein como un «demonio».

Eddington logró prevenir que lo forzaran a enlistarse en el ejército organizando una expedición de astrónomos a una remota isla de la costa africana. Su propósito era observar y fotografiar un eclipse que tendría lugar en 1919. El viaje sería un viacrucis, pero mucho menor que el que sería recalcar en las mortíferas trincheras embarradas de la Primera Guerra Mundial. El astrónomo y su equipo volvieron de África con un notición. Einstein no se sorprendió demasiado. Había previsto el resultado al completar su teoría a finales de 1915. Para él, la expedición de Eddington fue una confirmación a gran escala de resultados que ya se habían observado cualitativamente (en el desplazamiento de las líneas espectrales) y que se conocían desde mediados del siglo xix, como el perihelio de Mercurio.

Eddington presentó los resultados de su viaje de investigación en una reunión cuidadosamente planeada y llena de científicos y periodistas. Se celebró en Burlington House, en el centro de Londres. En los días siguientes, los periódicos de todo el mundo alabaron los logros del alemán con titulares rimbombantes y anunciaron una revolución en la ciencia. De repente, a todo el mundo le importaba. Einstein pasó de ser un buen profesor universitario a ser una sensación mundial. Hace poco, un historiador afirmaba que «el mundo moderno comenzó el 29 de mayo de 1919, cuando las fotografías de un eclipse solar confirmaron la veracidad de una nueva teoría del universo».

Durante los años posteriores a la expedición, Eddington promovió a Einstein como algo más que un gran científico: como un exorcista. En las conferencias Romanes celebradas en el Teatro Sheldonian de Oxford en 1922, proclamó: «Einstein ha exorcizado al demonio», una frase que repetiría en otros sitios durante más de una década. Según el astrónomo, la consecuencia más importante de la teoría de la relatividad fue que eliminó el «demonio de la gravedad», es decir, que logró refutar los actos de «una agencia o demonio intangible llamado gravitación».

¿Quién era exactamente ese demonio? Según Eddington, la teoría de Newton se basaba en las acciones de un «agente misterioso» que en los siglos XVII-XVIII se consideraba divino, pero que ahora suele verse más como una figura demoníaca. Quizás Eddington acertara al culpar a Newton, pues era cierto que había postulado la acción de «un agente» como causa de la gravitación. En su correspondencia con un destacado teólogo y erudito de la época, Newton había afirmado que «la gravedad debe ser causada por algún agente que actúa constantemente según ciertas leyes». El propio Newton no estaba seguro de qué tipo de agente se trataba: «Si este agente es material o inmaterial, lo he dejado a la consideración de mis lectores». Eddington explicó el razonamiento del físico: «Como hay que explicar este nuevo fenómeno, inventa un deus ex machina al que llama gravitación y atribuye a sus actividades la perturbación». Esa explicación tan inadecuada había sobrevivido durante siglos, hasta que llegó Einstein y acabó con ese misterioso «agente tractor». Sin disculparse por ello, el propio Eddington afirmaba que había calificado «irrespetuosamente» de «demoníacas» las explicaciones newtonianas de la gravitación.

La caracterización de la gravedad como agente se hizo aún más prominente en las primeras décadas del siglo XIX. El astrónomo John Herschel explicó la acción de la gravedad aludiendo a una conciencia y una voluntad en su *Treatise on Astronomy* [Tratado de astronomía] de 1834: «Todos los cuerpos que conocemos, cuando se elevan en el aire y se sueltan, descienden a la superficie terrestre en línea perpendicular. [...] Por consiguiente, son impulsados por una fuerza o esfuerzo, y es razonable considerarlo el resultado directo o indirecto de una conciencia y una voluntad que existen en algún lugar, aunque no tengamos la facultad de identificarla. A esa fuerza, la llamamos “gravedad”». ¿De verdad existía una agencia responsable de hacer caer las cosas cada segundo del día y en todas partes?

Lo que antes se había tachado de obra de un demonio, ahora se podía explicar por las deformaciones del espacio-tiempo. Pero no fue fácil convencer a los lectores de los méritos de la teoría de Einstein. Eddington explicó que se solían invocar los demonios cuando la realidad no cumplía las expectativas. Para ello, utilizó un ejemplo hipotético relacionado con los cartógrafos y las personas que leen un mapa. Como la escala de los mapas de la proyección de Mercator se reducía a medida que uno se alejaba del centro, probablemente los griegos que los utilizaran para viajar a Groenlandia pensarían que la isla era inmensa en comparación con lo que indicaban sus mapas. A los groenlandeses que viajaran a Grecia, el país les parecería mucho más pequeño de lo esperado, a juzgar por sus

referencias. Al no entender las dificultades de trazar el mapa de una esfera tridimensional en una superficie cuatridimensional, podrían culpar a un demonio de las dimensiones alteradas: «Supongo que inventarían la teoría de que en ese país residía un demonio que ayudaba a los viajeros en su camino, haciendo que los viajes parecieran mucho más cortos de lo que realmente eran».

Era natural que la gente normalizara sus experiencias y viera como anómalas las ajenas. También era natural que inventaran demonios cuando sus percepciones no coincidían con sus expectativas. Pero, según Eddington, existía otra solución que no implicaba demonios. Los griegos en Groenlandia podían cambiar sus mapas para que el tamaño del territorio fuera el mismo que el que estaban acostumbrados a interpretar: «También podríamos comenzar nuestro mapa plano con su centro en Groenlandia; entonces, se descubriría que los viajes allí eran bastante normales y que las actividades del demonio perturbaban a los viajeros en Europa». Ese movimiento sería idéntico al propuesto por Einstein al añadir otra dimensión al universo. «Ahora sabemos que la verdadera explicación es que la superficie terrestre es curva; y las complicaciones demoníacas aparecieron porque estábamos forzando la superficie terrestre en un marco plano inapropiado, que distorsiona la simplicidad de las cosas». En lugar de inventar hipótesis ad hoc para encajar un universo donde no cabía sin causar problemas y paradojas, los científicos podían adoptar la nueva teoría basada en un espaciotemporal de cuatro dimensiones.

Eddington supuso que los científicos reprobarían su elección de la palabra «demonio» y probablemente propondrían un término más elegante: «No cabe duda de que los científicos protegerán su amor propio utilizando algún polisílabo grecolatino en lugar de la palabra “demonio”, pero eso no debe ocultarnos el hecho de que estaban apelando a un deus ex machina». Para él, la palabra era perfecta: «El nombre “demonio” es bastante adecuado, de todos modos, pues tiene la característica traviesa de que no podemos fijarlo en ninguna localidad concreta».

Durante años, Eddington siguió presentando a Einstein como un exorcista. En sus conferencias de 1927, aseguró a sus oyentes que Einstein había expulsado «al respetable demonio causal que se hacía llamar Gravitación». Antes de la teoría de la relatividad de Einstein, las «manzanas de Newton» se habían explicado «por medio de una agencia intangible o demonio llamado Gravitación que instaba las manzanas a desviarse de su movimiento uniforme apropiado». El astrónomo puso como ejemplo las distorsiones que se producen al cartografiar

continuamente una superficie tridimensional sobre otra bidimensional: «Cuando cambiamos de un observador a otro, de un marco espaciotemporal plano a otro, el radio de actividad del demonio cambia». Esos cambios revelaban una característica particular de los demonios: eran difíciles de ver cuando estaban cerca y más fáciles de detectar en otros. El radio de actividad del demonio «nunca está donde se encuentra nuestro observador, sino siempre más allá». En otras palabras: «El demonio nunca está donde tú estás; siempre es el otro quien está embrujado».

A continuación, el astrónomo habló del «hombre en el ascensor» de Einstein, refiriéndose al ejemplo utilizado por el alemán para explicar que las fuerzas de aceleración eran iguales a las gravitatorias. Una persona dentro del ascensor achacaría a la gravedad el impulso contra sus pies, pero una persona en el exterior lo achacaría a la aceleración del ascensor. El marco newtoniano exigía una explicación para la persona que estaba en el ascensor y otra para la que estaba fuera, pero Einstein había demostrado que las dos experiencias eran equivalentes. «Hay que postular la actividad de un demonio que impulsa hacia arriba los cuerpos sin apoyo» en un caso, pero no en el otro. Con un universo espaciotemporal curvo que explicaba al mismo tiempo la aceleración y la gravitación, ya no era necesario usar dos teorías. «¿Acaso no es evidente la solución?», preguntó Eddington. «El demonio es solo la complicación que surge cuando intentamos encajar un mundo curvo en un marco plano». La solución era sencilla: «Si admitimos la curvatura del mundo, la misteriosa agencia desaparece».

¿Cómo debían referirse los científicos al «agente que realiza esos trucos», en especial el que Einstein había mencionado al hablar de un «ser» que atrapaba a alguien en un ascensor y tiraba de él hacia arriba a una velocidad vertiginosa? Hablando de su mención del demonio, Eddington advirtió a su público igual que lo había hecho antes: «Por supuesto, ningún científico utilizaría una palabra tan cruda [...] para denotar al misterioso agente». Pero, fuera como fuera, la terminología más rebuscada no era «más que un camuflaje» que le permitía seguir comparando «el agente invisible inventado para explicar la tracción de la gravitación con un demonio». Mientras no se examinaran esos demonios, la ciencia seguiría estancada... A continuación, planteó una pregunta más enrevesada: «¿Una visión del mundo que admita ese agente es más científica que la visión de un salvaje que atribuya a la obra de demonios invisibles todo lo que halla de misterioso en la naturaleza?».

¿Eran los demonios de la ciencia moderna idénticos a los del «salvaje»? Eddington explicó la ligera, aunque trascendental, diferencia que había entre ambos. El quid era la causalidad, es decir, el grado de malicia e irresponsabilidad atribuido a esos demonios. El newtoniano «podía señalar que, en teoría, su demonio Gravitación actuaba según leyes causales fijas y, por lo tanto, no era comparable a los demonios irresponsables del salvaje». Vale, pero «el salvaje» podía responder alegando que sus demonios tampoco serían propensos a excederse del todo. «Supongo que el salvaje admitiría que, hasta cierto punto, su demonio era una criatura de costumbres y que se podría conjeturar lo que haría en el futuro; aunque a veces mostraría una voluntad propia». Eddington llegó a la conclusión de que el demonio de «los salvajes» y el demonio de los newtonianos eran, si no casi idénticos, sí parientes, cuando no hermanos: «Es esa consistencia imperfecta lo que antes lo descalificaba [al demonio de los salvajes] de ser admitido como una entidad de la física junto con su hermana, la Gravitación».

Pese a sus ejemplos —la persecución de haces de luz y los «seres» que tiraban de ascensores o celdas con personas atrapadas dentro—, el libro de divulgación de Einstein pasó inadvertido durante años, hasta que de repente se convirtió en un superventas. Durante la vida del físico, se tradujo a más de doce idiomas y se publicaron quince ediciones en alemán. Un montón de imitadores embellecieron sus relatos y elaboraron versiones cada vez más coloridas. Su colega Paul Langevin fue el más imaginativo, al concebir un viajero en la nave espacial de Julio Verne. Con el tiempo se introdujeron otros casos: «gemelos» que viajaban por el espacio exterior; moscas que aterrizaban en charcos estancados para explicar la curvatura del espacio; platos del vagón-comedor de un tren que parecían ovalados a los viajeros de la estación; fuegos artificiales vistos desde globos aerostáticos; y aviadores que fumaban puros y miraban su reloj de pulsera con manecillas, que se ralentizaba o se detenía cuanto más rápido se volaba. *The Einstein Theory of Relativity*, uno de los documentales más vistos de la época, usó innovadoras técnicas de animación para representar un cohete que se lanzaba desde la Tierra y viajaba y retrocedía durante años, hasta que se detenía en 1492 para atrapar a Colón «durante su descubrimiento de América». El libro que acompañaba la película explicaba el valor de la teoría de Einstein comparando sus méritos con la desmitificación científica de fenómenos que, previamente, solo se habían podido explicar haciendo referencia a fantasmas y espíritus: «Igual que la gente de la Tierra ha hecho con la teoría de la cuarta dimensión, afirmarían que esas cosas eran imposibles, al margen de su apariencia, ¡o bien eran obra de fantasmas y espíritus incorpóreos!».

Einstein siguió luchando a brazo partido contra las explicaciones previas del universo que aludían a viajes casi instantáneos. Su golpe final contra el viajero más rápido que la luz, conocido como el colega del demonio de Maxwell, llegó en forma de un breve prefacio que escribió para la reedición de *The Stars and World History*, de Felix Ebert. En su texto, Einstein alabó el libro porque exhibía «el espíritu crítico [del autor] contra el concepto tradicional del tiempo» de su época, pero también señaló que las conclusiones estaban desfasadas y que su propia labor había probado que eran erróneas: «La propia teoría de la relatividad, a la que muchos acusan de conducir a conclusiones extrañas, puede salvarnos de otras aún más extrañas».

El prefacio de Einstein fue un breve obituario para un trepa indigno, un miserable advenedizo que había introducido paradojas innecesarias en la ciencia. Por fin se había acabado con el colega de un demonio que había cautivado al siglo XIX y había dado lugar a los fantasmas del tiempo y el espacio absolutos.

extraña que recientemente un científico las comparó con los ovnis que aparecían «en las películas ridículas de ciencia ficción», ya que podían «quedarse quietas durante horas [...] y, de repente, dar un respingo y escapar a toda velocidad». Estas partículas no se podían localizar exactamente.

El físico alemán Werner Heisenberg notó que era imposible medir su posición sin introducir un cambio en su velocidad (momentum) y viceversa. Su descubrimiento pronto se conoció como el principio de incertidumbre. Tras la publicación del trabajo de Heisenberg, los investigadores comenzaron a plantearse si podían existir demonios traviesos de tamaño cuántico que alteraran su posición cada vez que los científicos determinaban su velocidad (momentum), y también al revés. Tales posibilidades sacaban de quicio a Einstein, que tachaba a esas conexiones de «espeluznantes» y «fantasmales». Otros estudios apuntaban a la posible existencia de conexiones en el universo más rápidas que la luz, que revivían al colega del demonio de Maxwell». Una generación más joven de científicos empezó a considerar que el planteamiento de Einstein podía estar equivocado.

La mecánica cuántica fue creada por una docena de científicos brillantes que trabajaron codo con codo. Entre los que hablaron de demonios en sus trabajos, tenemos al matemático húngaro John von Neumann, considerado por algunos historiadores como «el hombre más inteligente que jamás haya existido»; los alemanes Max Planck (entre cuyos honores se encuentra haber bautizado la famosa constante universal de Planck designada por el símbolo h), Heisenberg (conocido por introducir el principio de incertidumbre que lleva su nombre), Max Born (galardonado con el premio Nobel por su interpretación estadística de las ondas cuánticas), Grete Hermann (una de las pocas mujeres del grupo), y los hermanos estadounidenses Karl y Arthur Compton. Todos estos científicos estaban de acuerdo sobre los fenómenos que observaban, pero seguían muy divididos en cuanto a su interpretación. Eso sí, estaban de acuerdo en algo: cuando el mundo se analizaba a escala humana o mayor, y aunque los efectos bizarros se atenuaban hasta ser estadísticamente insignificantes, discrepaban sobre el grado en que la física cuántica había de ser fundamental para comprender la realidad.

Einstein luchó toda su vida en contra de la interpretación que el físico danés Niels Bohr y sus aliados, llamada «interpretación de Copenhague», daban a algunos de esos extraños efectos. Según Einstein, las teorías usadas en materia cuántica eran incompletas, y había que seguir buscando otras mejores. Einstein

encabezó una cruzada no solo contra la interpretación de Bohr, sino contra las conclusiones de muchos otros de sus colegas. El que había sido revolucionario, ahora se encontraba de lado de los reaccionarios, enzarzado en un encarnizado debate con colegas de primer grado que empezaban a considerar que el universo podía esconder verdades capaces de dejar perplejo a cualquiera. Los dos bandos, uno liderado por Einstein y el otro por Bohr, también estaban divididos sobre los demonios. Hasta la fecha, las dos disciplinas se debaten sobre cuál de ellas es fundamental y debe ser coronada como la descripción adecuada de nuestro universo.

En el contexto de estas investigaciones, el ser de Laplace se bautizó con la palabra «demonio» y el de Maxwell se reinterpretó como una criatura con la capacidad limitada para manipular partículas subatómicas. A diferencia de estas dos criaturas, que ya eran de mayor edad, los demonios que operaban a escala cuántica prosperaban en el caos y lo reintroducían en el universo, prefiriendo vivir entre lo impredecible e indeterminado. Si la criatura de Laplace acataba la ley y los demonios de Maxwell la infringían, los demonios cuánticos la retorcían. Cuando se comparaban con los jóvenes novatos, los de Laplace y Maxwell parecían no ser capaces de lograr lo que antes se les había imputado.

Algunos empezaron a preguntarse por qué el demonio de Maxwell se cansaba y dejaba de operar: la información que necesitaba para actuar parecía tener un coste físico, pequeño pero inviolable. Otros especularon que tal vez su capacidad memorística era limitada, sus manos eran demasiado toscas o su vista era demasiado débil para manejar partículas mucho más pequeñas que los átomos. En tanto que los científicos se esforzaban por descubrir las raíces de las limitaciones de los demonios de Laplace y Maxwell, no solo empezaron a pensar de forma diferente sobre la relación entre la masa y la energía en el universo, sino sobre el propio conocimiento y el papel de la conciencia en nuestro entendimiento del universo. La fe en el conocimiento objetivo empezó a tambalearse.

Los fundamentos de la física moderna entraron en juego. La comunidad científica se dividió entre los que pensaban que, en base a lo que ocurría a escalas subatómicas, el universo era esencialmente impredecible, y los que, como Einstein, pensaban que su impredecibilidad era solo aparente y se debía a nuestro escaso conocimiento del misterioso *modus operandi* de estas partículas. Como los efectos cuánticos aparecían aleatoriamente, se consideraron una amenaza para el demonio de Laplace y la idea del determinismo.

Pero científicos como Einstein —que creían que el universo se regía por leyes determinísticas— no se dieron por vencidos y empezaron a imaginar otras criaturas capaces de burlar a los «demonios cuánticos». Estas criaturas podrían predecir la ubicación de las partículas cuánticas a la vez que su velocidad, eliminando la incertidumbre sobre estas medidas notada por Heisenberg. A algunos de estos demonios los llamaron «asistentes del demonio de Laplace». También se dedicaron a buscar «variables ocultas» que calificarían de determinista lo que se creía como esencialmente aleatorio. La búsqueda de estos demonios y de las «variables ocultas» marcó nuevas investigaciones en física cuántica. Su posible existencia llevó a varios científicos a debatir las conclusiones de la interpretación ortodoxa de la física cuántica.

¿Cómo de poderosos eran los demonios cuánticos? Tras años de minuciosas investigaciones, los científicos llegaron a la conclusión de que, en conjunto, las acciones de los demonios cuánticos eran casi indetectables. Sus efectos solo eran notables en casos únicos, pero en conjunto se camuflaban muy bien en las regularidades estadísticas; frente a los estudiosos tenían la coartada perfecta porque sabían cómo poner cara de póquer. Pero no por ser difíciles de detectar, inusuales y minúsculos se les podía descartar. Una pequeñísima partícula subatómica podía disponerse de tal manera que podría detonar una reacción en cadena creando una explosión gigantesca.

Así como los pequeños demonios de Maxwell podían crear efectos considerables, también los demonios cuánticos podían impactar en el universo a escalas mucho mayores que ellos. Una sola partícula subatómica podía generar el consabido efecto mariposa. Podía ser el guijarro que provoca una avalancha, la ficha de dominó que desencadena las demás en su senda de destrucción. Al indagar sobre el potencial de la energía atómica, los científicos se dieron cuenta de que los demonios cuánticos eran capaces de hazañas devastadoras. A diferencia de sus predecesores, estos demonios, como los religiosos o mitológicos, daban miedo.

RADIOACTIVIDAD

En cuanto se afianzó la termodinámica estadística molecular gracias al trabajo de

Maxwell, Boltzmann, Einstein y otros, el concepto del átomo empezó a desintegrarse. Nuevos elementos radiactivos parecían desprender energía sin perder masa. Estos ejemplos ponían en peligro las leyes de la termodinámica. El francés Henri Becquerel, uno de los primeros investigadores en descubrir la radiactividad, quedó cautivado por las propiedades del uranio, que emitía energía continuamente sin necesitar una fuente de energía externa y sin agotarse de forma mensurable. Poco después de Becquerel, Pierre y Marie Curie se enfocaron a estudiar estos extraños elementos. La radiactividad les parecía una fuente de energía inagotable, «contradiendo, al menos a priori, el principio de Carnot».

Los elementos radioactivos y sus propiedades aparentemente mágicas fascinaron a Einstein. En el último de los cuatro artículos de su *annus mirabilis* de 1905 explicó que el descubrimiento del radio demostraba la necesidad de replantearse la relación entre masa y energía. Más tarde, este trabajo fue reconocido por introducir la idea que culminaría expresándose con la famosa ecuación $E=mc^2$. En otro artículo publicado ese mismo año sobre los «cuantos» de luz, Einstein dio el pistoletazo de salida de la revolución cuántica, una revuelta tan radical que el propio Einstein no pudo con ella.

Durante los años previos a la Segunda Guerra Mundial, los científicos publicaron muchos textos en los que articularon las leyes de la mecánica cuántica en términos de las acciones de demonios. El autor de una carta al director de *Nature* explicó que las relaciones de incertidumbre podían considerarse la obra de un nuevo tipo de demonio que movía las partículas más deprisa que los demás.

La incertidumbre de Heisenberg podía deberse a los tejemanejes de un nuevo demonio travieso que no permitía medir el momentum de una partícula cuando se intentaba medir su posición. El escritor afirmaba que un destacado físico acababa de invocar el demonio de Maxwell para «ilustrar el principio de incertidumbre», describiendo a una pequeña criatura que jugaba con el momentum y la posición de una partícula como si estuviera en el tapete de un mago que mueve los dados dentro de dos cubiletes colocados bocabajo: «Convoquemos de nuevo al demonio y coloquémoslo en el rectángulo, donde desplazará el punto a otra posición». La zona de juego del demonio no era otra que $\hbar > \Delta p \Delta x$, donde \hbar era un factor de la constante de Planck. Pudiendo actuar diabólicamente en ese espacio, «la trastada del diablillo» no conllevaba «ningún cambio físico», ya que ninguno se podía medir o detectar a escala humana.

EL SABBAT DE LAS BRUJAS

En el Congreso Solvay de 1911, celebrado en Bruselas, los científicos se enfrentaban al desalentador reto de investigar la naturaleza a nivel subatómico. En el discurso inaugural, el físico Hendrik Lorentz reflexionó sobre el estado de la ciencia en esos momentos: «Hoy nos sentimos atrapados en un callejón sin salida, ya que las viejas teorías se muestran cada vez más impotentes para disipar la gran oscuridad que nos rodea». Pero Einstein, el físico más joven entre los invitados, estaba entusiasmado con los nuevos avances. En una carta a su mejor amigo, aludió a ese congreso profesional anual como el «sabbat de las brujas (Hexensabbat)».

El físico alemán Max Planck sorprendió a los asistentes centrando su conferencia no en los átomos, sino en los cuantos de energía, que eran mucho más pequeños. Más adelante, Born describió la idea de Planck como «la más revolucionaria que jamás haya golpeado a la física». Marie Curie, la única mujer de la conferencia, escuchó a su colega Max Planck presentar sus revolucionarios estudios sobre los cuantos de energía. Ella se puso a pensar de inmediato en un nuevo demonio, análogo al de Maxwell, capaz de manipular esos paquetes de energía radiante. Intervino en el debate, describiendo un nuevo demonio similar al de Maxwell, pero capaz de manipular los paquetes de energía radiante descritos por Planck.

Curie comenzó con una observación curiosa, preguntándole a Planck por la velocidad de emisión de los cuantos de energía: «Monsieur Planck, ¿usted supone que un elemento de energía se emite de forma instantánea?». De ser así, la velocidad de los procesos que conducen a la desintegración radiactiva tendría que ser superior a la de la luz. También planteó la posibilidad de que existiera un «mecanismo que permitiera interrumpir esa emisión»: «Es muy probable que dicho mecanismo no exista a nuestro nivel, sino que sea semejante a los demonios de Maxwell». Del mismo modo que los demonios de Maxwell podían hacer el trabajo a nivel molecular, el demonio concebido por Marie Curie podría funcionar a nivel cuántico: «Nos permitiría obtener diferencias debido a las leyes de radiación descritas estadísticamente, igual que los demonios de Maxwell nos permiten obtener diferencias debido a las consecuencias de los principios de

Carnot».

Empezaba a abrirse un nuevo mundo de posibilidades. En 1913 The New York Times anunció las nuevas noticias sobre la radiactividad con un titular sensacionalista: «La ciencia, a punto de revolucionar toda la existencia». La posibilidad de frenar la degradación y disipación general de la energía empezaba a fascinar a muchos investigadores. El químico británico Frederick Soddy, que continuó el trabajo de los Curie y de Becquerel, señaló: «Parece que la radiactividad reclama un parentesco con mundos más allá del nuestro. [...] Por lo que parece, las sustancias radiactivas culminan la hazaña científicamente imposible de desarrollar un almacén de energía de la nada». ¿Habían por fin encontrado en ellas «un suministro perenne de energía»? Los estudios preliminares indicaban que el radio era capaz de emitir «luz y calor como la lámpara de Aladino y, a priori, desafiar la ley de la conservación de la energía, planteando cuestiones físicas presuntamente imposibles de contestar». La radiactividad había revivido el antiguo sueño de crear una máquina de movimiento perpetuo: «Muchas veces, la fuerza motriz de la maquinaria del mundo moderno es misteriosa, pero las leyes de la energía establecen que nada funciona por sí solo. Nuestra experiencia, pese a todas las máquinas de movimiento perpetuo que los inventores han afirmado haber construido, confirmó esa tesis hasta que nos encontramos cara a cara con el radio». Soddy advirtió que ese elemento mágico ya no era el radio que se conocía anteriormente, ya que nos acercaba un poco más a un sueño imposible: «La “imposibilidad física” de una era se convierte en el lugar común de la siguiente», concluyó con optimismo.

¿Cómo era el mundo subatómico? ¿Qué vería un minidemonio, uno mucho más pequeño que el de Maxwell? ¿Qué nos enseñaría sobre el universo? Después de muchas investigaciones, Soddy y su estrecho colaborador Ernest Rutherford, ganador del Nobel de Química, determinaron que la radiactividad no violaba la ley de conservación de la energía. Rutherford, experto mundial en los entresijos del átomo, consiguió indagar en el interior del átomo disparando partículas subatómicas procedentes de sustancias radiactivas contra una fina lámina de oro. Llegó a una sorprendente conclusión: los átomos estaban formados por un núcleo pesado rodeado de electrones mucho más ligeros.

El filósofo C. D. Broad, que seguía de cerca los trabajos de Rutherford sobre «la división experimental de los átomos», se sintió cada vez más intrigado por lo que ocurría en el interior de los átomos. En las Conferencias Tarner de 1923,

celebradas en la Universidad de Cambridge, Broad pidió a sus oyentes que le siguieran en un curioso experimento mental para adentrarse cada vez más en el inframundo del átomo hasta acercarse a su mismísimo núcleo: «Sustituyamos a sir Ernest Rutherford por un arcángel matemático». Si imagináramos «un arcángel matemático dotado del poder adicional de percibir la estructura microscópica de los átomos con la misma facilidad con que nosotros percibimos los pajares de hierba», ¿qué descubriría? Si «con su conocimiento de la estructura microscópica de los átomos el arcángel pudiera deducir todos estos hechos», obtendría información muy codiciada, pero probablemente perdería otros conocimientos.

Un ser que conociera el mundo interno de los átomos no podría percibir otros aspectos esenciales del mundo a escala humana, como el color, el olor y la temperatura. Broad admitió que algunas de sus conclusiones debían parecer un tanto «acientíficas y supersticiosas» pero insistió en que el reino subatómico probablemente revelaría grandes sorpresas. En ese contexto, dijo: «No conozco ninguna razón por la que no deban aparecer nuevos y teóricamente impredecibles modos de comportamiento». Pronto aparecieron.

EL EXPERIMENTO DE LA DOBLE RENDIJA

Un experimento en particular llevó a los científicos a considerar nuevos tipos de demonios que pudieran estar interfiriendo con el mundo subatómico. El «experimento de la doble rendija», como ya lo conoce la historia, ha fascinado a científicos, filósofos y a la gente común. El experimento es fácil de preparar. Consiste en dirigir un haz de luz o de electrones a una pantalla con dos aberturas (rendijas) por las que pueden pasar los rayos. En un primer ensayo, se dejan pasar los rayos a través de las dos rendijas; en la otra, se cierra una de las hendiduras. Cuando las dos rendijas están abiertas, los resultados muestran un patrón de interferencia en la pantalla como si los rayos viajaran en ondas. Cuando solo se abre una, el patrón de interferencia desaparece, y el patrón en la pantalla equivale a uno emitido por partículas.

El experimento demuestra que los rayos de fotones o electrones se comportan de una manera si se detecta su paso por una de las dos rendijas, y se comportan de

otra si no se detectan por qué rendija pasan. En un caso actúan como ondas y crean patrones de interferencia en la pantalla, y en el otro actúan como partículas y el patrón de interferencia desaparece. Parecen comportarse de forma diferente dependiendo de sus opciones a futuro y de si, curiosamente, van a encontrarse con una o dos rendijas. Lo único que queda claro es que, cuando las dos rendijas están abiertas, las partículas pasan por cada una exactamente la mitad de las veces. ¿Cómo puede saber un fotón o un electrón qué va a encontrar a posteriori (si va a enfrentarse a una sola rendija o a dos) para alterar su comportamiento y actuar como onda o como partícula? ¿Cómo puede saber actuar como partícula en caso de tener una opción a futuro y como una onda en caso de tener dos?

La explicación más popular para el extraño comportamiento de las partículas cuánticas llegó de la mano de Bohr y sus aliados del instituto de Copenhague. Según ellos, los fotones, los electrones y todo lo que hay en la naturaleza tiene dos aspectos, son partícula tanto como onda, una idea conocida como complementariedad y dualidad onda-corpúsculo.

Esta dualidad es más fácil de ver en el mundo cuántico, pero también existe a escalas mayores. Bohr abogaba por explicaciones basadas en el principio de la no localidad (que ya no consideraba que los electrones y los fotones estuvieran localizados en el tiempo y el espacio, sino dispersos) y también defendía los principios de indeterminación e incertidumbre sosteniendo que algunas propiedades de las partículas subatómicas no podrían conocerse nunca con precisión exacta. Cualquier simple medición altera los resultados de cualquier experimento; además, una vez superado cierto límite, no se puede conocer con precisión todo lo relacionado con una partícula, incluidos aspectos como la posición y el momentum. El demonio de Laplace podía meter las narices en casi todas partes, excepto en esa porción del reino cuántico.

EINSTEIN CONTRA BOHR

La explicación de Bohr sobre el experimento de la doble rendija desconcertó y turbó mucho a Einstein. El alemán expresó su malestar a su buen amigo Max Born, que trabajaba sobre el tema y lo interpretaba de manera similar a Bohr:

«Pensar que un electrón sometido a un rayo pueda elegir libremente el instante y

la dirección en los que quiere salir rebotado me resulta intolerable».

Para Einstein, la idea que algunos de sus colegas se hacían del experimento era descabellada. Sus explicaciones asumían que la naturaleza actuaba de formas extrañamente impredecibles, o peor aún, de una forma extrañamente animada en relación con nuestras acciones, pintando a la naturaleza física como conectada a las conciencias vivas. Einstein creía que tenía que haber explicaciones mejores, más sensatas y completas. Según él, si se aceptaban estas interpretaciones, nuestro entendimiento quedaba incompleto. Dedicó el resto de su vida a buscar leyes determinadas que explicaran adónde iban todas las cosas (incluidos los fotones y los electrones) y dónde se encontraban en un lugar en un momento dado, pero no logró encontrarlas. Una nueva generación discrepaba con él, creyendo que debería rendirse y aceptar la nueva ciencia, por más incompleta que le pareciera, y dejar de buscar causas ocultas o explicaciones alternativas. En una carta a Born, Einstein admitió: «El asunto de la causalidad también me atormenta mucho» y nunca «renunciaría a la causalidad completa». Explicó a Born que todo el propósito de la ciencia, todo el sentido de ser un científico, era luchar contra el indeterminismo. «Preferiría ser zapatero o incluso empleado de un casino antes que físico», dijo, indicando que prefería abandonar la profesión que le había hecho famoso antes que capitular ante las nuevas ideas fundadas en leyes acausales que brotaban a su alrededor: «Hasta que no se hayan probado contra ella defensas totalmente distintas de las que se han utilizado hasta ahora, no me veré forzado a abandonar la causalidad estricta».

Born no tenía tales escrúpulos. Siguió con sus investigaciones y cambió la ciencia con una idea merecedora del premio Nobel, alterando para siempre nuestra comprensión del universo: las ondas cuánticas, según él, eran de naturaleza estadística. A diferencia de las ondas clásicas, como las de agua y de cuerdas, argumentó que las ondas de la mecánica cuántica solo contenían información sobre la probabilidad de encontrar una determinada partícula en cierto lugar. Según Born, la inspiración de su descubrimiento le llegó tras «un comentario de Einstein».

En un artículo publicado en la prestigiosa *Zeitschrift für Physik* (1926), Born reveló que la observación de Einstein le había hecho interpretar estadísticamente las ondas cuánticas. Einstein «dijo que las ondas están ahí solo para guiar el cuanto de luz corpuscular y, en este sentido, habló de un “campo fantasma” [Gespenterfelder]» o, literalmente, de una onda fantasma. En ese momento, Born estaba intentando comprender por qué las ondas de las partículas cuánticas

diferían de las clásicas y parecían extenderse al infinito, afectando a otros objetos a distancia aunque no tuvieran energía ni momentum.

Born notó su efecto aparentemente mágico sobre las cosas, ya que podían determinar «la probabilidad de que un cuanto de luz, que transporta energía y momento, siga un determinado camino, aunque el campo en sí no tenga energía ni momentum». Investigar el Gespensterfeld o, mejor, la «onda piloto» (Führungsfeld), como la rebautizaría el físico, llevó a Born a interpretar estadísticamente las ondas cuánticas. En una carta a Einstein, dijo: «La idea de considerar el campo de ondas de Schrödinger como un Gespensterfeld, en el sentido que le das a la palabra, resulta cada vez más útil». Born tomó las críticas de Einstein como una oportunidad: su interpretación estadística explicaba a la perfección el comportamiento aparentemente «fantasmal» de estas ondas.

El siguiente gran avance en este campo se produjo al año siguiente, durante el Quinto Congreso de Solvay de 1927. Arthur Compton y el aristocrático científico francés Louis de Broglie, conocido por sus trabajos sobre las ondas cuánticas que pronto le valdrían el premio Nobel, consideraron la mecánica cuántica en términos de las «ondas piloto» (que Einstein había llamado «ondas fantasma»).

Cuando Compton y De Broglie presentaron sus tesis, Einstein permaneció callado. Él y algunos otros científicos esperaban que el comportamiento de las partículas y ondas subatómicas pudiera entenderse de forma dinámica, y no solo estadística. Al llegar la noche, se enfrascó contra Bohr en un acalorado debate sobre los nuevos avances.

La crítica de Einstein pronto se topó con un nuevo obstáculo. Ese mismo año se publicó el rompedor artículo de Heisenberg articulando el principio de incertidumbre, según el cual la posición y el momentum de una partícula subatómica nunca podrían conocerse más allá de ciertos límites. Bohr, al contrario que Einstein, quedó encantado con el logro de Heisenberg. Desarrolló todas sus implicaciones en el Congreso Internacional de Física celebrado a orillas del lago de Como.

Ante la posibilidad de que algunas cosas del cosmos fueran intrínsecamente impredecibles, Einstein siguió protestando. En los debates que mantuvo con Bohr ese mismo otoño, Einstein pronunció su famosa máxima: «Dios no juega a los dados con el universo».

Bohr replicó con una petición menos famosa, pero quizás más sensata: pidió por favor a Einstein que dejara de decirle a Dios lo que tenía que hacer. Mientras la incertidumbre cuántica se basara en resultados que solo se podían entender estadísticamente, Einstein se negaría a considerarla completa. Según él, si pudiéramos procesar todos los datos, nada quedaría en manos del azar. Born alegó: «Su convicción parece haber sido siempre que las leyes últimas de la naturaleza son causales y deterministas, y lo sigue siendo»; y aseguró que, para Einstein, «la probabilidad sirve para compensar nuestra ignorancia. [...] Solo la inmensidad de esa ignorancia impulsa la estadística al primer plano». A pesar de todas sus discrepancias, Bohr siempre recordó a Einstein con cariño, sobre todo por «su uso constante de frases tan gráficas como la de las “ondas fantasma” (Gespensterfelder) que guiaban a los fotones».

La mecánica cuántica no tardó en influir en la investigación sobre la naturaleza de la lógica y las matemáticas. A raíz de los nuevos estudios sobre radiactividad, la teoría cuántica y movimiento browniano, el matemático Richard von Mises, director y profesor del Instituto de Matemáticas Aplicadas de la Universidad de Berlín y posteriormente catedrático de la Universidad de Harvard tras su exilio debido a la subida de los nazis al poder, vio clara una cosa: para comprender bien las nuevas matemáticas estadísticas, había que dejar atrás conceptos anticuados de lógica matemática.

Para él, la estadística ya no era solo un atajo conveniente para manipular grandes cifras y analizar efectos que aún no se entendían del todo. Los nuevos descubrimientos de la física mostraban que la propia estadística reflejaba el estado real del mundo de una forma más precisa y pertinente que las antiguas matemáticas. A medida que los matemáticos y lógicos incorporaron la idea del indeterminismo cuántico a sus campos, empezaron a calificar de deficientes las técnicas matemáticas tradicionales asociadas con Laplace, tachando su influencia como la de un demonio.

Para Mises, la búsqueda de conocimientos cada vez más precisos de toda la naturaleza a través de la medición y el cálculo había sido motivada por nuestra creencia en un «demonio matemático» surgido de las especulaciones de Laplace: «La formulación más extrema del determinismo de Newton se encuentra en la idea de Laplace de un “demonio matemático”, un espíritu dotado de una capacidad ilimitada para la deducción matemática que sería capaz de predecir todos los acontecimientos futuros del mundo si en un momento dado conociera todas las magnitudes que caracterizan su estado actual». En una nota a pie de

página, Mises señalaba que «Der Laplacesche “Dämon”» había aparecido por primera vez en el *Essai philosophique* de Laplace. Según su argumentación, ese demonio y la idea de causalidad que sostenía no eran más que un prejuicio de dos siglos de duración. Ya no tenía sentido intentar llegar a la verdad midiendo y calculando con mayor precisión. En su opinión, las matemáticas debían reflejar esa realidad incierta subyacente.

Con el concepto de la causalidad ya en duda, los ideales tradicionales de exactitud, precisión y finalidad parecían romperse sin remedio. Pasando cierto umbral, los intentos de obtener conocimientos más precisos se revertían en contra de los investigadores. «En lugar de encontrar algo que, desde el punto de vista de la física clásica, sea más simple que el fenómeno original, llegamos a fenómenos cada vez más complicados desde un punto de vista determinista», explicó Mises. En una publicación posterior, el matemático especuló sobre el motivo por el que el Dämon de Laplace había estado tan ligado al desarrollo de la astronomía desde su nacimiento. Aunque en la esfera celestial sus poderes eran notables, era mucho más difícil concebirlo como un operador eficaz del planeta Tierra, con todas sus complejidades: «Al crear su “demonio”, probablemente Laplace pensó que encontraría bastantes más dificultades para completar su tarea en la Tierra que en los cuerpos celestes».

Los problemas terrenales que acosaban al demonio de Laplace eran cada vez más graves. El filósofo Ernst Cassirer abrió su *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik* con un capítulo centrado en el demonio de Laplace como punto de partida obligatorio: «En cualquier debate sobre el problema general de la causalidad planteado por el estado actual de la física atómica, la imagen ideada por Laplace ha desempeñado un papel importante, por no decir decisivo». Como muchos de sus contemporáneos, él sostenía que la objetividad científica ya no necesitaba basarse en los viejos ideales de certeza absoluta derivados del Laplace'sche Geist: «Si empiezo con la imagen del Geist de Laplace, no es por considerar que la conexión sea lógicamente apropiada, ni tampoco particularmente apta en términos psicológicos, sino justo por la razón contraria».

¿Qué pasaría si cada vez más científicos y matemáticos dejaran de creer en la causalidad estricta? Otros demonios podrían aprovecharse de su debilidad. «Apenas podemos negar la acusación de que, aboliendo el criterio de causalidad, estamos abriendo la puerta a los demonios del salvaje», advirtió Eddington. Pero eso no impidió a la mayoría de sus colegas dar la bienvenida a esos demonios,

invitándolos a la gran fiesta de la ciencia. Los nuevos estudios sobre la radiactividad no hicieron más que contribuir a su causa. Durante el Congreso Nacional del Radio de 1928, la máxima autoridad en salud pública de EE. UU. dijo a los oyentes que el radio le recordaba «a un superser mitológico». En esos años, ese ser seguía siendo más débil que la hipotética criatura gigante de Laplace y más débil que el diminuto demonio de Maxwell, que se cansaba con mucha facilidad y apenas podía incidir en el mundo a escala humana. Pero no lo fue durante mucho más tiempo. Los demonios, como vemos, aparecían, crecían y mutaban a toda velocidad.

EL EXORCISMO DE SZILÁRD

En Berlín, un estudiante llamado Leó Szilárd se había trasladado a la capital alemana desde Hungría para terminar sus estudios de ingeniería interrumpidos durante la guerra. Ahí perseguía una *idée fixe* que le traería fama y fortuna: la posibilidad de fabricar una máquina de movimiento perpetuo. Tras conocer a Einstein, el joven se pasó a la física y se convirtió en uno de sus más estrechos colaboradores.

Szilárd sobresaldría por crear una de las primeras reacciones en cadena nucleares (de hecho, fue el primero en patentar el proceso en cadena para liberar la energía nuclear); por escribir la carta enviada y firmada por Einstein al presidente Roosevelt advirtiéndole de las consecuencias de construir una bomba atómica; por ser uno de los científicos más importantes del Proyecto Manhattan, y por enfurecer continuamente al general Leslie Groves a cargo del proyecto.

Pero antes, Szilárd se dedicó en cuerpo y alma a entender por qué una máquina nunca puede producir más trabajo del que gasta. Explicó las razones en una solución muy original publicada en la prestigiosa revista *Zeitschrift für Physik*, ampliamente conocida como «el exorcismo de Szilárd». En su solución, describía un modelo teórico para un motor muy eficiente que recibiría la denominación «motor de Szilárd» o «demonio de Szilárd». Nadie antes había podido entender tanto como él qué era lo que prevenía la subversión total de la segunda ley de la termodinámica y qué permitía al demonio de Maxwell funcionar entre sus límites. Szilárd determinó que lo único que necesitaba el

demonio de Maxwell para actuar eficazmente era un puntual conocimiento del estado físico alrededor del cual podía obtener con una simple medición; aunque obtener tal información no salía gratis.

Cuando Einstein conoció a Szilárd, quedó impresionado por el joven estudiante. Como suele hacer cualquiera con más años de experiencia, Einstein advirtió a su protegido de que no diera mucha bola a ideas fantasiosas y ambiciosas: «No es bueno que un científico se dedique a poner huevos de oro», le advirtió. En vez de animarle a perseguir sueños aparentemente imposibles, Einstein exhortó a Szilárd a buscar ingresos estables y un empleo. Incluso podía encontrar trabajo en una oficina de patentes, como él mismo había hecho cuando era más joven. Pero, a pesar de los sensatos consejos que Szilárd recibió de su maestro y mentor, el joven advenedizo siguió persiguiendo su castillo en el aire.

El exorcismo de Szilárd se publicó en 1929 con un largo título, traducible como «Sobre la disminución de la entropía en un sistema termodinámico por la intervención de seres inteligentes». Su texto cambió la forma en que los científicos pensaron en el demonio de Maxwell durante el resto del siglo. Su tema principal era similar al que había fascinado a Maxwell y compañía: ¿un ser inteligente podía reducir la entropía? Szilárd releyó el trabajo de Smoluchowski sobre el movimiento browniano y citó su idea esencial: «Por lo que sabemos hoy, no existe ninguna máquina de movimiento perpetuo automática y permanentemente eficaz, a pesar de las fluctuaciones moleculares, pero quizás un dispositivo así podría funcionar con regularidad si fuera manejado adecuadamente por seres inteligentes». Pero ¿por qué? ¿Qué tienen de especial los «seres inteligentes»? ¿Qué hace que solo ellos posean esas capacidades?

En su artículo, Szilárd analizó los proyectos para fabricar máquinas de movimiento perpetuo a partir de movimientos aleatorios y fluctuantes. En esos casos, determinó que nuestra capacidad para aprovechar el trabajo no era mejor que la que nos brindaba el azar: «Estamos en la misma situación que ante un juego de azar, en el que de vez en cuando podemos ganar, pero el valor esperado de ganar es cero o negativo». Una vez introducida la inteligencia, ¿había más posibilidades de ganar? ¿Podía utilizarse la inteligencia para derrotar al azar? De ser así, ¿hasta qué punto podríamos emplear nuestro ingenio para escapar de los tentáculos del destino entrópico?

Szilárd investigó cuidadosamente las conclusiones a las que había llegado Smoluchowski. Podría construirse esa máquina si los «seres inteligentes» que la

manejan y se aprovechan de las fluctuaciones no se consideraran parte del sistema. Según Szilárd: «Si consideramos al hombre experimentador una especie de *deus ex machina*, una máquina de movimiento perpetuo sería posible». El físico húngaro subrayó que las limitaciones para construirla no tenían nada que ver con que los humanos no fueran lo bastante pequeños o no «poseyeran la capacidad de atrapar moléculas individuales como el demonio de Maxwell». Entonces, ¿qué es exactamente lo que parece conferir a los seres inteligentes la facultad de actuar como ese *deus ex machina*? El operador inteligente requerido no tendría que ser diminuto y ágil; solo ser alguien que estuviera «continua y exactamente informado del curso existente de la naturaleza y que fuera capaz de iniciar o interrumpir el curso macroscópico de la misma sin ningún gasto de trabajo».

Szilárd señaló que «una especie de facultad memorística» se necesitaba para medir. Esa actividad no era gratuita. El físico determinó que, si se instalaba una pared semipermeable entre dos tabiques para seleccionar las moléculas de las que se podía extraer trabajo, «ese simple dispositivo inanimado puede lograr el mismo resultado que se obtendría con la intervención de seres inteligentes». Pero esa intervención «inteligente» no sería capaz de crear un suministro inagotable de energía porque gastaría tanta en «medir» las moléculas como la que obtendría extrayendo trabajo de ellas.

Szilárd imaginó un ser inteligente arrancando su motor solo en los momentos más favorables y apagándolo en los demás. Los resultados parecían tan buenos que no podían ser auténticos. Szilárd admitió que, «mientras permitamos a los seres inteligentes realizar la intervención, no será posible una prueba directa» para contabilizar los gastos totales de tal operación.

El físico húngaro llegó a la pesimista conclusión de que, sustituyendo al ser inteligente por un dispositivo mecánico —como un filtro, una válvula o una membrana semipermeable—, se podría generar «exactamente esa cantidad de entropía que exige la termodinámica», ni más ni menos. Pero el sustituto mecánico propuesto por Szilárd no parecía ser inteligente de verdad. Otros científicos tardaron poco en idear formas de eludir las limitaciones del motor de Szilárd, alegando que una verdadera inteligencia podría hacer más de lo que podía hacer un mero filtro, válvula, o membrana semipermeable.

En California, en la Costa Oeste de Estados Unidos, se estaba explorando otra forma de obtener fuentes de energía potencialmente inagotables. En la Facultad

de Química de la Universidad de California en Berkeley, el eminente científico Gilbert Newton Lewis empezó a pensar más detenidamente en el demonio de Maxwell. Lewis empezó a explorar esas cuestiones tan trascendentales en «La simetría del tiempo en la física», publicado en 1930 en Science. Allí llegó a conclusiones parecidas a las de Smoluchowski y Szilárd: «Sin la ayuda de dispositivos demoníacos, [cualquier método] requiere por lo menos el mismo trabajo que el anticuado método termodinámico de forzar al sistema a la distribución particular». Lewis consideró el caso de las moléculas individuales: «En el caso más simple, si tenemos una molécula que debe estar en uno de dos recipientes, la entropía se hace menor que $k \ln 2$ si sabemos cuál es el recipiente en el que está atrapada». Según él, esa unidad simbolizaba la cantidad mínima de energía necesaria para conocer algo.

Una frase de Lewis se hizo muy célebre entre los investigadores posteriores: «El aumento de la entropía siempre implica una pérdida de información, y nada más». La cantidad era pequeña, pero ya no era despreciable, pues la ciencia había avanzado mucho en su estudio del reino atómico y el subatómico: «Al estudiar las moléculas individuales, quizás nos estemos arrogando los privilegios del demonio de Maxwell; pero en los últimos años, y sin querer ofender a nadie, los físicos se han convertido en demonios».

El artículo de Lewis apareció un año después del de Szilárd y empezaba imaginando un dispositivo de filtrado. Durante la Primera Guerra Mundial, Lewis había trabajado en las unidades de gas y guerra química del ejército, donde se solían utilizar los cilindros divididos por filtros (o «membranas semipermeables») para separar distintos elementos. Ese filtro tendría forma de «cilindro cerrado en ambos extremos y con una pared central provista de obturador». ¿Se podría construir un dispositivo que permitiera deshacer las mezclas? En caso afirmativo, las sustancias separadas podrían reutilizarse como combustible renovable. Ahora bien, separar isótopos de un mismo elemento era mucho más complicado. Al poco tiempo, Lewis y sus colaboradores empezaron a buscar la forma de separar los pequeños porcentajes del isótopo uranio-235, altamente reactivo, mezclados con el uranio-238, más estable. Su propósito era construir una bomba.

Lewis llevó el experimento del demonio a un escalón superior. Sus investigaciones sobre el demonio de Maxwell incidieron cada vez más en la cosmología, pero también en cuestiones filosóficas más amplias sobre la esencia de la vida y su relación con la física y la conciencia. Para mejor entender las

habilidades del demonio de Maxwell, Lewis lo contrapuso con seres vivos, unos completos y otros desprovistos de ciertos órganos.

Empezó por comparar procesos mecánicos con la conducta de ratones sanos, y de estos, con la de ratones privados del sentido de la vista, del oído, olfato, tacto y gusto. ¿Cómo usaban la «información» para actuar de forma distinta a los sistemas mecánicos?: «He aprendido que se puede operar el cerebro de los ratones para que no respondan a ningún estímulo externo, pero que sigan moviéndose». Su movimiento aleatorio conduciría al equilibrio: «Si se coloca un gran número de esos ratones en un extremo de una caja, el extremo se vuelve más pesado que el otro». Los ratones pronto deambularían de un lado a otro y más o menos la mitad de ellos llegaría al otro extremo. «Esta distinción desaparece enseguida a medida que, con sus movimientos aleatorios, los ratones cubren con gran uniformidad la base de la caja, de modo que ya no podemos discernir ninguna tendencia de la caja en un sentido u otro».

Lewis descubrió que los ratones privados de tal sensibilidad actuaban como moléculas aleatorias, pero la mayoría de los seres sensibles no eran como esos conejillos de Indias operados quirúrgicamente. ¿Qué diferencia había exactamente? Lewis volvió a plantearse el viejo enigma cartesiano: determinar cuál era la diferencia concreta entre los sistemas puramente mecánicos, los vivos, y los inteligentes. La respuesta tenía que elucidar la relación entre entropía, información y inteligencia. «A menos que los seres sensibles tuvieran el poder de desafiar la segunda ley de la termodinámica», la entropía se filtraría en el sistema y lo haría incapaz de producir trabajo por sí mismo. Su expresión «a menos que» generó expectación y fascinación durante décadas.

AMPLIFICACIÓN DE LOS EFECTOS CUÁNTICOS

En otoño de 1930, pocos días después del espectacular triunfo nazi en las elecciones federales alemanas, Szilárd escribió a Einstein lamentando el empeoramiento de la situación política. Al otro lado del Atlántico, en los Estados Unidos, la bolsa se había desplomado, la economía iba de caída y hasta los días se habían oscurecido por culpa del Dust Bowl. Pronto la Gran Depresión se extendió a gran velocidad por el resto del mundo.

A comienzos de los años treinta, la situación económica y política mundial llegó a ser tan funesta que las tentadoras ofertas de los Mefistófeles de laboratorio eran cada vez más dignas de atención. Europa estaba al borde de otra guerra mundial. «Cada semana detecto nuevos síntomas», escribió Szilárd a Einstein: «Si mi intuición no me engaña, no contemos con que reine la paz en Europa en los próximos diez años».

¿Cómo se entendían esos hechos históricos tan imprevistos? Szilárd respondió aliándose con Einstein para luchar contra la degradación en términos literales. Mientras publicaba artículos de física teórica, Szilárd trató de desarrollar una forma práctica de eludir las leyes de la termodinámica ideando y patentando una novedosa tecnología para fabricar un frigorífico más eficiente.

Mientras que la entropía conducía naturalmente al equilibrio de temperaturas, el frigorífico creaba el efecto contrario: las temperaturas se enfriaban dentro de un recinto bien aislado. A finales de ese año tan agitado, Einstein y Szilárd habían presentado treinta y siete solicitudes de patente y veintiocho de ellas habían sido aprobadas. Cuando vendieron algunas a Electrolux en Estocolmo y a otras empresas de Europa y Estados Unidos, se embolsaron unos beneficios que necesitaban como agua de mayo. Quizás Einstein y Szilárd tuvieran que trasladarse o exiliarse: «no sé si podremos construir nuestro frigorífico en Europa». Un frigorífico no iba a salvar el mundo, pero la radiactividad y la transmutación atómica prometían proezas superiores.

La comunidad científica estaba dividida en trincheras ideológicas, e incluso metafísicas. Los fundamentos filosóficos de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad parecían cada vez más incompatibles. ¿Era posible un experimento que ayudara a los científicos a decidir si debían respaldar el programa de Einstein de seguir buscando leyes deterministas, o bien conformarse con la «interpretación de Copenhague» de Bohr? ¿Un experimento como ese tendría el potencial de esclarecer lo que estaba ocurriendo en el mundo durante una compleja encrucijada histórica? ¿Cómo se podrían aprovechar los efectos cuánticos para lograr actuar a escala humana o mayor? En una época en la que se debatían algunos principios básicos de la ciencia, los científicos promovieron nuevas investigaciones que parecían tener más probabilidades de mejorar el mundo que de destruirlo. Al menos, así fue hasta que la situación política de Europa se fue complicando.

LOS DEMONIOS CUÁNTICOS DE COMPTON

En 1926 y 1927, Karl Compton y su hermano Arthur estuvieron en la meca de la física teórica de Born, en Gotinga, donde se cruzaron con Robert Oppenheimer. Al regresar a Estados Unidos, sus carreras despegaron. Arthur ganó el premio Nobel ese mismo año por su trabajo con los fotones dispersados por electrones, un efecto que ahora se conoce como «dispersión Compton». Karl se convirtió en presidente del MIT y desempeñó un papel clave en el desarrollo de la bomba atómica. En ese empeño tuvo la ayuda de Arthur, que apoyó enérgicamente la fabricación y el uso de la bomba atómica y dirigió la fabricación de la primera reacción nuclear en cadena autosostenida en la Universidad de Chicago.

Cuando se habla de la bomba atómica, se suele destacar un selecto grupo de científicos liderados por Einstein y Oppenheimer. Pero aunque Oppenheimer se suele reconocer como «el padre de la bomba atómica», lo cierto es que era un físico teórico poco conocido contratado mucho después de que se hubieran tomado algunas de las decisiones clave del proyecto. Los hermanos Compton movían los hilos entre bambalinas y no solían ser los que la prensa más ensalzaba, ya que rehuían la atención de los medios, pese a ser los verdaderos responsables de movilizar a un equipo para fabricar una nueva arma atómica.

Mientras que Einstein, Oppenheimer y otros científicos judíos recién emigrados de Europa tendían más a la izquierda, los hermanos Compton eran descendientes de británicos y presbiterianos. Tanto ellos como Henry deWolf Smyth, su compañero en Princeton, eran miembros de confianza de un estrecho círculo de colaboradores bien curtidos y bastante afines del que también formaban parte James Conant, presidente de la Universidad de Harvard, y Vannevar Bush. (Como vicepresidente del MIT, Bush fue el primer asesor científico presidencial y director del Comité del Uranio encargado de analizar la posibilidad de construir una bomba).

Smyth y los Compton tenían línea directa con las más altas esferas del Gobierno, algo vedado a los extranjeros, como Einstein, potencialmente antipatrióticos. El presidente Franklin D. Roosevelt escuchaba con atención las valoraciones de los Compton sobre la posibilidad de fabricar una bomba y sobre las posibilidades de que los nazis también la fabricaran. Smyth colaboró con los brillantes hermanos, primero como investigador de armas radiactivas sucias y, luego, como el

responsable en escribir el informe oficial sobre el origen de la bomba atómica presentado al público después de su detonación sobre Hiroshima y Nagasaki. En este informe oficial, Smyth habló de cómo el deseo de crear una máquina de movimiento perpetuo que pudiera gastar más energía de la que consumía había llevado a los científicos a descubrir la energía atómica.

A Einstein le habría venido bien tener aliados en Estados Unidos, pero Arthur Compton se oponía de plano a su programa y prefería el de Bohr. Los argumentos de Bohr en contra de Einstein se basaban en la investigación sobre la «dispersión Compton» que le había valido el premio Nobel a Arthur.

Al estudiar el efecto que llevaba su nombre, Compton había imaginado demonios cuánticos capaces de manipular esas diminutas partículas. Equipados con cartuchos de dinamita capaces de generar explosiones mucho mayores, los demonios cuánticos de Compton podían permitir el desencadenamiento de la carga explosiva o intervenir para evitarla. El físico conjeturó que el «libre albedrío» podría funcionar de forma similar, dándonos el poder de crear grandes efectos en el mundo exterior.

En un debate sobre el principio de incertidumbre y el libre albedrío publicado en un número de Science de 1931, Compton describió un ingenioso experimento para amplificar los efectos cuánticos utilizando una célula fotoeléctrica activada por un fotón para hacer estallar un cartucho de dinamita. Los científicos sabían que, si los fotones se dirigían hacia una doble rendija, la mitad de las veces pasarían por la derecha y la otra mitad, por la izquierda. Si solo una de las rendijas estaba conectada a un explosivo, este estallaría el cincuenta por ciento de las veces. «Con amplificadores adecuados podemos hacer que, si el primer fotón entra en la célula A, explote un cartucho de dinamita (o se realice cualquier otro evento a gran escala), y que, si el primer fotón entra en la célula B, se abra un interruptor que impida la explosión».

¿Qué lecciones sobre el universo se podían deducir de tal experimento? La mayoría de los físicos estarían de acuerdo en que, en ese experimento, habría «las mismas probabilidades de que se produjera la explosión que de lo contrario». Al igual que otros físicos cuánticos, Compton sostenía que la incertidumbre estadística no derivaba de nuestra ignorancia de los efectos causales subyacentes, sino que era un hecho fundamental de la naturaleza y, más allá de eso, podía tener consecuencias a escala humana. Pero Compton recalcó que la verdadera moraleja del experimento era otra: nunca podrían conocerse las

probabilidades de que el explosivo estallara más allá del cincuenta por ciento. «Es decir, el resultado es impredecible a partir de las condiciones físicas». Pero no por eso era impredecible para otro tipo de ser con otras cualidades físicas. Algo o alguien podría estar dirigiendo a los fotones a pasar por una parte de la doble rendija en vez de otra.

Para llegar a esas conclusiones, Compton se inspiró en la labor del biólogo y fisiólogo canadiense Ralph Lillie, que estudió detenidamente el demonio de Maxwell y llegó a la conclusión de que el principio de incertidumbre de Heisenberg ofrecía un cierto margen de maniobra para que un efecto estadísticamente poco probable tuviera repercusiones a escala humana. Lillie empezó a considerar la posibilidad de algún tipo de «influencia directiva» operando dentro de los límites de las leyes de la mecánica estadística hubiera dado lugar a la creación y perpetuación de la vida. Una selección pequeña en la dirección oportuna, tan pequeña que pudiera esconderse en la escala de Planck, podría explicar el origen de la vida y el secreto de su perpetuidad. Según declaró Compton, «Lillie ha señalado que el sistema nervioso de un organismo vivo actúa como un amplificador, de modo que las acciones del organismo dependen de sucesos a una escala tan pequeña que están sujetos de forma apreciable a la incertidumbre de Heisenberg. [...] Eso implica que las acciones de un organismo vivo no pueden ser predecibles de manera definitiva únicamente a partir de sus condiciones físicas».

Para Compton, el mecanismo que condujo a la aparición de la vida a partir de sistemas físicos podía ser similar a alguno que llevaba a los fotones a actuar de esas formas tan extrañas. Algo similar podría llevar a los fotones a escoger por qué parte de la doble rendija pasar, siempre y cuando se limitaran en promedio a pasar por cada una de las dos rendijas un cincuenta por ciento de las veces. Compton especuló con que pudiera haber una acción similar tras el «libre albedrío»; aunque este estuviera en promedio acotado dentro de límites estadísticos, no dejaba de ser libre en los casos únicos.

Desde su perspectiva, cabría la posibilidad de que los seres humanos y otros seres vivos fueran los medios a través de los cuales los demonios cuánticos operaban en el mundo macroscópico. Compton desarrolló aún más sus ideas sobre la mecánica cuántica y el libre albedrío para las prestigiosas Conferencias Terry celebradas en Yale (1931-1932), y luego las reelaboró en el libro *The Freedom of Man* [La libertad del hombre], publicado tres años más tarde. Para entonces, ya pensaba en la posible intervención de un nuevo demonio en el

mundo cuántico, oculto tras la tapadera de la incertidumbre estadística. Unos años más tarde, dirigió sus investigaciones en materia cuántica hacia el objetivo de fabricar una bomba atómica y, poco después, supervisó el primer reactor nuclear del Proyecto Manhattan.

El joven Arthur empezó a plantear el pulso entre la mecánica cuántica y la relatividad como un debate sobre la posible existencia de demonios que manipulaban fotones y electrones. En un célebre artículo de 1935 coescrito con Boris Podolsky y Nathan Rosen (EPR, por las siglas de los tres), Einstein publicó su declaración más contundente contra las interpretaciones predominantes de la mecánica cuántica.

Sus colegas y él tildaban de «incompletas» las explicaciones vigentes que postulaban un indeterminismo esencial en la naturaleza basándose en la no localidad de las partículas y su entrelazamiento a distancia. Un año después, escribió una carta a Born en la que describió como «espeluznantes» (spukhafte) los efectos de la acción a distancia, refiriéndose a esas partículas entrelazadas que se afectaban entre sí pese a estar separadas. Si nada explicaba ese extraño comportamiento, los científicos tendrían que aceptarlo como una infracción de los límites que Einstein había impuesto a la velocidad de la luz. El viejo demonio del azar que Laplace había ahuyentado parecía cobrar fuerza, y el velocísimo colega del demonio de Maxwell podía regresar a la ciencia.

En 1935, Compton atacó sin cuartel los argumentos de Einstein en *The Freedom of Man* [La libertad del hombre], especialmente las acusaciones de falta de compleción: «Einstein admite que nuestra actual mecánica cuántica es correcta, pero recientemente ha llamado la atención sobre una aparente falta de compleción de esta teoría del mundo». Compton recalcó que «el apoyo férreo a la postura de Einstein» se debía a la inercia intelectual de aquellos que habían sido «educados durante largo tiempo en la tradición clásica». Considerándose «en parte responsable de esta dramática inversión del punto de vista de los físicos», decidió argumentar a favor del bando contrario. Se declaró partidario de la interpretación de Copenhague de Bohr, que defendía la existencia de un indeterminismo esencial en la naturaleza.

Compton creía que Einstein estaba equivocado. Para respaldar sus afirmaciones, ideó un ingenioso experimento mental, aunque quizás algo fantástico, basado en el experimento de la doble rendija cuya interpretación tanto molestaba a Einstein. Comparó las partículas subatómicas que atravesaban las rendijas con

«balas de rifle» disparadas a un blanco lejano. La comparación era pertinente. No solo permitía a los científicos pensar en las partículas subatómicas como se hacía en la física clásica, sino que ilustraba los nuevos usos que se daban a las partículas subatómicas para bombardear átomos y convertirlos en nuevos elementos radiactivos. Su ejemplo preveía las posibles acciones de un demonio que interviniera en el sistema.

Uno de los resultados más desconcertantes del experimento de la doble rendija era que los científicos no podían determinar por qué rendija pasaría una partícula subatómica. Cuando realizaban el experimento con una sola rendija abierta, detectaban partículas individuales. Cuando volvían a realizarlo con dos rendijas abiertas, lo único que podían determinar es que las partículas atravesaban por una rendija el cincuenta por ciento de las veces y por la otra el otro cincuenta por ciento. Compton explicó: «Podríamos predecir el resultado medio de muchos ensayos, pero ningún experimento físico imaginable nos asegura dónde estará un electrón concreto en un momento definido del futuro». En su opinión, el resultado era verdaderamente una cuestión de azar y no era consecuencia de nuestra ignorancia: «Eso es lo que queremos decir cuando afirmamos que la ley de la causalidad no se cumple: el conocimiento de las condiciones iniciales no nos permite predecir lo que ocurrirá, ya que con las mismas condiciones no somos capaces de producir sistemáticamente el mismo efecto».

La diferencia era sutil pero clave: no se sabía por dónde pasaría la partícula porque no existía tal información. Creer lo contrario equivalía a pensar que un demonio podía controlarlas y que el «demonio que controlaba el obturador podía ser consciente de sus cualidades». Pero a menos que se hallara a ese demonio, los científicos no podrían hablar de causalidad estricta en la naturaleza: «Ahora bien, si estas cualidades [del demonio] no se revelan en un experimento, no hay ninguna diferencia experimental (es decir, física) en el hecho de que existan o no». Su conclusión era categórica: «Así pues, la obligación de abandonar la ley de la causalidad es un principio físico».

Einstein tenía la sensación mortificante de «estar pasando algo por alto» que posibilitaría la predicción en el caso de las dos rendijas. Compton estaba ansioso por refutar su tesis y aseguraba que Einstein parecía aferrado a una fe en demonios que los experimentos no podían revelar.

Lo más alarmante de las conclusiones de Compton era que, si bien no creía en demonios que pudieran llevar el determinismo al mundo de las partículas

subatómicas, no descartaba la posibilidad de que hubiera otra clase de demonios que intervinieran en nuestro universo y en el experimento de la doble rendija. Compton consideraba a esos diablillos lo bastante inteligentes como para operar de forma que fueran imposibles de detectar. No necesariamente trabajaban entre bastidores para mantener la causalidad del universo. Más bien, utilizaban la apariencia de causalidad en la naturaleza como tapadera para sus acciones encubiertas. Solo necesitaban una cosa: mantener la probabilidad global de que sus acciones interfirieran con cada una de las dos rendijas en una proporción del cincuenta por ciento.

Según Compton, a pesar de que las cosas en general ocurrían normalmente en conjunto no se debía de excluir que en casos puntuales hubiese otro tipo de intervenciones. Por pequeñas que fueran, intervenciones en lugares y momentos claves podían amañarse en el mundo macroscópico, haciendo perceptibles los efectos de esos demonios. El experimento mental de Compton consistía en imaginar una de las dos rendijas conectada a un artefacto explosivo que estallaría en el momento en que una partícula la atravesara. De esa forma, los demonios «indetectables» podrían saber hacia dónde se dirigía un solo fotón e intervenir: «El demonio a los mandos del obturador puede considerar como “malo” un fotón que entre en la célula fotoeléctrica y provoque la explosión de la dinamita, y como “bueno” otro que entre en la célula que evitaría la catástrofe. Siendo directamente consciente de las características no físicas que determinarán su dirección, el demonio puede cerrar el obturador a todos los fotones “malos” que se aproximen hasta que un fotón “bueno” haya pasado, con lo que evitaría el daño».

Compton continuaba preguntando: «¿Contravendría el demonio alguna ley física?». La respuesta era que no. En una nota a pie de página, Compton señalaba: «No es necesario que el demonio realice una acción física, [...] la elección de un único suceso no perturba la probabilidad estadística de emisión». En la ciencia de la época, nada demostraba que un demonio tan sigilosamente «indetectable» no existía:

En las condiciones descritas, sin embargo, un demonio solo determina un suceso concreto y el equilibrio estadístico no se ve afectado. De esta forma, la intervención del demonio es físicamente indetectable. Es decir, la acción se ha producido según las leyes físicas, a pesar de que el curso del suceso no se regía

por el azar, sino que venía determinado por el capricho de un demonio.

Según Compton, el azar era la capa de invisibilidad ideal para los caprichos de los demonios cuánticos: una coartada perfecta. Esos demonios no tenían poderes como los que se solían atribuir a los de Laplace. No conducían al determinismo laplaciano a un nivel fundamental. En cierto sentido, eran más diestros, ya que a veces podían actuar de forma impredecible, siempre y cuando actuaran de forma predecible la mayor parte del tiempo.

Compton citó el famoso pasaje de Laplace sobre «un intelecto que en un momento dado conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza», un ser para quien «nada sería incierto», ya que «tanto el futuro como el pasado estaría ante sus ojos». Gracias a la mecánica cuántica, «ningún físico podía suscribir ya la tesis de Laplace». Él subrayaba que debían hacer hincapié en otros demonios que podían actuar subrepticamente en momentos clave para amplificar las incertidumbres del universo cuántico.

Para recalcar el error común de pensar que el universo era determinista, incluso en lo tocante a las decisiones humanas, Compton explicó cómo se podía llevar fácilmente a la práctica su experimento. El contexto era un laboratorio típico en el que se realizaba el experimento de la doble rendija. Un científico podría decidir cuándo salir a comer en función de la trayectoria elegida por el fotón: «Uno puede decidir que, cuando el siguiente fotón entre en la fotocélula A, se irá a casa»; y cuando lo hace, «detiene el experimento, coge su sombrero y se marcha». La hora de comer dependería por completo de un suceso estadístico.

Pero, en realidad, ¿quién o qué tomaba la decisión? Compton no descartaba la posibilidad de que un demonio físicamente indetectable estuviera al mando. No solo la hora de comer podía estar en juego. Compton creía en la posibilidad de que los seres humanos estuvieran sujetos a procesos operativos subyacentes que desconocían. Compton, devoto cristiano infatigable, entendía las posibles acciones de los demonios en el contexto de la mecánica cuántica como una prueba de que nada en la ciencia impedía considerar al hombre un agente que podía actuar, dentro de unos límites estadísticos, según su libre albedrío y su conciencia.

EL DEMONIO DE PLANCK

Durante la primavera del año 1930, en el instituto de Bohr en Copenhague, algunos de los físicos más reputados del momento escribieron y montaron una parodia del Fausto de Goethe. ¿Qué harían con los nuevos conocimientos que salían de los laboratorios? Muchos colegas de Compton estuvieron presentes. El físico Wolfgang Pauli fue el elegido para interpretar a Mefistófeles, que tentaba a Fausto a adentrarse en el mundo cuántico de las nuevas partículas subatómicas, Arthur Eddington asumió el papel del arcángel Rafael y Robert Oppenheimer formó parte del coro con Heisenberg. Mientras Mefistófeles tentaba a Fausto con la promesa de «unendlicher Selbstenergie», cantaba:

Despreciad la razón y la ciencia, si queréis

¡El mayor poder de la humanidad!

Dejad que los trucos deslumbrantes y los hechizos mágicos

¡Os afiancen en el espíritu cuántico!

Pero no todo eran juegos y jolgorio. Ese verano, Max Planck, sin duda la máxima autoridad en mecánica cuántica, viajó por toda Europa dando conferencias sobre el tema y discutiendo el demonio de Laplace. Planck, al haber desarrollado una rama de la ciencia basada en la posibilidad del indeterminismo real, podría ser considerado como un enemigo de la criatura de Laplace, pero sus opiniones sobre la criatura eran mucho más complicadas y positivas. Sus contribuciones a la disciplina le habían dado fama mundial, pero no estaba dispuesto a aceptar íntegramente la interpretación de Copenhague de Bohr. Mientras Planck daba sus charlas por el Viejo Continente, los nazis iban ganando escaños en el Reichstag.

Planck estimó los límites de un idealen Geist capaz de predecir el futuro y conocer todo el pasado. Las aportaciones recientes a la ciencia habían demostrado que «hay un punto, un único punto en el inconmensurable mundo de

la mente y la materia, en el que la ciencia y, por lo tanto, todo método causal de investigación, seguirán siendo siempre inaplicables». Ese espacio de inaplicabilidad seguiría siéndolo «incluso en el caso de la superinteligencia postulada por Laplace». Planck reconocía que la presión por abandonar la fe en el ser de Laplace simplemente por las pruebas que había en su contra era fuerte, pero debía resistirse.

¿Qué ocurriría si un humilde mortal intentara conversar o conspirar con la superinteligencia de Laplace? Este ser humano probablemente ya tenía una idea muy particular del ser de Laplace en mente, como algo similar a sí mismo o a las máquinas calculadoras de su época. Pero esta idea podía estar totalmente equivocada. El demonio de Laplace podría ser mucho más hábil y complejo de lo que se le pensaba, tal vez incluso podría llegar a saber exactamente todas las cualidades de las partículas cuánticas que no se podían detectar en el laboratorio y que confundían a los pobres mortales. «Es muy probable que el ser humano inquisitivo que lo hiciera» teniendo el valor de conversar con tal demonio «obtuviera por respuesta estas palabras: “¡Te pareces al intelecto que comprendes, no a mí!”». «Y si después de esta reprimenda persiste en su obstinación y declara que el concepto de un intelecto ideal carece de sentido y es innecesario, cuando no ilógico, que se le recuerde que no todas las afirmaciones sin fundamento lógico carecen de valor científico».

Según Planck, la búsqueda del ser de Laplace seguía siendo relevante, aunque de momento fuera una fuerza inescrutable y poderosa que nos recordaba los límites de nuestro conocimiento frente al suyo. Declararlo nugatorio y borrar sin más el concepto de causalidad de la ciencia con un «formalismo miope» sería un grave error que podría impedir grandes descubrimientos en el futuro. Ese abandono «obstruiría la misma fuente con la que Galileo, Kepler, Newton y muchos otros grandes físicos saciaron su sed de conocimiento científico». Quizás no fuera en absoluto como lo imaginábamos o no se encontrara donde pensábamos que podía estar. Incluso era posible que la ciencia no fuera la mejor disciplina para conocerlo: «Debemos cuidarnos de no caer en la tentación de hacer del intelecto ideal el objeto de un análisis científico, de considerarlo como algo análogo a nosotros mismos y de preguntarle cómo obtiene los conocimientos que le permiten hacer predicciones precisas». Para saber lo que sabía, el ser de Laplace podía estar actuando de maneras que los científicos contemporáneos ni siquiera podían empezar a sospechar.

EL DEMONIO DE MAXWELL

EN EL MUNDO CUÁNTICO

Al igual que el demonio de Laplace, el de Maxwell fue igualmente revisado al albor del mundo cuántico, dentro del clima prebélico que ennegrecía el mundo en esta época.

Einstein tenía muchos amigos en Berlín. Entre ellos, un joven prodigio de veintinueve años que provenía de una rica familia judía húngara y que daba clases de física con Szilárd. En poco tiempo, John von Neumann sería reconocido como uno de los mayores expertos mundiales en mecánica cuántica, publicando sus Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica. La edición alemana apareció en 1932 y se convirtió en un clásico de inmediato. Durante décadas se pensó que había refutado la posibilidad de las «variables ocultas», es decir, la idea de que mecanismos aún desconocidos pudieran proporcionar a los científicos los medios para reinterpretar los efectos cuánticos de forma totalmente determinista.

Las aportaciones de von Neumann a la ciencia radicaban en una interpretación tan sorprendente como diferente de las incapacidades del demonio de Maxwell. Según él, el demonio no podía operar a nivel cuántico porque no podía medir la posición y el momento de una partícula con total exactitud: la medición de una magnitud conllevaba inevitablemente una incertidumbre respecto a la otra. No podían separarse sin alterar el sistema de forma esencial e irreversible; ni con dedos hábiles, ni con una puerta, ni con un bate de críquet, ni con una membrana semipermeable, ni con un filtro ni con ninguna otra cosa... En la formulación de von Neumann, las relaciones de incertidumbre de Heisenberg resultaban de las limitaciones de la criatura de Maxwell al confrontar ese nuevo micromundo.

Los demonios de Laplace y Maxwell solo podían funcionar al tener un conocimiento completo de la posición y velocidad de las partículas que manejaban. «Si conociéramos todas las propiedades de la molécula antes de la difusión (posición y momentum), después de la misma podríamos calcular en cada instante si está a la derecha o a la izquierda». Von Neumann argumentaba que esa información simplemente no existía en la naturaleza. Había que aceptar que una molécula en movimiento no existía de manera localizable. La

termodinámica clásica suponía que «los estados cuyas diferencias son arbitrariamente pequeñas son siempre cien por cien separables», pero esa suposición no estaba justificada en el micromundo: «La separación es completamente imposible». En otras palabras, la limitación no era solo práctica y de facto, sino de iure.

Von Neumann amplió las investigaciones de Szilárd y dio una nueva explicación a las conclusiones de su compatriota. El libro hacía hincapié en el determinismo laplaciano, el demonio de Maxwell y la investigación de Szilárd. De hecho, esos temas desempeñaban un papel clave en los célebres capítulos sobre medición y reversibilidad. Su reto era claro: «Resolver una conocida paradoja de la termodinámica clásica» asociada durante mucho tiempo al demonio de Maxwell: ¿cómo podía ser que los procesos mecánicos fueran reversibles en principio, pero que casi nunca lo fueran en la práctica? Según Neumann, la mecánica cuántica podía dar respuesta a esa pregunta casi centenaria. Su explicación de la entropía basada en la cuántica estribaba en que «el observador no lo sabe todo, ni puede averiguar (medir) todo lo que es medible a priori». Tras leer el exorcismo de Szilárd y descubrir las limitaciones del demonio de Maxwell, Neumann fue muy elocuente sobre por qué ese demonio no podía hacer gran cosa a escala humana: las razones venían de la naturaleza del ámbito cuántico.

Neumann ahondó en la interpretación de Szilárd de lo que ocurría exactamente cuando el demonio intentaba manipular moléculas sueltas: «Podemos analizar en profundidad esta cuestión gracias a las investigaciones de L. Szilárd, que aclararon la naturaleza de la pared semipermeable, “el demonio de Maxwell” y el rol general de la “intervención de un ser inteligente en los sistemas termodinámicos”». La prueba de por qué dos estados (como la posición y el momento) debían entenderse como superpuestos a nivel cuántico era que no podían separarse sin aumentar la entropía del sistema y, por ende, al forzar su separación, cambiaban al universo irreversiblemente. En el exorcismo de Szilárd, la intervención de un ser inteligente en los sistemas termodinámicos conducía sí o sí a un aumento de la entropía del sistema. En la elaboración de las ideas de Neumann, esa acción también aumentaba la entropía e introducía la irreversibilidad en el sistema, ambas cosas debidas a una alteración del estado actual del universo. Szilárd había achacado las dificultades para determinar la posición exacta de una partícula al coste de obtener ese conocimiento. Pero en la concepción de la mecánica cuántica defendida por Neumann, los observadores no podían conocer la posición y el momento de una partícula, no porque no pudieran disponer gratuitamente de todas las mediciones, sino porque esa

información todavía no existía en una forma recuperable. Obtenerla implicaba separar y, por consiguiente, modificar el sistema. A partir de entonces, la posibilidad de conocer la naturaleza de manera objetiva, sin cambios por ser estudiada, quedó muy en entredicho. Una mirada accidental podía intervenir en el mundo cuántico y cambiar el universo para siempre.

Las consecuencias de esta nueva interpretación de las limitaciones del demonio de Maxwell fueron, cuando menos, revolucionarias. Sus implicaciones llegaron mucho más allá de la mecánica cuántica y afectaron a la ciencia y a la filosofía en general. Incluso podían conducir a la aceptación de la no localidad, la indeterminación y la incertidumbre, así como a la idea de que el universo podía ser un lugar afectado por las conciencias habitando dentro de él. Neumann criticó la causalidad sin piedad: «Actualmente no hay ocasión ni razón para hablar de causalidad en la naturaleza. Ningún experimento indica su presencia, ya que los macroscópicos son inadecuados en principio, y la única teoría conocida compatible con nuestras experiencias relativas a los procesos elementales, la mecánica cuántica, la contradice». El científico se lamentaba de que los viejos hábitos eran duros de dejar: «Huelga decir que estamos lidiando con una mentalidad atávica de toda la humanidad, no con una necesidad lógica (cosa que viene del hecho de que fue totalmente posible erigir una teoría estadística). Cualquiera que entre en el tema sin nociones preconcebidas ya no tendrá ninguna razón para adherirse a ella».

La mecánica cuántica reveló «un aspecto cualitativamente nuevo del mundo», y, aunque «nunca se pueda decir de la teoría que ha sido demostrada por el empirismo», es «la mejor síntesis conocida de la experiencia». ¿Debe abandonarse simplemente porque va en contra de nuestra visión habitual de la causalidad? Neumann concluía con una pregunta retórica: «En esas circunstancias, ¿es sensato sacrificar una teoría física razonable por eso?».

Para convencer a sus lectores, Neumann les pedía que le siguieran en un Gedankenexperiment similar al de Maxwell. Mientras que tradicionalmente los científicos comparaban a ese demonio con un filtro, válvula, o membrana semipermeable utilizada para separar moléculas, en el experimento de Neumann «nuestra pared semipermeable es esencialmente diferente de aquella limitada termodinámicamente». Las paredes o válvulas semipermeables no funcionaban en el mundo cuántico porque a partir de cierto umbral la posición y el momento de las moléculas no podía determinarse. Los ejemplos de Maxwell tomaban en cuenta el «exterior (es decir, si viene de la derecha o de la izquierda, o algo

parecido)» de las moléculas, pero los de Neumann tenían que lidiar con características inobservables en la práctica y en la teoría.

Neumann y sus seguidores indagaron mucho en lo que el demonio de Maxwell podía lograr y lo que lo vencería. Al hacerlo, crearon el concepto del «observador clásico» u «observador macroscópico». Para ese observador, la medición funcionaba igual que como estábamos acostumbrados en términos clásicos: «Todo lo que es medible en absoluto también es medible simultáneamente; es decir, todas las preguntas que pueden responderse por separado también pueden responderse simultáneamente».

Pero, en el mundo cuántico, la medición de algo desembocaba en una incapacidad para medir otra cosa. Neumann explicó: «La mensurabilidad no simultánea de las magnitudes de la mecánica cuántica ha causado una impresión muy paradójica, y la razón es precisamente que este concepto es ajeno al método macroscópico de observación». Hasta ese momento, los científicos habían creído que, cuando el demonio de Maxwell miraba a su alrededor, el mundo parecía mucho más grande, pero, salvo por la escala, lo habían imaginado cualitativamente similar. Los físicos cuánticos sostenían que no era así. En realidad, era un universo diferente que funcionaba de acuerdo con leyes distintas y que se esfumaba justo cuando le echábamos un vistazo.

FILOSOFÍA, LÓGICA Y POLÍTICA COMUNISTA

En el distinguido campus de la Universidad de Yale, el filósofo Henry Margenau declaró que el demonio de Laplace encapsulaba el ideal del método científico y de una concepción filosófica del universo, pero que de repente estaba siendo muy cuestionado. Su importancia histórica era tan grande que aún impregnaba toda la física clásica. De hecho, había sido «eminente fructífero para desarrollar esa ciencia» permitiendo a los científicos «predecir el futuro». Margenau utilizó el término «demonio de Laplace» indistintamente con el de «demonio omnisciente».

Al principio, el filósofo no había querido renunciar a ese demonio ni a la creencia en la causalidad, ni siquiera a la luz de los nuevos descubrimientos procedentes del ámbito cuántico. Pero unos años más tarde ya no estaba tan seguro, y su fe en ese demonio empezó a languidecer: «Muchos investigadores

han juzgado insatisfactorio el hecho de que la postulación de una fórmula universal, tal como la formuló Laplace, implique la hipotética existencia de un demonio omnisciente». No era razón suficiente para descartar por completo la idea de Laplace: «Por consiguiente, no es legítimo decir que el demonio no existe o es imposible y, a posteriori, rechazar la proposición. [...] Una verdadera crítica debe atacar su miga, no su forma». En trabajos posteriores, Margenau reflexionó sobre el uso de la palabra «demonio». «Sea o no apropiada esta palabra, la usaremos por su brevedad», señaló, reconociendo también que el demonio había sido «la manzana de la discordia».

«¡Cómo se revolvería Laplace en su tumba si supiera lo que le ha pasado!», escribió Robert Millikan, conocido por sus trabajos sobre el electrón y por haber ganado el premio Nobel justo después de Einstein y Bohr. El determinismo parecía bajo asedio. Los demonios podían ser maestros de la lógica, tal vez incluso acceder a formas de lógica superiores a las que poseemos nosotros. Para los matemáticos de corte filosófico, los efectos nocivos de la mecánica cuántica sobre la salud del demonio de Laplace demostraron que lo que parecía lógico desde un punto de vista podía no serlo desde otro. Aunque nos costara ver una conexión lógica entre dos cosas, como A y B, eso no quería decir que esa conexión no pudiera existir.

El matemático Leon Lichtenstein (pariente lejano de Norbert Wiener) se asoció con André Metz (ardiente crítico de Henri Bergson) para reconsiderar la noción de la inferencia matemática remitiéndose al demonio de Laplace. Sugirieron que los pasos que a nosotros nos parecían complicados o imposibles podían ser sencillos y lógicos para él. Como dijeron: «Para un ser como el demonio de Laplace, cuyo campo visual interior puede considerarse ilimitado, el camino entre el enunciado A y el B se acortaría de tal manera que veríamos coincidir el punto de partida y el de llegada. Por así decirlo, pensaríamos que B presenta el mismo significado que A y, por lo tanto, que es obvio».

Los filósofos tuvieron que adaptarse. En Austria, el filósofo y economista político Otto Neurath lideraba un grupo de científicos y pensadores conocidos como el Círculo de Viena, comprometidos con la lucha por la ciencia. Neurath era uno de tantos que veían el demonio de Laplace como el eje de todo un programa físico, filosófico y hasta político que había perfilado el siglo anterior. La criatura ya no parecía tan creíble como antes. Tampoco lo parecía el sueño de crear una estructura racional para la ciencia basada en la combinación de datos sensoriales con principios matemáticos analíticos, la gran esperanza de Neurath

y sus aliados: «La ficción de un lenguaje ideal construido a partir de oraciones atómicas puras no es menos metafísica que la ficción del demonio de Laplace» (Laplace'schen Geistes en el original). Si ese fundamento científico se tambaleaba, ¿qué ocuparía su lugar? Para algunos científicos y filósofos, la aparente debilidad del demonio, y quizás incluso su desaparición, hacía trizas sus esperanzas de que pudiera construirse lógicamente una estructura unificada para la ciencia y la sociedad a partir de los datos sensoriales, un objetivo optimista perseguido por positivistas lógicos y empiristas lógicos.

El fracaso de la interpretación causal de la naturaleza no hizo mella solo en los laboratorios científicos. El revolucionario ruso León Trotsky, que se escindió y se convirtió en uno de los más firmes opositores de Stalin durante esos años, se burló del ingenuo determinismo de sus adversarios políticos aludiendo a la fantasía de Laplace. Burlándose de la incapacidad de los seres humanos para determinar el futuro, por no hablar de los fallidos conatos del Estado soviético por controlar la historia con sus planes quinquenales, Trotsky publicó un breve panfleto titulado La economía soviética en peligro [Soviet Economy in Danger] (1932), en el que declaró: «Si existiera una mente universal que se proyectara en la fantasía científica de Laplace, por supuesto que a priori esa mente podría elaborar un plan económico impecable y exhaustivo, empezando por el número de hectáreas de trigo y acabando por el último botón de un chaleco». Según Trotsky, el problema del comunismo estalinista era que suponía que ese demonio podía existir de facto.

La adhesión de destacados socialistas soviéticos al culto al ser de Laplace apuntaló el optimismo tecnocientífico del comunismo dominante y se postuló a menudo como la razón de ser de la colectivización. Durante esos años, el pensador transhumanista utópico Nikolái Fiódorov se había erigido como una fuente de inspiración para muchos jóvenes socialistas. Trotsky y Fiódor Dostoyevski, entre otros, llamaron la atención sobre el legado de Fiódorov. La póstuma Filosofía de la tarea común [The Philosophy of the Common Task] de Fiódorov afirmaba que la creación de Laplace podía materializarse si todos trabajaban juntos, ejercitando literalmente sus mentes para colectivizar el trabajo intelectual.

Dos cerebros podían pensar mejor que uno; tres, mejor que dos, y así sucesivamente. Desde ese punto de vista, una

«mente colectiva» encarnaría el ideal de Laplace: «Para el vasto intelecto capaz

de abarcar en una fórmula los movimientos de los cuerpos celestes más grandes del universo y de los átomos más diminutos, nada sería imposible de conocer. Tanto el futuro como el pasado le serían accesibles». Y Fiódorov remataba con confianza: «Por descontado, la mente colectiva fruto de la colaboración de todos los humanos a lo largo de muchas generaciones sería suficientemente vasta. Todo lo que se necesita es concordia, unidad entre muchos».

Del dicho al hecho hay un gran trecho. El optimismo de los días prerrevolucionarios empezó a decaer a la luz de los programas económicos y culturales de Stalin y los encausamientos de sus oponentes, bautizados como los Juicios de Moscú. El propio Trotsky había empezado a perder la fe en el nuevo sistema: «En verdad, muchas veces la burocracia piensa que precisamente una mente similar está a su disposición. Por eso se libera tan fácilmente del control del mercado y de la democracia soviética. Pero, en realidad, la burocracia comete un craso error». Esa idea equivocada se usó para atacar la democracia y para justificar el control total de la economía por parte del Estado. Armado con una crítica de la mente de Laplace, Trotsky empezó a impugnar los principios básicos del comunismo y a defender la necesidad de una restauración parcial del capitalismo, abogando misericordiosamente por la desregulación de los mercados. Afirmaba que los «planes» para el futuro del comunismo inspirados en Laplace caían en el error. Planificar el futuro era difícil, si no imposible, y la culpa de creerlo posible había sido la peligrosa idea de Laplace. Después de entregar estas críticas, Trotsky fue asesinado durante su exilio en México.

Durante más de un siglo, el ser de Laplace había encarnado el ideal de un cierto tipo de conocimiento causal. Había alimentado la esperanza de que un día podríamos saberlo todo colectivizando el pensamiento de un modo que había inspirado a revolucionarios y conservadores por igual. Pero la incertidumbre y el indeterminismo cuántico cuestionaban la visión que él representaba. Su debilidad, evidenciada por los nuevos experimentos cuánticos, preocupaba a científicos y filósofos por igual.

Durante medio siglo, la criatura de Maxwell había representado una nueva forma de entender la inteligencia y un tipo de progreso compatible con la de Laplace, solo que mejor todavía. Ese demonio dejaba entrever la posibilidad de escapar al fatalismo de un estado de pérdida cada vez mayor. Pero cuando los científicos lo analizaron en detalle, detectaron limitaciones evidentes, decepcionantes e inquietantes. A medida que el fascismo se expandía por Europa, los científicos siguieron confiando en que aprender más sobre esos dos demonios podía

enseñarles el camino para crear un mundo mejor. Por otra parte, las nuevas investigaciones sobre el mundo cuántico los llevaron a sopesar la posible existencia de otros demonios que actuaran de formas nunca antes concebidas.

IX

LOS DEMONIOS Y LA BOMBA ATÓMICA

Entramos ahora en una era marcada por la bomba atómica, donde los demonios caminan de forma paralela a las nuevas tecnologías de la época. Desde la bomba atómica hasta la cibernética, la informática y la computación cuántica. Una sucesión de avances, ingenios y nombres propios, cuyo arranque podemos emplazar el 29 de enero de 1933, cuando The New York Times publicó un titular sensacionalista: «SE AVECINA EL USO DE LA ENERGÍA ATÓMICA: El presidente del MIT Compton afirma que la ciencia ya está preparada para aprovechar esa colosal fuerza; LA UTILIDAD DEL ION DE ALTO VOLTAJE: Cita experimentos con generadores que proporcionan hasta 10.000.000 de voltios; CONFÍA EN LA QUÍMICA: Su esperanza es que el proceso de laboratorio libere el átomo para aumentar la producción de energía». Al día siguiente, el 30 de enero de 1933, la revista Technology Review publicó un artículo complementario de Karl Compton sobre el mismo tema y Adolf Hitler se convirtió en canciller de Alemania.

Durante esos meses, The New York Times siguió publicando titulares sorprendentes sobre la transmutación y la radioactividad. Los motores y explosivos del siglo XIX eran poca cosa en comparación con el poder de las partículas subatómicas y los elementos radioactivos. El físico Ernest Lawrence, que trabajaba en la Universidad de Berkeley con Gilbert Newton Lewis, encontró la forma de acelerar partículas y proyectarlas contra todo tipo de objetivos nuevos. Al cabo de poco tiempo, «los elementos radiactivos caían en nuestro regazo como si estuviéramos sacudiendo manzanas de un árbol», comentó un físico que trabajaba con el ciclotrón de Lawrence. El ciclotrón que se usaba para colisionar átomos y partículas entre sí para crear nuevos elementos y fuentes de energía era «el nuevo agente milagroso de la ciencia: el cañón más poderoso jamás descubierto para liberar reservas enormes de energía encerradas

en el núcleo interno del átomo». La prensa popular hacía eco de los artículos de Nature y Physical Review, e incluso describían la posibilidad de crear artificialmente nuevas reservas de materiales preciosos, como el oro, al disparar a gran velocidad átomos y partículas subatómicas.

Einstein no tardó en emigrar e instalarse en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Sus dos amigos húngaros, expertos en los demonios cuánticos, también se marcharon. Neumann ya se había ido a Princeton desde principios de ese año y Szilárd se trasladó primero a Inglaterra y luego a Estados Unidos.

Durante esos años, el biólogo J. B. S. Haldane, ateo militante reconocido por sus trabajos pioneros en el área de la genética, reflexionó sobre el rol de las criaturas míticas y religiosas en la experimentación científica. Tal método estaba a salvo de su intromisión: «Cuando hago un experimento, doy por sentado que ningún dios, ángel o demonio va a interferir en su curso». Arthur Eddington expresó ideas parecidas durante sus conferencias Messenger ante los estudiantes de la Universidad Cornell: «Si mañana encuentro hielo en lugar de agua hirviendo en la tetera, probablemente exclamaré: “Esto es obra del diablo”, [aunque] no creo que los diablos interfieran en los arreglos de la cocina ni en otros procedimientos experimentales».

En la mayoría de los casos, sobre todo si se consideraba un universo en expansión, lo «improbable» significaba simplemente «imposible». Los efectos del azar se contrarrestaban unos a otros, de modo que en promedio la naturaleza seguía un curso regular. Pero, aunque las teteras donde se hervía el agua estaban casi siempre protegidas de la intervención demoníaca, Eddington encontró otros puntos de acceso más vulnerables. Le preocupaba especialmente lo que podía suceder a escalas de tiempo casi infinitas. En un lapso gigantesco de tiempo, la posibilidad de encontrarnos de repente atrapados en un ciclo idéntico a uno anterior era significativa: «Si esperamos lo suficiente, un número de átomos se ordenará por casualidad como los átomos están ordenados ahora en esta sala. Y, también por casualidad, de uno de los sistemas de átomos saldrán las mismas ondas sonoras que están saliendo ahora de mis labios. Esas ondas impactarán contra otros sistemas de átomos ordenados por casualidad como vosotros, y en los mismos grados de atención o somnolencia».

Eddington se imaginó a sí mismo en 1934 dando la conferencia una y otra vez, atrapado en una pesadilla cósmica recurrente: «Mi propia charla en las conferencias Messenger se repetirá un número infinito de veces antes de que t

alcance ...», advirtió a sus oyentes. Además de esta posibilidad real y aterradora, existía la otra posibilidad que el demonio de Maxwell desempeñara un papel selectivo y clave en determinados casos con grandes consecuencias para el desarrollo futuro. Ahí no terminaba su campo de acción.

Lo más importante era que el hombre muchas veces actuaba como el demonio de Maxwell, alterando el equilibrio natural al que tendía el universo: «En virtud de su propósito consciente, hasta cierto punto la mente del hombre debe desempeñar el papel del demonio clasificador de Maxwell». ¿Qué podía lograr esa criatura, cuyo papel el hombre asumía en muchas ocasiones? Eddington concluyó: «Al ser un agente clasificador, es la encarnación del antiazar».

A Eddington, como a muchos otros científicos de esa época, también le preocupaba la forma en que los efectos cuánticos podían alterar las capacidades del demonio: «A veces me he preguntado si no se podría dejar pasmado al demonio clasificador de Maxwell con uno de los avances modernos de la física atómica, a saber, el principio de incertidumbre de Heisenberg». El astrónomo soñaba con encontrar una manera de superar las limitaciones de sus capacidades de microclasificación: «Me temo que el demonio es demasiado listo para mí». Él y sus colegas se sumaron a la búsqueda.

ROOSEVELT, EL «DEMONIO MAXWELL»

DE ESTADOS UNIDOS

Poco después de que los titulares sobre el poder de la radioactividad llenaran la prensa, los periódicos anunciaron las últimas reflexiones de Karl Compton sobre los demonios. The New York Times cubrió la presentación que dio en el estrado de la American Association for the Advancement of Science (AAAS), donde Compton comparó al presidente de Estados Unidos con el demonio de Maxwell: «Podemos llamar al presidente Roosevelt el “demonio Maxwell” de Estados Unidos».

El discurso «Ciencia y prosperidad» de Compton se publicó en la revista Science en una versión un tanto diferente de la divulgada por The New York Times. Allí, en lugar de referirse directamente al presidente Roosevelt, Compton aludía más

vagamente a los poderes del Gobierno federal: «Podemos llamar al Gobierno federal el “demonio Maxwell” de Estados Unidos».

Compton argumentó que lo que la ciencia dictaba sobre la eficacia de los motores se podía extender a la sociedad en general. Para progresar, había que dirigir a los humanos como si fueran moléculas. «Debemos saber que, igual que en un gas, la sociedad se vuelve caótica e impotente si sus moléculas humanas poseen total independencia». Así esperaba conseguir a nivel social resultados similares a los que lograban las máquinas que producían trabajo.

En esos años, lo que más inquietaba a Compton era la planificación del uso y la explotación de los «recursos naturales en minerales, madera y agua». Su mensaje iba dirigido a la Administración de Ajuste Agrícola, la Autoridad del Valle del Tennessee, la Comisión Federal de Aviación y otra veintena de instituciones federales. Compton conocía de buena tinta la catástrofe a la que se enfrentaban los pinares al este de la cordillera de las Cascadas, los problemas causados por el drenaje del valle del río Misisipi para crear tierras de cultivo, la escasez de agua en California y la crisis nacional provocada por la erosión del suelo.

El presidente del MIT aplicaba las lecciones del demonio de Maxwell para crear un mundo «un poco más civilizado» y luchar contra las fuerzas de la descomposición: «Si se abandonan a su suerte, los asuntos humanos tienden hacia el caos». Por esa razón abogaba por fuertes políticas intervencionistas, ya que «una organización empresarial, si no tiene una mano que la guíe, cae en el desconcierto; una granja abandonada se vuelve un desierto, y una política económica basada en “dejar que la naturaleza siga su curso” conduce inevitablemente al caos». La física, y en particular la física del demonio de Maxwell, le daba ideas para mejorar la sociedad:

Es significativo que, en la ciencia física, solo se haya planteado una forma de eludir la tendencia al caos. [...] Solo hay una manera de «vencer» la segunda ley de la termodinámica. [...] Fue Maxwell quien mostró cómo hacerlo en el caso de las moléculas de un gas, y lo hizo mediante la agencia de un ser inteligente hipotético, que ha sido apodado «el demonio de Maxwell» y que [...] separa las moléculas rápidas de un gas de las lentas, que en la naturaleza permanecen mezcladas.

Para Compton, los mismos mecanismos que permitían luchar contra la degradación termodinámica también podían conducir al desarrollo de una población sana. En su opinión, el problema de las «flaquezas hereditarias» era el segundo más importante después del medioambiental. El físico afirmó ante sus oyentes que el número de «tarados [...] asciende a cientos de miles»: «Esos tarados constituyen uno de los mayores dispendios de recursos económicos. [...] El bienestar de la raza exige su eliminación». Pero ¿cómo? Su respuesta era clara: «Por los medios que se han mostrado útiles a la hora de reprimir rasgos físicos y mentales indeseables, o de desarrollar aquellos deseables, en los animales domésticos». Compton explicaba no solo cómo resolver los problemas energéticos del mundo, sin también cómo mejorar la raza blanca.

Mientras Karl asumía funciones cada vez más destacadas en las universidades y el Gobierno, su hermano Arthur se dedicaba a crear nuevos experimentos de laboratorio para comprender aún mejor los demonios de la ciencia. Ambos hermanos se habían criado en una familia devotamente cristiana. Su padre era ministro presbiteriano y su madre, menonita de nacimiento, trabajaba para la Sociedad Misionera de la Iglesia. Karl pasaría el resto de su carrera abogando por la «planificación inteligente» y, durante casi dos décadas, fue uno de los principales asesores científicos de Roosevelt y, más tarde, de Harry S. Truman. En el MIT, siguió sopesando el demonio de Maxwell como modelo de organización social y eugenésica mientras Arthur se centraba en los demonios de la mecánica cuántica, capaces de alterar la trayectoria de las partículas subatómicas.

LA CAJA INFERNAL Y EL GATO DE SCHRÖDINGER

Mientras los hermanos Compton usaban los poderes del demonio de Maxwell para organizar la sociedad más eficientemente, Einstein seguía pensando sobre cómo el mundo cuántico podía afectar el universo en general. En el verano de 1935, Einstein se metió de lleno en otro debate. Esta vez su interlocutor era el austríaco Erwin Schrödinger. Casi una década antes, Schrödinger había desarrollado una famosa ecuación, que ahora lleva su nombre, para describir la

naturaleza a nivel cuántico utilizando el símbolo griego parecido al tridente (Ψ) para designar las ondas cuánticas. Durante su diálogo con Einstein, nació la famosa paradoja hoy conocida como «el gato de Schrödinger» que se usa para entender la mecánica cuántica, tanto en libros de texto de física moderna como en tratados de filosofía sobre la relación entre la naturaleza y la conciencia humana.

En su correspondencia con Einstein, Schrödinger empezó a preguntarse qué sucedería dentro de un «aparato diabólico» o una «máquina infernal» (Höllmaschine) que contuviera material radioactivo con un cincuenta por ciento de probabilidad de emitir una partícula subatómica. Tal partícula estaría ligada a un frasco lleno de veneno que mataría a cualquier ser viviente (Schrödinger usó como ejemplo un felino) atrapado en el interior del aparato. El ser viviente estaría expuesto al veneno cuya liberación dependería de la emisión de la partícula subatómica proveniente del material radioactivo. Al ser emitida, este sería envenenado. Según la interpretación ortodoxa de Bohr, llamada «de Copenhague», cuando la «máquina infernal» se mantenía cerrada e inobservable, el ser atrapado dentro de la caja yacía en un estado indeterminado, medio muerto y medio vivo. Tal estado paradójico era el resultado de que su estado anímico estaba ligado a la existencia de una partícula subatómica cuya emisión solo se podía determinar probabilísticamente.

Según otra interpretación, la que Einstein defendía, esas conclusiones eran realmente absurdas. El estado del ser atrapado en la caja no debía entenderse como indeterminado, aunque estuviera atado a la probabilidad de emisión de la partícula subatómica. Simplemente se podría admitir que no se sabía lo suficiente sobre el estado actual del aparato ni sobre la partícula que liberaba el veneno como para determinar si estaba vivo o muerto. En otras palabras, lo que algunos científicos tomaban como realidad basada en el indeterminismo probabilístico cuántico, para Einstein reflejaba nuestra ignorancia del verdadero estado de la naturaleza.

Los experimentos mentales de Einstein y Schrödinger con partículas atómicas amañadas eran tan violentos como los de Compton, pero más crueles. En una carta a Schrödinger, Einstein dejó bien claro que, incluso a la luz de su fracaso a la hora de combatir la interpretación predominante de la mecánica cuántica, seguiría buscando causas ocultas que devolvieran las explicaciones científicas a la senda del determinismo. No estaba de acuerdo con quienes interpretaban los resultados experimentales como pruebas de la no localidad y quienes afirmaban

—ridículamente, en opinión de Einstein— que algo podía «haber estallado y no estallado» al mismo tiempo. Su conclusión era: «Ningún arte de la interpretación permite convertir esto en una descripción adecuada del estado real de cosas».

Estas ideas le venían a Schrödinger en el momento y el lugar adecuados. Para desarrollar su trabajo había conseguido financiación de Imperial Chemical Industries, la todopoderosa empresa química británica que producía gas venenoso, explosivos y armas radioactivas. La empresa le había concedido un período sabático de dos años, que le dio «el tiempo libre necesario para escribir el artículo». Schrödinger invirtió su tiempo imaginando cómo un contador Geiger, un instrumento utilizado para medir la desintegración radiactiva, podía adaptarse para liberar un veneno en una cámara cerrada. La señal de desintegración radiactiva podía hacer saltar un obturador y activar un martillo que rompiera un frasco con cianuro. De ese modo, las posibilidades de propagación del veneno dependían de las posibilidades de desintegración de la partícula: «Hay un trocito de sustancia radiactiva tan pequeño que quizás en el transcurso de una hora uno de los átomos se desintegre. Y también es igual de probable que ninguno se desintegre. En caso de ocurrir, el tubo del contador se descargaría y, a través de un relé, liberaría un martillo que haría añicos un pequeño frasco con cianuro». Luego imaginó a un felino enjaulado. La probabilidad de que el frasco se hiciera añicos y el gato muriera era exactamente la misma que la de la desintegración radiactiva. Ya que la desintegración del átomo solo podía conocerse de forma probabilística, el estado del gato estaba envuelto en ese mismo grado de incertidumbre. La «función de todo el sistema expresaría esta cuestión conteniendo el gato vivo y el gato muerto (perdón por la expresión) mezclados o despachurrados a partes iguales».

En argot científico, el gato superpuesto vivo y muerto representaba la no localidad y la incertidumbre. En otra carta a Einstein, Schrödinger volvió a describir su diabólico dispositivo y la existencia «difuminada» del felino. Esta vez, el ejemplo que utilizó fue el del uranio en descomposición: «Confinado en una cámara de acero hay un contador Geiger preparado con una cantidad minúscula de uranio, tan pequeña que en la hora siguiente es tan probable esperar que se desintegre atómicamente como que no. Con un relé amplificado, se podría hacer que la primera desintegración rompiera una botellita de ácido prúsico. Por otra parte, y pese a la crueldad, también se encerraría en la cámara de acero un gato».

LOS DEMONIOS AYUDANTES DE LAPLACE

Mientras Einstein y Schrödinger se enviaban cartas sobre máquinas infernales con felinos enjaulados, la matemática Grete Hermann publicó un ensayo pionero que interpretaba la mecánica cuántica de otra manera. Aunque en ese momento pasó desapercibido, años más tarde el ensayo se recordó como uno de los desafíos más precoces e inteligentes contra la prueba de Neumann en contra de las «variables ocultas». Si Hermann estaba en lo cierto, tal vez el universo sí funcionara conforme a leyes deterministas.

Hermann era una rara avis. Se había doctorado en Gotinga con la matemática Emmy Noether, y eso le granjeó una reputación fantástica en una disciplina copada por los hombres. Werner Heisenberg, que la tenía como alumna en sus seminarios, la consideraba «una mujer de una inteligencia fabulosa». «La joven filósofa llegó a Leipzig con el propósito expreso de cuestionar la base filosófica de la física atómica», recordó años más tarde con gran admiración.

La obra de Hermann empezaba con una contundente descripción del concepto del demonio laplaciano: «[Es un ser] que tiene un conocimiento completo del estado actual de la naturaleza, que supervisa todas las leyes naturales y que puede predecir el curso de los acontecimientos basándose en ese conocimiento». Un apartado titulado «Das Ende des Laplaceschen Dämons» desarrollaba más sus ideas acerca de los demonios. Hermann no estaba convencida de que el formalismo de la mecánica cuántica descartara la posibilidad de que algún día se encontraran propiedades aún desconocidas u ocultas y que estas resucitaran el viejo ideal del determinismo laplaciano: «Pero ¿con qué derecho se adelantan a la investigación futura y declaran vana desde el principio la búsqueda de dichos atributos?». Hermann luchó contra las interpretaciones de sus compañeros que celebraban de buen grado la muerte del demonio de Laplace: «Ha habido que luchar por abandonar el viejo ideal de la física, ligado a una investigación que pretende trascender cualquier límite con tal de alcanzar la clarividencia del demonio de Laplace». La mayoría de los colegas habían intentado convertir ese demonio en un fantasma inexistente: «Ya no es el ideal inalcanzado al que, así y todo, hay que aspirar superando cualquier traba. Es más bien un fantasma que se ha rechazado a través del progreso empírico como una construcción antinatural». Ella no estaba de acuerdo. En su conclusión, argumentó que no se había desmentido en absoluto a ese «fantasma».

Las simpatías socialistas de Hermann pronto la obligaron a huir de Alemania. Se trasladó a Dinamarca, luego recaló en París y acabó en Londres. Pero no había terminado de escribir sobre los demonios de la ciencia. Después de la guerra, volvería a sacar el tema.

EL PROYECTO MANHATTAN

A finales de la década de los treinta, con la Segunda Guerra Mundial en ciernes, grandes físicos y químicos se habían metido de lleno en el estudio de las sustancias radiactivas, en especial el radio y el uranio. Cada vez más científicos, entre los que destacaban Otto Hahn, Lisa Meitner y Enrico Fermi, empezaron a investigar qué ocurría cuando las partículas atómicas y subatómicas chocaban entre sí. Cuando los físicos emplearon neutrones como proyectiles, observaron que, por cada uno que se disparaba, se liberaban dos neutrones del interior de los átomos, además de reservas de energía. Si se reutilizaba uno de los neutrones liberados, este podía liberar a su vez otros dos. Y el resultado podía ser exponencial.

Tal vez la persona mejor preparada para seguir este hilo de pensamiento era Leó Szilárd. En enero de 1938, Szilárd emigró a Estados Unidos y se puso a trabajar de inmediato en la fisión nuclear con Fermi, que había huido de la Italia de Benito Mussolini. Unos meses más tarde, el 12 de marzo de 1938, los nazis entraron en Viena. Ese mismo mes, Fermi y Szilárd demostraron que se podía crear una reacción nuclear de fisión en cadena utilizando el uranio. Al otoño siguiente, Compton volvió a dar charlas sobre los demonios de la mecánica cuántica y sobre Dios en la ciencia.

En prestigiosas conferencias en la Universidad de Carolina del Norte, introdujo su elenco favorito: demonios que podían ir más rápido que las partículas atómicas para evitar o provocar una explosión y demonios indetectables por los experimentos. Aunque recaló que la intervención del demonio era «físicamente indetectable», volvió a explicar que sus acciones se escondían tras regularidades estadísticas: «Es decir, la acción se ha producido estrictamente conforme a las leyes físicas, a pesar de que el curso del suceso no se regía por el azar, sino que venía determinado por el capricho de un demonio». Según Compton, estos

efectos indetectables a nivel cuántico podían tener consecuencias inmensas al amplificarse: «Los organismos vivos actúan como un amplificador de gran potencia que se puede activar mediante sucesos a una escala comparable a la de los sucesos elementales que llamamos indeterminados». Compton también se refirió a la «absurda» hipótesis de Laplace de un ser inteligente con capacidad suficiente para saberlo todo. Tras repasar las aportaciones de Heisenberg y el principio de incertidumbre, el norteamericano enfatizó que «ningún físico podía suscribir ya la tesis de Laplace».

Como la prensa no dejaba de informar sobre los usos potenciales de las fuentes radiactivas de energía, Karl Compton decidió que el National Defense Research Committee (Comité de Investigación de Defensa Nacional) debía volver a barajar la posibilidad de fabricar un nuevo tipo de arma. El NDRC contrató a su hermano Arthur para investigarlo. Tras unos meses estudiando el asunto, el menor de los Compton llegó a la conclusión de que era esencial «para la seguridad de la nación y del mundo libre invertir todos los esfuerzos en la fabricación de bombas atómicas». En el otoño siguiente, plenamente convencido de su urgencia, trasladó sus miedos a su hermano y a la influyente pandilla de Karl. El informe de Arthur Compton llegó al presidente el 27 de noviembre de 1941. Pocos días después, el 6 de diciembre, Roosevelt respondió que había conseguido varios millones de dólares para los primeros seis meses de trabajo de fabricación de la bomba atómica, y prometió fondos casi ilimitados para continuar con la misión. Había nacido el Proyecto Manhattan.

Al día siguiente, los japoneses atacaron Pearl Harbor. Karl Compton se incorporó tanto al NDRC como al Comité Científico Asesor del secretario de Guerra. Arthur se puso al frente del laboratorio de Chicago y fue el jefe de Oppenheimer hasta que este fue nombrado director del Laboratorio Nacional de Los Álamos, en Nuevo México. Cuando llegó el momento de empezar a trabajar en el arma, Arthur contrató a Szilárd como físico jefe y Neumann se encargó de calcular los mecanismos de implosión para maximizar el daño de la bomba. Los dos hermanos Compton solían participar en las reuniones del comité provisional que desembocaron en el uso del arma. Karl participaba como miembro de esas reuniones y Arthur solía asistir como científico invitado.

Cuatro años más tarde, en la primavera de 1945, los ingenieros químicos del reactor de Hanford, en el estado de Washington, entregaron al equipo de montaje de Nuevo México material suficiente para empezar a fabricar una bomba. Pocos días después de la capitulación alemana, el secretario de Guerra Henry Stimson

expresó el miedo a la bomba atómica en su diario: «Podría ser un Frankenstein que nos devorara».

Su única solución era plantearse qué hacer con la nueva arma y cómo justificar los miles de millones que se habían gastado en ella. En el Comité Científico Asesor que había recomendado el uso militar de la bomba, Arthur Compton dio su visto bueno a usarla contra Japón y firmó la recomendación ultrasecreta del 16 de junio de 1945 sobre el uso inmediato de armas nucleares. Neumann fue elegido para ayudar a escoger las ciudades perfectas que destruir. Truman aprobó su recomendación un día después. Szilárd, que empezaba a recelar del arma, intentó en vano impedir el lanzamiento mediante bombarderos sin avisar previamente a los japoneses.

La investigación técnica de los demonios de la ciencia había dado generosos frutos. Justo después de destruir Hiroshima y Nagasaki con la nueva bomba, el Gobierno de Estados Unidos publicó un único informe oficial que describía la tecnología secreta que esos científicos habían ayudado a crear. El resultado, la destrucción total de dos grandes urbes, parecía tan demoníaco que el informe se preguntaba si algún demonio había inspirado a un malvado científico para crear semejante arma. La respuesta fue negativa: «Esta arma no ha sido fruto de la diabólica inspiración de un genio retorcido, sino del empeño de miles de hombres y mujeres de a pie que trabajan por la seguridad de su país». El autor del informe era el colega de Karl Compton en Princeton y coautor de su artículo sobre el «demonio mecánico de Maxwell», Henry DeWolf Smyth.

Smyth describió el afán de investigación por medio de los temas científicos que le habían interesado desde aquellos primeros años. La bomba se describía a menudo en base a la búsqueda del movimiento perpetuo, pero también en alusión a fantasmas, demonios y el diablo. Esas descripciones no solo eran metafóricamente sugerentes, sino técnicamente correctas. Cuando Heisenberg se enteró de los bombardeos tras ser capturado —lo detuvieron y llevaron al piso franco del MI6 en Farm Hall, Inglaterra, donde los británicos escuchaban con micrófonos secretos— la describió como la «cosa más diabólica imaginable».

En un artículo sobre la dispersión de fotones de rayos X, publicado en la *American Journal of Physics* en 1946, Arthur Compton describió la explosión de la bomba atómica como un «ejemplo típico» de un suceso marcado por la incertidumbre cuántica. En su opinión, la incertidumbre cuántica había afectado a toda la humanidad. Compton señaló que «las acciones humanas también son

ejemplos de esos sucesos», y no son más predecibles que la «dirección de un fotón concreto de rayos X» que se dispersa «cuando impacta contra un bloque de grafito». Compton seguiría entendiendo la mecánica cuántica como el «vital problema humano de la libertad», y viceversa.

No había sido fácil fabricar la bomba. Su percepción de ese «esfuerzo» no era un efecto secundario ilusorio, sino que reflejaba el ejercicio de su libre albedrío. En su artículo, Compton reprendía a Laplace por idear una manía intelectual que negaba la libertad de acción. Pero viendo la creación de la bomba, añadía: «Tal vez proceda señalar que un físico ya no debe intentar argumentar, como lo podría haber hecho Laplace, que el esfuerzo para lograr un resultado no puede tener sentido». Según Compton: «Laplace afirmaba que un ser que conociera y comprendiera el estado actual del mundo, que supiera la posición y el movimiento de cada una de sus partículas, conocería tanto el pasado como el futuro como si fueran parte del presente». Pero sus investigaciones habían demostrado que la dirección en la que se dispersarían los fotones era impredecible. ¿Adónde irían?: «A priori, ningún perfeccionamiento de nuestros experimentos permite predecir esa dirección».

Ya casi derrotado, el demonio de Laplace sufrió todavía más. Compton enumeró los argumentos habituales que explicaban por qué la imprevisibilidad cuántica era casi invisible para nosotros y desaparecía en conjunto. Incluso si en conjunto la desaparición de los efectos cuánticos dejaba un patrón predecible tras de sí, su predictibilidad era solo una tapadera para operaciones clandestinas a un nivel fundamental. Por esas razones, la incertidumbre cuántica nunca debe descartarse y tildarse de trivial: «Lo que ignoramos es que muchos acontecimientos a gran escala se basan en algún momento en procesos a escala muy diminuta». Algo tan dramático como la bomba atómica podía ser provocado por algo minúsculo, como «la captura de un neutrón» liberado por algún proceso radiactivo. Además, esos efectos diminutos podían surgir de manera indeterminada a lo largo de la actividad humana. Las causas generadas libremente a escala cuántica podían acabar provocando el bien y el mal a nivel humano. Lo inevitable podía no serlo.

La representación de la tecnología como una especie de demonio perfiló muchos relatos científicos durante aquellos años, especialmente en Alemania Occidental, en publicaciones de índole tan dispar como el comentario político o la ficción apocalíptica. En una de sus charlas más importantes sobre la bomba, Szilárd compartió su opinión sobre su creación: «Aunque el primer gran alquimista fue indudablemente Dios, a veces me pregunto si el segundo gran alquimista no

habrá sido el mismísimo diablo». Richard Feynman, otro trabajador de Los Álamos, describió los experimentos del Proyecto Manhattan con peligrosos isótopos radiactivos como «hacerle cosquillas al dragón en la cola».

En Los Álamos, los científicos siguieron experimentando con el material nuclear ya preparado por si hacía falta una tercera bomba. Cuando un accidente le costó la vida a otro estadounidense (el primero también había muerto en un percance), los científicos empezaron a tachar informalmente de «núcleo del demonio» a la esfera de plutonio de seis kilos de material fisionable que quedaba en Nuevo México. En sus memorias de aquellos fatídicos años, Max Born declaró: «Desde los días de Nagasaki e Hiroshima, el átomo se ha convertido en un fantasma [Gespenst] que nos amenaza con la aniquilación». Y escribió: «Nosotros mismos invocamos al fantasma. Nos sirvió con fidelidad durante un tiempo, pero ahora se ha vuelto insubordinado».

LOS AYUDANTES DEL DEMONIO DE LAPLACE

¿Dónde acabaría una bola en la ruleta? ¿De qué lado caería un dado? Incluso después de ver esos avances tecnológicos atados a la física atómica, algunos reductos ilustres siguieron pensando en formas de devolver la ciencia a la senda del determinismo. Los partidarios más fieles de Einstein, como el físico y filósofo Hans Reichenbach, no habían perdido su fe en el poder del demonio de Laplace.

En sus libros *Elements of Symbolic Logic* [Elementos de la lógica simbólica] (1947) y *La filosofía científica* (1951), Reichenbach atribuyó a la criatura de Laplace el poder de determinar lo que normalmente recaía en el azar.

Reichenbach creía que la respuesta podía determinarse con exactitud calculando cada pequeño detalle, desde la dinámica de las fuerzas de quien lanzaba el dado hasta la corriente de aire que afectaba a su caída, pasando por el peso de todos y cada uno de los átomos que podrían hacer que se inclinara y cayera sobre una de sus seis caras. El «superhombre de Laplace» podía contrarrestar esos efectos tan insumisos del azar: «Dicha verificación será técnicamente imposible, pero en principio deberíamos poder predecir los resultados del lanzamiento a partir de las condiciones iniciales, dada la posición del dado, el estado fisiológico de la

persona y otros factores». Confiado, Reichenbach afirmaba: «El superhombre de Laplace podría hacerlo». ¿De verdad? ¿De dónde venía esa confianza?

De vuelta a Alemania, Grete Hermann era optimista y barajaba la posibilidad de utilizar los «ayudantes del demonio de Laplace» para reinterpretar la mecánica cuántica. Los espíritus afines a Laplace podrían trabajar para que las cosas actuaran de forma causal y determinada en el tiempo y el espacio.

Habían cambiado muchas cosas desde que Hermann escribiera su primer texto sobre el demonio de Laplace. Bremen estaba en ruinas. Con Alemania destruida y Japón lamiéndose las heridas de la derrota, ella y otros filósofos, matemáticos y científicos empezaron a preguntarse por los límites de la acción humana en general. Sondearon las profundidades de un universo que había permitido la aparición de personas con el poder de inventar tecnologías para hacer tictac y estallar en busca de respuestas. Fijar los fundamentos filosóficos de la mecánica cuántica resultó una tarea de gigantescas proporciones. ¿Qué revelaba la bomba atómica sobre el progreso de la historia? Como miembro activa de la resistencia durante la guerra, Hermann sabía de primera mano lo difícil, por no decir imposible, que había sido cambiar el trágico curso de los acontecimientos.

Al igual que Compton, Hermann utilizó la bomba atómica para analizar el determinismo, el azar y el libre albedrío en general. Aceptó que los sucesos microscópicos en el impredecible mundo cuántico podían desencadenar otros efectos macroscópicos. Sin embargo, incluso «si los efectos macrofísicos desencadenados por un único electrón fueran mucho mayores y más sostenibles al emplear ese electrón para detonar una bomba atómica», esos efectos no probarían la indeterminación fundamental de la naturaleza. De esos ejemplos, la ciencia no tenía por qué concluir que la incertidumbre cuántica probaba la indeterminación general. Y, por supuesto, no probaba la existencia del libre albedrío.

Tras considerar las interpretaciones dominantes de la mecánica cuántica, en las que «no hay lugar para el demonio laplaciano», Hermann se mostró en desacuerdo, sobre todo cuando dichas interpretaciones se extendían al ámbito de la ética o cuando se empleaban para respaldar una visión particular de la libertad moral. Se mostró especialmente intransigente con las nuevas teorías de la biología cuántica desarrolladas por el físico alemán Pascual Jordan y otros. Para ella, sus argumentos no eran mejores que los de aquellos que invocaban «asistentes demoníacos» para demostrar el determinismo: «El biólogo cuántico

no es más competente que los ayudantes de los demonios de Laplace».

LOS DEMONIOS CIBERNÉTICOS

La mayoría de las máquinas y dispositivos electrónicos que hoy damos por sentados fueron inventados justo después de la Segunda Guerra Mundial. Su característica esencial consiste en que toman mediciones del medioambiente y usan esa información para ajustarse automáticamente a cambios en su entorno.

Un ejemplo clásico es el termostato. Este aparato regula la cantidad de energía que se necesita para mantener una temperatura preestablecida estable. Otros funcionan abriendo o cerrando interruptores, controlando volantes, girando diales y ajustando filtros o palancas en tiempo real. El campo de la ciencia e ingeniería llamado cibernética, derivado de la palabra griega *kybernaein* (gobernar), se enfoca en el desarrollo y funcionamiento de este tipo de dispositivos. Fue popularizado por el matemático del MIT Norbert Wiener en su famoso libro de 1948 *Cibernética o el control y comunicación en animales y máquinas*. Wiener se refería a estos dispositivos como «demonios».

Los demonios cibernéticos podían ser orgánicos o mecánicos. Los humanos se podían considerar como uno de ellos cuando actuaban como tal. Estos demonios podían abarcar grandes sistemas, incluso sociedades completas, cuando estos simples mecanismos se concatenaban. Según Wiener, estos demonios eran «metaestables», es decir, lo bastante robustos como para ser útiles en la práctica, pero condenados a dejar de funcionar algún día. Había demonios tan grandes como la economía, mientras que otros eran tan minúsculos como un nucleótido intracelular que actuaba como una válvula reguladora. Obedecían a ciertas reglas, pero tenían la capacidad para amoldarse a nuevas condiciones, creando así desequilibrios productivos.

Muchos innovadores intentaron construir más de esos demonios dotándolos con dispositivos de memoria y fuentes de entrada de datos (como los teclados, ratones y pantallas táctiles), a fin de que los usuarios pudieran ayudarlos a ajustarse a cambios en su entorno. Estos demonios motivaron el desarrollo de

muchos aparatos electrónicos, entre ellos computadoras y ordenadores programables, y robots dotados con sensores. Científicos e ingenieros desarrollaron tecnologías para que los humanos y máquinas pudieran interactuar entre sí de forma fluida, trabajando en conjunto para responder a cambios en el entorno de manera más efectiva.

Las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial resultaron especialmente fértiles para el estudio y el desarrollo de estos demonios. Si la guerra había sido el momento adecuado para estudiar los demonios cuánticos y ampliar sus efectos a gran escala, la posguerra fue el momento de construir nuevas combinaciones entre los varios demonios de la ciencia, creando grandes cadenas demonio-demonio con habilidades sorprendentes. Las referencias a ellos se convirtieron en el pan de cada día de la ciencia, y la cibernética se convirtió en una auténtica lengua vehicular a través de varias disciplinas.

Poco después de volver a Princeton desde Los Alamos, John von Neumann anunció: «Estoy pensando en algo mucho más importante que las bombas: las computadoras». Las computadoras desempeñaron un papel esencial en la Segunda Guerra Mundial. Se usaron para obtener cálculos complejos necesarios para modelar reacciones y explosiones nucleares. También fueron claves en el área de la criptología. El matemático Alan Turing, por ejemplo, las empleó para descifrar los códigos secretos que los nazis usaban para comunicarse, rompiendo así la clave de la máquina nazi Enigma. Tras la guerra, las computadoras obtendrían un lugar en la ciencia aún más importante.

Pero para ello, tendrían que cambiar. Desde el MIT, Wiener tenía un plan nuevo y brillante. ¿Qué pasaría si se desarrollaran máquinas que sacaran lo mejor del demonio de Laplace y las combinaran con las mejores cualidades de la criatura de Maxwell? Estos robots y autómatas cibernéticos poseerían las habilidades de ambos.

Wiener perfiló la idea básica de la cibernética en una ambiciosa conferencia de 1946. En ella despreció un poco las máquinas que se habían construido hasta entonces: «Son ciegas y sordas y realizan una danza predestinada». Las máquinas del futuro, algunas de las cuales Wiener ayudó a inventar, serían cualquier cosa menos sordas y ciegas. Estarían dotadas de «órganos sensoriales» capaces de reaccionar. No se limitarían a seguir instrucciones y producir resultados predeterminados. Algunas ya se habían probado durante la Segunda Guerra Mundial con un éxito pasmoso: «El fusible de proximidad, que detona un

proyector que reacciona cuando las ondas de radar que él mismo envía se reflejan en el avión objetivo, es un órgano sensorial en el sentido más estricto del término». La guerra terminó antes de que otras máquinas dotadas con «órganos sensoriales» ideadas por Wiener pudieran construirse, pero ya se había gestado el cultivo perfecto para su desarrollo. Durante la guerra, Wiener había realizado cálculos balísticos en los campos de pruebas de Maryland. Ahí observó que los zigzagueos de un piloto temerario recordaban a las partículas del movimiento browniano. Aunque perseguir a un piloto con un arma no era fácil, era mucho más sencillo que perseguir las partículas de movimiento browniano que se movían rápidamente de manera aparentemente aleatoria. Wiener abordó el problema de predecir el movimiento de los pilotos de guerra más hábiles del mundo como si fuera un problema matemático con un límite teórico, e hizo importantes aportaciones a las matemáticas del movimiento aleatorio y la dinámica no-lineal.

La batalla de Inglaterra había puesto a prueba los nervios de los comandantes más intrépidos. Londres ardía, las sirenas gemían y las mujeres y los niños se refugiaban en las estaciones de metro y los refugios. La superioridad de la Luftwaffe alemana parecía innegable desde el cielo, y, para cualquiera que observara los aviones nazis desde tierra, parecía que la guerra solo se ganaría derribando las naves. Desde su despacho del MIT al otro lado del Atlántico, Wiener observaba el desarrollo de los acontecimientos en Europa y se preguntaba, nervioso, cómo podía ayudar.

Un día de invierno de 1940, tocó la puerta de su jefe y le expuso una idea brillante. Poco después, el National Defense Research Committee aceptó su propuesta y le concedió un presupuesto de 2.325 dólares. Unos meses más tarde, ambos presentaron su primer informe, «Análisis del Problema de Predicción de la Trayectoria de Vuelo», y empezaron a trabajar en una nueva máquina bautizada con un nombre soberbio: «el predictor». Wiener y su ayudante recopilaban todos los datos posibles del Consejo de Artillería Antiaérea de Camp Davis y de los campos de pruebas de Aberdeen sobre el comportamiento de los aviones durante los bombardeos, y luego los llevaron al laboratorio. En febrero de 1942, Wiener había escrito uno de sus artículos científicos más famosos, conocido coloquialmente como «el peligro amarillo». Su publicación fue restringida debido a su relevancia militar, pero eso no impidió que el contenido circulara en secreto por los largos pasillos del MIT, donde hizo que muchos más investigadores pensaran en el futuro de las armas inteligentes.

El trabajo de Wiener y Bigelow se convirtió en la base de la cibernética. Su nueva máquina no solo procesaba números como una calculadora: se adaptaba a la información recibida. Calculaba, medía y volvía a calcular, antes de reiniciar el proceso para dar con resultados que se adaptaban a nuevas circunstancias. La máquina actuaba por ensayo y error, aprendiendo y mejorando. Para demostrar el talento del «predicador», Wiener ideó una demostración asombrosa. Mientras un mecanismo proyectaba contra una pantalla un punto luminoso que se movía rápidamente de forma aleatoria, un «seguidor» lo perseguía automáticamente hasta que daba con el objetivo. Su invento era un servomecanismo autodidacta que en teoría se podía adaptar para perseguir y dar con cualquier objetivo. Lo más impresionante era que no solo iba detrás del puntito de luz: aprendía de sus éxitos y fracasos volviéndose cada vez un mejor cazador. El siguiente semestre, en otoño, Wiener demostró el aparato en una clase a sus alumnos proyectando en una pantalla un «blanco» perseguido por un «seguidor» como si los dos estuvieran jugando al pillapilla.

Si se sustituía a un humano por una máquina como esta, y si se montaba en un avión o dron, ¿se podría automatizar por completo toda una batería artillera? ¿Podrían llegar a fabricar una máquina automática que superara al mejor artillero?

Wiener explicó que disparar a un avión era «como disparar a un pato. No se apunta al avión en sí, sino al lugar donde estará el avión cuando llegue el proyectil». Pero derribar un avión era más difícil que un ave, por supuesto. El avión no solo respondía a los disparos con disparos, sino que había veces que había que disparar desde el mar. En estos casos, la montura del cañón sobre una batería naval antiaérea se bamboleaba con el vaivén del barco. Wiener diseñó sistemas de retroalimentación que reaccionaran a esos rápidos cambios para corregir la puntería de los cañones. Estos cañones cibernéticos «inteligentes» podían acumular datos de la experiencia previa para predecir cada vez mejor la ubicación de su objetivo. Lo más inquietante de estos nuevos sistemas era que parecían actuar como si estuvieran dotados de inteligencia e intención.

Al concluir la guerra, Wiener estaba agotado y con los nervios a flor de piel por todas las anfetaminas que había tomado. Así que se fue a México, donde elaboró las ideas de Cibernética o el control y comunicación en animales y máquinas. El demonio de Maxwell ocupó un lugar capital en el libro. Cuando se publicó en 1948, la obra causó tal revuelo que llegó a ser una de las más influyentes del siglo xx. El término «cibernética» pasó a aludir a un nuevo campo de estudio

que se extendía por disciplinas tradicionales, desde la economía a la filosofía, y que abarcaba un amplio abanico de sistemas y tecnologías. Había sistemas grandes y pequeños; había unos nuevos como los robots, y también antiguos, como los timones de barco que se ajustaban para contrastar cambios de corriente. Según un crítico: «Economistas, políticos, estadistas y empresarios no pueden permitirse pasar por alto la cibernética y sus tremendas, cuando no aterradoras, implicaciones».

Wiener comenzaba su relato reprendiendo a los que desechaban al demonio de Maxwell por la simple razón de que su perfecta realización era imposible: «No hay nada más fácil que negar la posibilidad de esos seres». Era más sencillo rechazar a la criatura que tomarla en serio, y siguiendo ese camino íbamos a «perder la oportunidad de aprender algo». Un termostato conectado a un dispositivo de calefacción actuaba como tal demonio: obteniendo información del entorno y procesándola, podía ajustarse para mantener unas moléculas dentro y otras fuera climatizando una habitación de manera artificial. Podía hacer que parte del mundo se enfriara mientras otra parte se calentaba, aprovechándose de la flaqueza estadística de la segunda ley de la termodinámica, justo como lo hacía el demonio de Maxwell. Lo que más fascinaba a Wiener de la criatura era que podía utilizar cierta información de su entorno para producir trabajo de forma inteligente.

Las implicaciones económicas de trazar —e incluso anticipar— la trayectoria futura de sucesos fulgurantes y caóticos resultaban especialmente intrigantes. La habilidad requerida era tan importante para atletas y soldados como para nerds y jugadores. De un piloto, podríamos esperar «que aprovechara sus opciones con la misma inteligencia que esperamos de un buen jugador de póquer», escribió Wiener. Los jugadores de póquer que vencían los pronósticos en Las Vegas, los arbitrajistas y especuladores que jugaban a la bolsa y los pilotos de la Segunda Guerra Mundial que evadían el aluvión de balas sabían utilizar la información sobre las circunstancias futuras más probables y sabían adaptar enseguida su siguiente movimiento: «Por ejemplo, tiene muchas opciones de alterar su posición prevista antes de que llegue el proyectil».

Wiener no creía que las máquinas cibernéticas que él describía infringieran las leyes de la termodinámica. Se aprovechaban momentáneamente oportunidades estadísticas que caracterizaban la segunda ley, pero no la violaban. La retroalimentación era costosa. Muchos otros científicos de la posguerra comprendieron y aceptaron el argumento de Szilárd de que, para funcionar, esos

demonios necesitaban medir, que esa medición era información sobre una situación dada y que obtener esa información requería energía. Pero mientras Szilárd se había ocupado sobre todo de los motores que producían trabajo, Wiener estaba decidido a mejorar los sistemas de comunicación y entenderlos en términos de termodinámica. Estaba totalmente de acuerdo con los exorcismos de Szilárd y Lewis de ese ser.

Wiener escribió que, «a la larga, [el demonio] contrae un “cierto vértigo” y es incapaz de percibir con claridad». Cuando eso ocurre, «deja de actuar como un demonio Maxwell». Pero la fatiga del ser mareado apenas le importaba. Se podía emplear mientras estuviera fresco: «Puede haber un intervalo de tiempo bastante considerable antes de que el demonio se descondicione, y ese tiempo puede ser tan prolongado que podemos hablar de la fase activa del demonio como metaestable». El universo era tan grande que áreas significantes podían liberarse momentánea y localmente de los estragos de la entropía. Donde otros veían entropía, fatalismo y derrota, Wiener veía oportunidades. Su conclusión y su creencia en los demonios eran transparentes: «No hay razón para suponer que los demonios metaestables no existan de hecho».

En verdad, estaban en todas partes, incluso en nuestros hogares. Podían estar vivos o muertos, ser humanos o no serlo. Esas distinciones ya no importaban. El denominador común era su capacidad para invertir la entropía, aunque de manera momentánea y local. Los ejemplos de demonios metaestables incluían «organismos vivos, como el propio hombre», pero también elementos no vivos, como las enzimas y otros catalizadores químicos. Después de publicar su primer texto sobre el tema, Wiener estuvo décadas pensando en cómo construir demonios metaestables y dónde encontrarlos: «Un lugar para buscar demonios de Maxwell podría ser el fenómeno de la fotosíntesis» como el que utilizan los árboles y plantas para crecer frondosos. Wiener añadió otros candidatos importantes que funcionaban de esa manera como los virus, los genes, los aminoácidos, los cristales y otros fenómenos naturales con propiedades de organización autónoma, como los copos de nieve.

La investigación sobre los demonios metaestables aumentó espectacularmente cuando los investigadores se percataron de los trucos que el ser de Maxwell podía jugar en la electrónica y en las nuevas redes de comunicaciones. En la intersección de dos ramas de la ciencia, la termodinámica y la ingeniería de comunicaciones, apareció una nueva interpretación del demonio de Maxwell. Mientras los motores empujaban átomos de un lugar a otro, las tecnologías de la

comunicación empujaban electrones de un extremo a otro de un canal. Ambas gastaban energía. Si el demonio de Maxwell de los motores dejaba pasar ciertas moléculas y no otras, el demonio de Maxwell de las comunicaciones dejaba pasar ciertas frecuencias y no otras, como un filtro telefónico. Wiener reiteraba que el ruido y la entropía estaban relacionados. Ambos eran un tipo de desorden y debían eliminarse para permitir la predicción.

El reto de la comunicación perfecta entre personas y entre las personas y el futuro resultó no distar tanto del reto de construir una máquina de movimiento perpetuo. El demonio, que tradicionalmente se había pensado que afectaba solo a motores y máquinas, incidía de repente en nuestro entendimiento de la información.

Las computadoras, consideradas más que nada como motores de datos, se calentaban y, al calentarse, empezaban a distorsionar la información que producían. Como explicó Wiener: «En un gran aparato como la ENIAC o la EDVAC, los filamentos de los tubos consumen energía. Salvo que dispongamos de un aparato adecuado de ventilación y refrigeración, el sistema sufrirá el equivalente mecánico de la pirexia, hasta que las constantes de la máquina cambian radicalmente por el calor, y su rendimiento se desploma». El MIT, IBM (International Business Machines), Bell Labs (la sucursal de investigación de AT&T) y Western Electric eran lugares magníficos para estudiar los demonios que bebían información y alteraban los mensajes al pasarlos de un lugar a otro.

Estudiar la relación de la información con la termodinámica fue clave para el éxito de la emergente economía de la información. Si un demonio podía actuar sobre las comunicaciones, sobre el eslabón clave de nuestro tejido social, podía afectar tanto al orden político como a las vidas privadas.

Cuando se publicó Cibernética de Wiener, el matemático Claude Shannon escribió la reseña para la revista Proceedings of the Institute of Radio Engineers, en la que escribió: «Wiener elabora una conjetura interesante: las paradojas del “demonio de Maxwell” pueden resolverse teniendo en cuenta la información recibida por el “demonio” en los cálculos de la entropía». Y concluyó: «Si esto se pudiera verificar con un experimento, tendría una importancia considerable». Shannon había estudiado en el MIT, donde había hecho una asignatura con Wiener, antes de trasladarse a Bell Labs para unirse al equipo que trabajaba en tecnologías antiaéreas. Por aquel entonces, ya esperaba como el santo advenimiento la próxima publicación de Wiener, Cibernética. Como él mismo

reconoció, «la teoría de la comunicación debe mucho a Wiener por gran parte de su filosofía y teoría básica».

¿Qué grado de eficiencia podía alcanzar un motor de información concebido como un demonio de Maxwell? ¿Qué podían hacer los científicos para acercarse lo máximo posible a los límites non plus ultra de las leyes de la termodinámica? Para responder a esas preguntas, Shannon utilizó la palabra bit, un acrónimo inglés nacido de la combinación de las palabras binary (binario) y digit (dígito), acuñado por su colega John Tukey.

El concepto del bit se generalizó en informática, donde se refería a la materia operandi más elemental del demonio de Maxwell. En teoría, un bit era la unidad más pequeña de transmisión de la información, la cantidad mínima necesaria para clasificar y sortear, el símbolo básico del ábaco más diminuto que pudiera existir en el universo, la cantidad de inflexión más diminuta, una entidad tan liviana y exigua que se acercaba a lo insignificante sin serlo. Las consecuencias causadas por un cambio en un pequeñísimo bit podían ser trascendentales: buenas en el momento y el lugar adecuados, y catastróficas en el momento y el lugar equivocados. Un error de transcripción tan sencillo como un «sí» que se transforma en un «no», un cero de más, o un voto adicional en una elección peleada, podía desencadenar conclusiones inesperadas.

Las capacidades aparentemente contradictorias de una unidad tan pequeña la convertían en el parangón de la falsa modestia y de la elegancia discreta. Los resultados del trabajo de Wiener y de la revolucionaria teoría matemática de la comunicación de Shannon no se ciñeron a los círculos técnicos donde nacieron. Pronto se utilizaron para comprender sistemas mucho más amplios, como la bolsa de valores, los juegos de azar, la inteligencia artificial y los resultados electorales en gobiernos democráticos. Hoy conocemos a diario ejemplos de esta revolución.

INFORMACIÓN Y SIGNIFICADO

Léon Brillouin era un renombrado físico francés de una familia de ilustres científicos que estaba dispuesto a poner el último clavo en el ataúd de Laplace. Cuando los nazis tomaron París, Brillouin fue enviado a Vichy con otros

funcionarios del Gobierno francés. A los pocos meses de asumir su nuevo cargo, el físico decidió cambiar de bando. Emigró a Estados Unidos, donde obtuvo un puesto en la Universidad de Wisconsin-Madison y luego en la Universidad Brown. Pronto empezó a trabajar para los aliados. Concluida la guerra, Brillouin decidió permanecer en Estados Unidos y se trasladó al Laboratorio Cruft de Harvard antes de abandonar definitivamente el mundo académico para trabajar en IBM.

Al oír hablar de la cibernética de Wiener, Brillouin quedó fascinado. Le parecía «un campo de investigación totalmente nuevo y una idea de lo más revolucionaria». Las nuevas investigaciones sobre el demonio de Maxwell en términos de la cibernética lo convencían de que se podía acercar mucho al sueño de construir un mundo de eficiencia perfecta al obtener trabajo y energía gratis. En un artículo en *American Scientist* señaló: «Recordemos la paradoja del demonio de Maxwell, ese ser submicroscópico que cuida de una puertecilla y la abre dejando pasar solo a las moléculas rápidas, seleccionando, así, aquellas que poseen mayor energía y temperatura». «¿Cómo se hace factible a gran escala?», se preguntó.

Brillouin había quedado muy impresionado no solo con la bomba atómica, sino con el proceso de investigación que resultó en el descubrimiento de la energía nuclear. Se sumó a muchos otros pensadores que consideraron ese ejemplo histórico como prueba de la importancia de entender los demonios de la ciencia y sus acciones demoníacas, es decir, como un ejemplo de cómo acciones locales estadísticamente improbables y diminutas podían combinarse y llegar a provocar transformaciones históricas mundiales.

La guerra se había ganado explotando recursos naturales preexistentes de una manera inverosímil y original: «El uranio permaneció estable y tranquilo durante miles de siglos hasta que llegaron unos científicos que construyeron un reactor y una bomba y, como niños traviesos en la cocina, volaron una ciudad entera». ¿Qué otras fuentes de energía podían ser descubiertas y aprovechadas? Brillouin comparó el uranio con otras reservas de energía permanentes, como una roca que se encuentra en equilibrio sobre un acantilado y puede volcarse fácilmente creando un gran efecto, o una reserva de petróleo que solo «espera la llegada de los exploradores».

Para Brillouin, era importante analizar las actividades «al margen del segundo principio» de la termodinámica. Estas eran palpables y omnipresentes en el

mundo macroscópico. Los humanos las realizaban a diario y sin reparar en ellas: «¡El hombre abre la ventana cuando hace calor y la cierra en los días de frío!». Debido al gran tamaño del universo, «las condiciones prohibidas a pequeña escala están permitidas a gran escala». Siguiendo ese hilo de pensamiento, Brillouin se preguntó cómo podían los científicos aprovechar la «entropía negativa» que se escondía en ciertas partes del universo. Ciertos minerales, fuentes de agua, yacimientos de petróleo, calorías y sistemas biológicos —como fermentos y levaduras— producían efectos que contrarrestaban el flujo entrópico del universo. A veces, para desatar las fuerzas contra la entropía solo se necesitaba combinar un material común con un catalizador adecuado.

Para poder aprovechar las diminutas oportunidades que brindaba el universo era esencial entender cómo el demonio de Maxwell lograba aprovecharse de la flaqueza de las leyes de la termodinámica. Pero ¿por qué acababa cansándose y fracasando?

Según Brillouin, la razón principal por la que el demonio «submicroscópico» de Maxwell no podía continuar con sus travesuras eternamente surgía de la dificultad de observar las moléculas con las que operaba al estar atrapado en un recipiente oscuro. Brillouin señaló que, para verlas y manipularlas, la criatura de Maxwell necesitaba algo de luz. Sin ella, estaba literalmente perdido: «El demonio simplemente no verá las partículas a menos que le demos una linterna».

En los años posteriores, muchos libros de texto de física incluyeron una imagen del demonio de Maxwell sosteniendo una linterna. La lección que surgía de este nuevo entendimiento del demonio como un ser que necesitaba de la energía de la luz era que su antorcha planteaba un inconveniente: al inyectar esta energía en el sistema, la antorcha se agotaba y acababa apagándose. Cualquier demonio que portara una antorcha fracasaría en misiones de larga duración, ya que «una antorcha es obviamente una fuente de radiación. [...] Vierte entropía negativa en el sistema». Pero tal entendimiento del demonio también traía lecciones sobre cómo se podían construir prototipos mejorados.

Ahondando en una ingeniosa y «sistemáticamente ignorada» sugerencia de Wiener, especuló que «después de equipar al demonio con una linterna, podremos añadir también algunas células fotoeléctricas y diseñar un sistema automático que haga el trabajo». El montaje era sencillo: «El demonio no tiene por qué ser un organismo vivo, ni es necesaria la inteligencia». Una máquina equipada con «ojos» contruidos usando células fotoeléctricas que reaccionaran

a un estímulo visual podría accionarse solo en momentos clave, y así invertir la entropía, aunque de forma local y momentánea.

Aunque eventualmente se apagara el fuego de la antorcha o se agotaran las pilas de la linterna, valía la pena explorar todo lo que podría hacer el demonio antes de caer en la oscuridad. Brillouin señalaba que la venerada segunda ley no solía «cumplirse en términos estrictos». Los casos poco probables podían parecer «una especie de milagro», pero difícilmente tenían un origen misterioso o religioso. Aunque momentáneos y locales en conjunto eran tan numerosos que Brillouin no veía ninguna ventaja en pensar en la segunda ley como si fuera inviolable. Su importancia dependía del tamaño del universo, un territorio tan inmenso que tensaba el intelecto más allá de lo razonable.

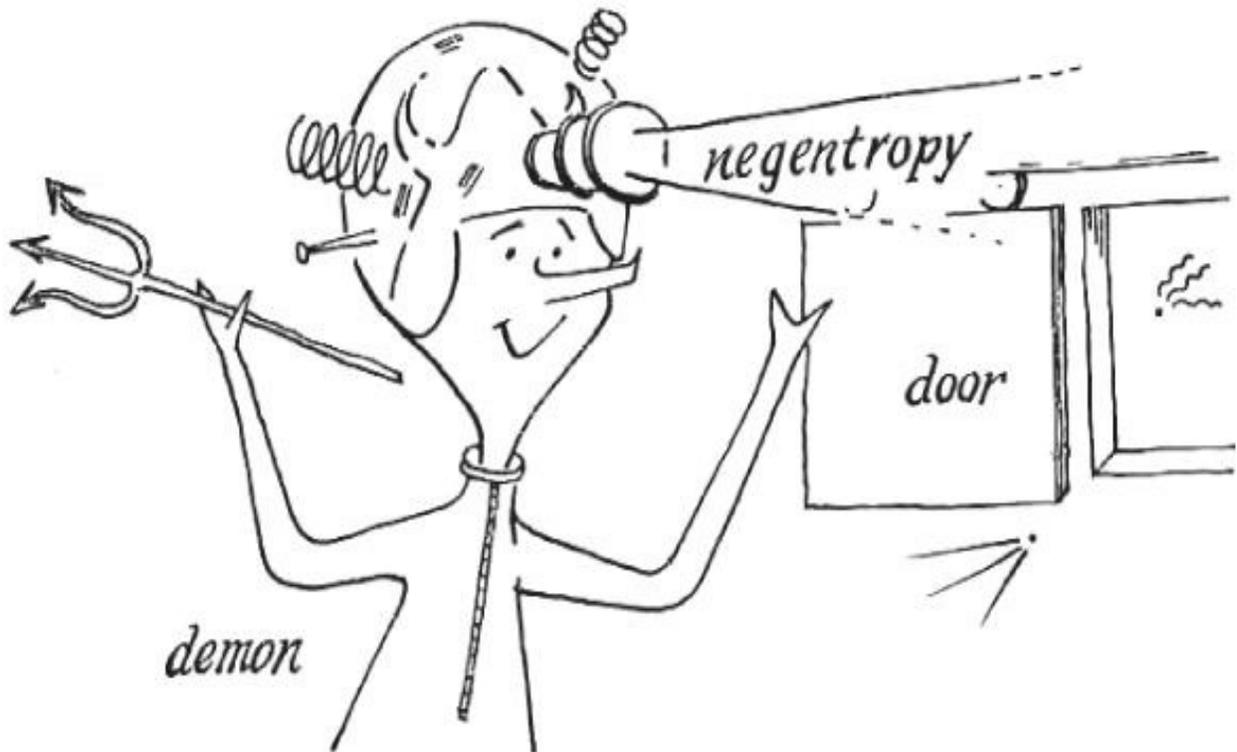
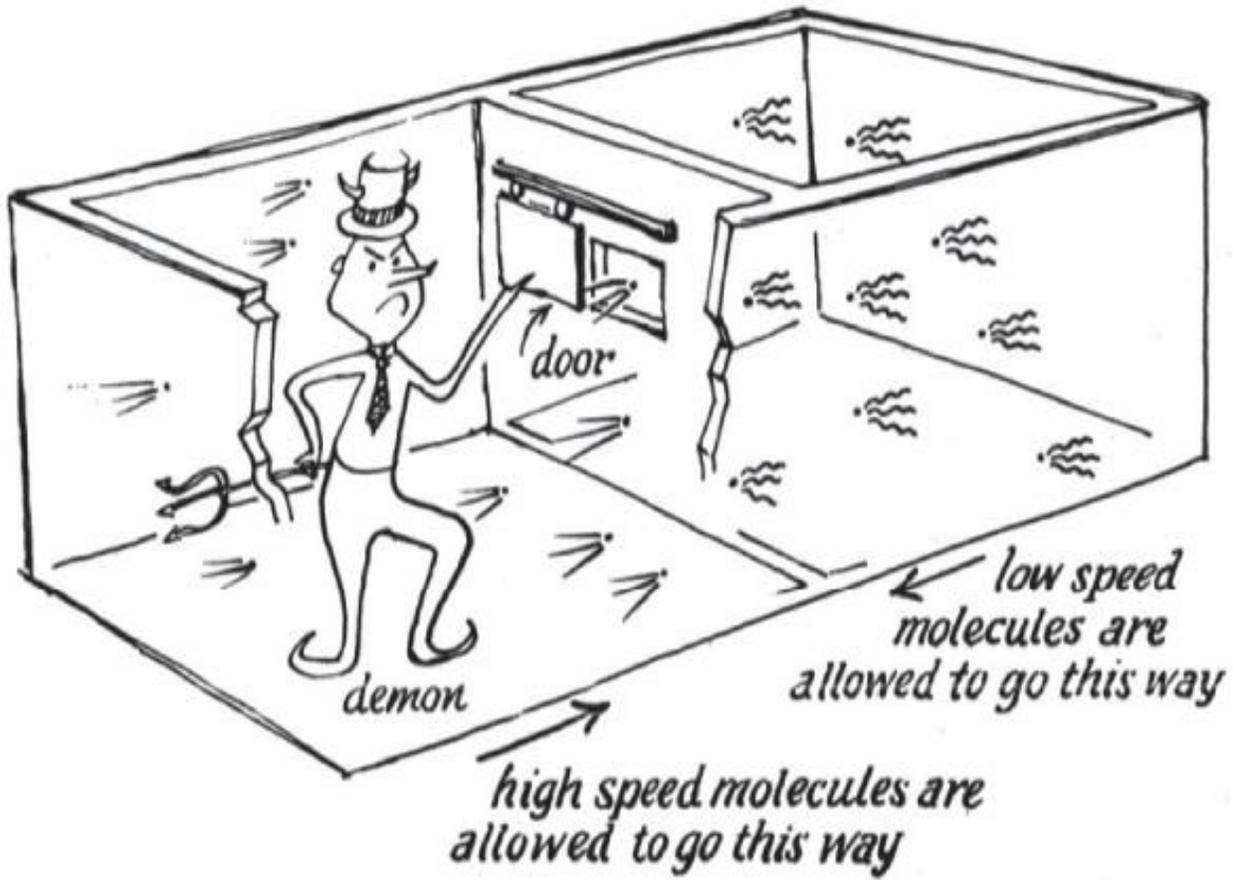


FIGURA 3. Stanley W. Angrist y Loren G. Hepler, *Order and Chaos* (Nueva York: Basic Books, 1967), pp. 195, 197.

Ilustraciones del profesor Ed Fischer Jr.

Según el físico francés, «es mejor no hablar de “la entropía del universo”». ¿Por qué? «Porque esto, en mi opinión, está mucho más allá de los límites del conocimiento humano». El tema llevó a los investigadores a plantearse preguntas enredadas como: «¿El universo es finito o infinito?»; «¿Sabemos si es hermético o tiene fugas?»; «¿La entropía y la energía tienen fugas de entrada o salida?». Como si estuviera atrapado en una galería de espejos de preguntas difíciles o imposibles de contestar, Brillouin concluyó con firmeza: «Huelga decir que ninguna de estas preguntas tiene respuesta».

A medida que avanzaba la investigación sobre los demonios en la Era de la Información, los investigadores empezaron a indagar en una nueva serie de problemas. ¿Cuál era la diferencia en términos de la física entre la información significativa y la trivial? ¿El conocimiento en general, y el científico en particular, tendría que figurar en la misma hoja de contabilidad energética que cualquier otro tipo de información? ¿La física podía explicar esas diferencias?

Brillouin arrojó luz al nuevo problema: «Tomemos un número de *The New York Times*, el libro *Cibernética* y su equivalente peso en papel. ¿Tienen la misma entropía? Según la definición física habitual, la respuesta es que sí». Pero responder afirmativamente era una «conclusión precipitada». Para Brillouin, el valor informativo no podía determinarse de la misma manera que otros valores físicos. Si actuaban con información especialmente significativa, los científicos podían detener durante un tiempo la caída entrópica. Sin embargo, la mayoría de los estudios sobre el significado de la información pertenecían al campo de las humanidades, que se oponían al campo de la ciencia donde se analizaba como una cantidad física. El travieso infractor descrito por estos científicos empezó a abrir una brecha entre la teoría de la comunicación en la filosofía y las humanidades y la teoría de la información en la física.

Algunos científicos como Brillouin, Wiener y Shannon no creían que hubiera una correspondencia exacta de uno a uno en el gasto de energía y la obtención de

información significativa. Para ellos, y para otros que seguían explorando la posibilidad de interactuar con la naturaleza de tal manera que se obtuvieran resultados improbables, el quid estaba en reexaminar la relación de la información física con el significado.

Considerando la información como una energía cuantificable, algunos científicos empezaron a olvidar que la información solo era valiosa si era significativa. En esas discusiones no solo estaba en juego la naturaleza de la realidad, sino las posibilidades y limitaciones de nuestra capacidad para comprender el universo en términos científicos. Las consecuencias fueron graves. Si el universo se podía entender como un conjunto de bits de información, ¿qué significado tenía el significado?

FOTOCÉLULAS, LOS OJOS MÁGICOS

La noticia sobre la posibilidad de construir una máquina que funcionara sin coste cautivó al público durante una conferencia del 2 de marzo de 1951 en la Universidad de Edimburgo. Su ponente fue Dennis Gabor, un físico de origen húngaro y amigo íntimo de Szilárd que llegaría a ganar un premio Nobel. Un nuevo demonio, una versión cuántica de la criatura de Maxwell, llevaría su apellido. Gabor describió a su público una máquina imaginaria. Según Brillouin, «el contenido de la conferencia se dio a conocer al gran público distribuyendo una pequeña cantidad de notas mimeografiadas, que desde entonces han sido ampliamente citadas en la literatura». El MIT y el Imperial College de Londres invitaron a Gabor a describir en detalle su invento.

A simple vista, la máquina imaginaria de Gabor parecía «un perpetuum mobile del segundo tipo». Para entender cómo operaba, Gabor resumió las investigaciones anteriores sobre los demonios, desde la termodinámica hasta el movimiento browniano, empezando por Maxwell: «Una de las ideas más fructíferas en este sentido vino de Clerk Maxwell, que planteó la cuestión de los demonios que abrían una válvula para las moléculas rápidas de un gas y la cerraban para las lentas». Luego habló de las investigaciones de Smoluchowski: «Eso suscitó una duda aún más simple: ¿por qué no añadir un resorte a la puertecilla, para que se abriera por sí sola solo con una molécula rápida?». Esa

investigación inauguró la cuestión del «demonio inteligente», la idea que fascinó a Szilárd y a tantos otros después.

A diferencia de otros artilugios de esa clase, la máquina imaginaria de Gabor estaba equipada con «elementos fotosensibles» de última generación. Con ese equipamiento, podría determinar cuándo debía abrir o cerrar un pistón. ¿Podría violar las leyes de la termodinámica? Lógicamente, Gabor dedujo que no. Su *perpetuum mobile* fallaría debido al efecto de los fotones utilizados para observar las moléculas. Los fotones necesarios para «ver» una partícula interactuaban con ella, añadiendo entropía al sistema. Aunque la ciencia de sus conferencias era compleja, su conclusión era prosaica: «No podemos obtener algo a cambio de nada, ni siquiera una observación, ¡y mucho menos una ley de la naturaleza!».

Gabor recalcó las limitaciones del demonio de Maxwell, pero también demostró que el coste energético de obtener información era realmente bajo y encontró la fuente exacta del coste. Los fotones que el demonio necesitaba para ver sus objetivos moleculares eran tan minúsculos que se podía pensar en la eficiencia en términos de su energía. Los demonios podían utilizar una cantidad tan minúscula, como la constante de Planck $h\nu$, para detonar una bomba, provocar una avalancha, causar una reacción en cadena o algo aún mayor.

En sus clases sobre teoría de la comunicación en el MIT, Gabor recordaba a sus alumnos que había información mucho más valiosa que otra: la mínima cantidad física de la información no equivalía a su valor real. «Creer que eso es lo que vale cualquier “sí” o “no” (por ejemplo, el “sí” o “no” que decide una guerra) sería de lo más absurdo». Pese a sus limitados poderes, esos pequeños poltergeists podían ser extremadamente útiles si se usaban con inteligencia. Muchos otros científicos de los años cincuenta llegaron a la misma conclusión que Gabor: aunque no se pudiera construir un demonio de Maxwell perfecto que funcionara eternamente a escala humana, los que ya existían, aun con sus limitaciones, se podían emplear con gran efecto.

Ahora bien, esa tarea no era nada fácil. Para emplearlos inteligentemente, había que determinar cuáles eran los puntos de intervención más significativos del universo. Hablando de las nuevas aventuras de los demonios que operaban con elementos fotosensibles, *Journal of Applied Physics* publicó un artículo de Brillouin titulado «El demonio de Maxwell no puede funcionar». En su texto, el físico reconsideró la cuestión describiendo una máquina equipada con una

«célula fotoeléctrica» equivalente a los ojos mágicos del demonio: «Podemos sustituir al demonio por un dispositivo automático dotado de un “ojo mágico” que abre la trampilla cuando es conveniente». Brillouin también concluyó que la cantidad de energía desperdiciada en el proceso de detección de fotones era asombrosamente baja, de la magnitud de la constante de Boltzmann, y que eso se aplicaba «tanto al demonio de Maxwell como al científico en su laboratorio».

Brillouin advirtió que el físico en su laboratorio no estaba «en mejores condiciones que el demonio»: «El físico que hace una observación transforma la entropía negativa en información». Ahora se podían construir nuevos motores dotados de ojos mágicos fotosensibles, y sus poderes eran tan asombrosos que Brillouin los explicó acuñando la palabra «neguentropía», un neologismo para referirse a la entropía negativa o a la entropía de signo opuesto. ¿De qué forma podían crear más los científicos?: «Entonces podemos preguntarnos si el científico es capaz de cambiar la información en neguentropía de algún tipo».

Brillouin sugirió que los científicos crearían bolsas de neguentropía en el universo porque podrían crear cada vez más máquinas con esas facultades: «Con esas leyes, es capaz de diseñar y fabricar máquinas y equipos que la naturaleza nunca había producido; estas máquinas representan estructuras improbables y, ¿la baja probabilidad significa neguentropía?». Utilizando su cerebro e «ideando algún ingenioso artilugio», podían frenar la devastación de la entropía. Brillouin se metió en un complejo cenagal filosófico. Su análisis de los artilugios que casi podían cubrir sus propios gastos le llevó a preguntarse si lo mismo ocurriría en el sector de la innovación. No estaba seguro. «Terminemos con este interrogante, absteniéndonos de analizar más a fondo el proceso del pensamiento científico».

El ejemplo del demonio de Gabor llevó a los científicos a encontrar valiosas lecciones sobre las limitaciones del conocimiento humano y a cuestionarse sus posibilidades. ¿Inyectaban más entropía en el universo de la que reducían de manera local con sus ingeniosos artefactos? ¿Consumían ellos más energía de la que producían? ¿Podían luchar contra la devastación de la entropía a largo plazo librándose de la descomposición general de todas las cosas gracias al poder de su mente? ¿Acaso la información, el conocimiento y la inteligencia podían otorgar la salvación, especialmente en un mundo de recursos escasos o limitados? ¿O era su inteligencia comparable a cualquier viejo motor? Estas preguntas los llevaron a pensar en cuál debía ser el propósito principal de la ciencia y cuál sería la organización óptima de la intelectualidad para lograr el progreso universal.

VARIABLES OCULTAS

El debate sobre la entropía, la información y los conceptos asociados fue ampliándose a partir de entonces. El debate más extenso de Wiener sobre los demonios y la entropía apareció en *The Human Use of Human Beings* [El uso humano de los seres humanos] de 1950. Volvió a presentar la versión habitual del ser de Maxwell como un «portero» que manejaba una compuerta diminuta, pero rápidamente pasaba de ese ejemplo al de acciones demoníacas a escala humana o mayor. ¿En qué sentido eran las multitudes de gente que iban o volvían del trabajo por la mañana y por la tarde diferentes de las multitudes de partículas moleculares de la física?: «Tal vez pueda exponer mejor esta idea describiendo una multitud que se agolpa en el metro para entrar por la puerta giratoria. Imaginad que una de las puertas solo deja salir a la gente si avanza a cierta velocidad, y la otra solo deja salir a la gente se mueve lentamente».

Tales puertas actuarían como el demonio encargado de separar moléculas. Según Wiener, «el movimiento fortuito de la gente en el metro se verá como una corriente de personas que se mueven rápidamente para salir por la primera puerta giratoria, mientras que la segunda solo dejará pasar a las personas que se muevan despacio». Si esas dos puertas dirigieran a los peatones rápidos en una dirección y a los lentos en la otra, «obtendríamos una fuente de energía útil de la aglomeración fortuita de la gente». Ese sencillo escenario ya suponía una infracción provisional de la segunda ley.

Wiener consideraba que la entropía era como el diablo en persona; no su signo, ni su manifestación ni su encarnación. Era verídicamente el archienemigo. A la hora de interpretar los estragos de la entropía, el matemático era categórico y apocalíptico: «El científico trabaja siempre para hallar el orden y la organización del universo, y por eso juega una partida con el archienemigo: la desorganización. ¿Es un diablo maniqueo o agustino?».

Wiener trató de conocer mejor a esos dos diablos para determinar «la táctica que hay que emplear contra ellos». La personalidad del primero exigía una estrategia específica: «El diablo maniqueo es un oponente que, como cualquier otro, está decidido a ganar, y utilizará cualquier ardid o disimulo para obtener la victoria».

Este diablo no muestra sus cartas y cambia su estrategia en plena partida: «En concreto, mantendrá en secreto su política de confusión, y, si mostramos algún signo de que empezamos a desentrañar su política, la cambiará para que sigamos ignorándola». El otro diablo es simplemente «la medida de nuestra propia debilidad». Tal vez debamos utilizar «todos nuestros recursos para descubrirlo, pero, una vez descubierto, en cierto sentido lo exorcizamos. No alterará su política sobre un asunto previamente decidido con la mera intención de confundirnos más». El primer demonio «recurrirá fácilmente al farol», añadiendo un nuevo nivel de complejidad a la lucha «con la intención a permiternos ganar con el farol, pero también para impedir que la otra parte gane en virtud de la certeza de que no vamos a farolear». El primer diablo posee una «malicia ladina», mientras que el otro «es estúpido». Como concluyó Wiener: «Juega un juego duro, pero, con nuestra inteligencia, podemos derrotarlo tan completamente como si lo rociáramos con agua bendita».

Wiener estaba completamente inmerso en su interpretación de la ciencia y la tecnología en base a demonios, hadas y fantasmas. Así cautivó a su público en la Academia de las Letras de Nueva York, recordándoles que «los cuentos de hadas esconden moralejas muy sabias para muchas cuestiones relevantes de la vida moderna». Para Wiener, las fronteras entre la brujería y el trabajo científico se habían vuelto demasiado difusas: «La brujería fue perseguida durante la Edad Media. En aquella época, algunos artilugios de tipo moderno habrían terminado en la horca o en la hoguera por brujos».

Reinterpretando esa época, argumentó que «la brujería no era el uso de lo sobrenatural, sino el uso del poder humano para otros fines que no fueran elevar la gloria de Dios». Valía la pena recordar las lecciones aprendidas en la época medieval, especialmente la historia del pescador y el genio. En el relato, «el pescador abre una botella que ha encontrado en la orilla del mar y de ella sale un genio». La aventura se complica cuando «este amenaza con vengarse de él por su propio encarcelamiento». En el cuento de hadas todo acaba bien. Pero Wiener advierte de que, en la vida real, «cuando nos metemos en problemas por culpa de las máquinas, no podemos encerrarlos otra vez en la botella».

A pesar de estos riesgos, Wiener no dejó de trabajar ni de pensar en los demonios. Un día descubrió una nueva investigación que le entusiasmó en sumo grado. La había liderado el físico e ingeniero Jerome Rothstein, que había trabajado durante el Proyecto Manhattan en la separación de isótopos para obtener el material necesario para las bombas atómicas. Como muchos otros de

su generación, a Rothstein le interesaba la mecánica cuántica. También le atraían las nuevas implicaciones filosóficas y metafísicas que conllevaban esos descubrimientos. Si la física teórica se encontraba en una especie de callejón sin salida metodológico (dados los candentes debates sobre la interpretación de la materia cuántica), ese callejón era sumamente productivo.

En un artículo publicado en Science en 1951, Rothstein se planteó la posibilidad de reinterpretar la mecánica cuántica mediante un nuevo demonio: «Un demonio que pudiera obtener información física de una forma distinta a la medición podría ver un universo causal». Los seres limitados como los humanos no podrían lograr tal hazaña, ya que solo conocían cosas observando y realizando mediciones que alteraban los sistemas cuánticos.

Pero ¿qué pasaría si hubiera un demonio capaz de ver de forma muy distinta, de una manera que los humanos no conocemos, pero que fuera físicamente viable? Encontraría el modo de averiguar si el gato de Schrödinger estaba destinado a vivir, incluso antes de saber si la partícula subatómica iba a soltar el veneno. Este demonio, ¿podría intervenir y salvar al gato? Rothstein creía que la ciencia no había descartado esa posibilidad. Con estas especulaciones revivió la ficción de un demonio sigiloso que podía lograr mucho más que todos los demás simplemente por poder predecir el comportamiento de los sistemas cuánticos.

Tras trabajar en la separación de isótopos, Rothstein se incorporó a los Laboratorios de Investigación y Desarrollo del Ejército y al Departamento de Electrónica de Estado Sólido de la División de Electrones de los Laboratorios de Ingeniería del Cuerpo de Señales. Luego abandonó el ejército y trabajó en algunas de las tecnológicas más innovadoras de su época. Investigó máseres, láseres, rayos X, electrónica médica y biónica, y entró a la vez en los departamentos de informática, ciencias de la información y biofísica de la Universidad Estatal de Ohio para investigar el espacio exterior. Rothstein mantuvo correspondencia con Einstein. The New York Times publicó artículos sobre su trabajo. Su formación científica contrastaba con su instrucción autodidacta como humanista en «áreas que mis colegas suelen ver con cierto recelo» como «la metodología, la filosofía y la metafísica». Hoy, es prácticamente un desconocido.

Cuando Wiener leyó las nuevas investigaciones de Rothstein sobre los demonios, empezó a pensar en la futura dirección que podía tomar la mecánica cuántica. La relación entre la luz y la entropía le parecía de lo más intrigante:

«De hecho, algunos trabajos que se están realizando sobre la interacción entre la materia y la luz polarizada nos están acercando mucho a la fabricación, si no de un demonio de Maxwell, sí de algo muy parecido».

Para eludir la segunda ley, los científicos solo debían encontrar un «mecanismo de apertura y cierre de la compuerta» que dependiera de alguna señal que anticipara la trayectoria de la partícula y determinara «en cierta medida su posición y su momento». Si se investigaba más la relación entre los fotones de luz y la entropía, tal vez se podría descubrir el modo: «Como ha demostrado el señor Róthstein, esta reacción es mucho más profunda y va más allá de las raíces de la propia física cuántica». Era ahí, supuso Wiener, donde se podía «intentar completar la síntesis largamente ansiada entre las consideraciones cuánticas y la relatividad». Si se encontraba la creatura conjeturada por Rothstein, «un demonio capaz de obtener información física de otra forma que no fueran las mediciones», los científicos podrían sortear las limitaciones de la termodinámica de manera más productiva y derribar los obstáculos que prevenían obtener la certidumbre. «Tengo la intención de trabajar en este campo en un futuro próximo», afirmó Wiener, lleno de optimismo.

Einstein necesitaba aliados. Acababa de cumplir setenta y un años y era más famoso que nunca. Aparecía constantemente en portadas de revistas, en las noticias, e incluso en series de televisión. Acababan de publicarse sus notas autobiográficas. En su «autonecrología», Einstein reflexionó sobre las aportaciones que había hecho a lo largo de su vida. Pensaba que su trabajo sobre la relatividad era análogo al que habían realizado otros antes que él sobre las máquinas de movimiento perpetuo: «La relatividad es un principio restrictivo para las leyes naturales, comparable al principio restrictivo de la no existencia del perpetuum mobile que subyace en la termodinámica». Había propulsado la comprensión molecular de la naturaleza y defendido la estadística molecular que le había quitado al demonio de Maxwell casi todo el viento que impulsaba sus alas al encerrarlo dentro del territorio de lo poco probable. Había puesto límites a la velocidad de desplazamiento permitida en el universo y con eso había acabado con el colega del demonio de Maxwell. Pero ahora tenía que hacer frente a la posible existencia de nuevos demonios cuánticos que podían «saltar» más rápido que la luz y que ponían en entredicho la posibilidad de llegar a conocer el mundo de manera determinista.

En la primavera de 1950, Einstein respondió a una carta de Rothstein mostrando por qué pensaba que la ciencia estaba avanzando hacia un rumbo equivocado.

Tras una conversación de tres horas seguida de más misivas, Einstein y Rothstein llegaron a la conclusión de que, si la mecánica cuántica era correcta, la comprensión vigente de la realidad física tenía que ser errónea. «La cuántica era su demonio», escribió Abraham Pais, colega y biógrafo de Einstein.

En 1954, un año antes de morir, Einstein escribió a Louis de Broglie, uno de los primeros científicos seducidos por la idea de las «ondas piloto», para decirle: «Debo de parecer un avestruz escondiendo siempre la cabeza en la arena relativista para no tener que enfrentarme a esos villanos cuánticos». Para entonces Broglie ya había abandonado el proyecto de intentar conciliar el indeterminismo estadístico de la mecánica cuántica con la dinámica tradicional. Como la mayoría de los físicos de su generación, y de la que vino después, Broglie había llegado a aceptar el indeterminismo como un aspecto fundamental de la naturaleza.

El desarrollo de la electrónica y las telecomunicaciones durante la Guerra Fría había obligado a los investigadores a enfocarse en el estudio de los fotones y electrones a nivel subatómico. Los demonios cuánticos habían dejado de ser un tema arcano estudiado por un puñado de científicos inmersos en proyectos bélicos de alto secreto. Habían pasado a la vanguardia de la física.

LOS DEMONIOS DE BOHM

Hacia un par de décadas que el clásico texto de Neumann sobre los fundamentos de la mecánica cuántica recibía muchos elogios por su explicación del demonio de Maxwell. Se esgrimía como prueba definitiva contra la posibilidad de encontrar «variables ocultas» en la mecánica cuántica. Esas variables, aún no descubiertas o posiblemente imposibles de descubrir, podrían revelar aspectos de la naturaleza que mostraran su funcionamiento causal y determinista. En caso de ser halladas, podrían utilizarse para demostrar que la indeterminación cuántica se debía a nuestro conocimiento incompleto del universo, y no a una característica fundamental de él. Si se encontraran esas variables, los aspectos más perturbadores del mundo cuántico (como la no localidad y la incertidumbre) desaparecerían y el demonio de Laplace podría cobrar nueva vida.

Tras empezar su doctorado en Berkeley bajo la tutela de Robert Oppenheimer, al

físico David Bohm se le prohibió trabajar en Los Álamos dadas sus afiliaciones comunistas. Einstein, quien compartía algunas de sus simpatías izquierdistas, acogió a Bohm bajo su amparo en Princeton. Allí le brindó el apoyo que necesitaba para trabajar en un libro titulado Quantum Theory [Teoría cuántica], publicado en 1950. El libro de Bohm trataba en detalle el exorcismo de Szilárd y reafirmaba las conclusiones principales de Neumann y otros físicos cuánticos: «La irreversibilidad entra en la teoría cuántica de forma integral, lo cual contrasta notablemente con la teoría clásica». El año que se publicó su libro, Bohm fue detenido por negarse a declarar ante el Comité de Actividades Antiestadounidenses de la Cámara de Representantes por sus presuntos vínculos con el comunismo. Aunque fue absuelto un año después, perdió su plaza en Princeton y decidió trasladarse a Brasil, donde esperaba burlar el largo brazo del macartismo.

En un polémico y muy comentado artículo de 1952, Bohm presentó una interpretación alternativa de la mecánica cuántica basada en «variables ocultas» u «ondas piloto». Su investigación no obtuvo una gran acogida, pero hizo que algunos científicos pensaran que la imposibilidad de obtener con precisión total ciertas mediciones no era motivo para abandonar la creencia en el concepto de determinismo causal. Más bien al contrario. Se podía seguir suponiendo de buena fe que algo (o alguien) fuera de nuestro conocimiento actual pudiera estar actuando secreta y misteriosamente para producir estos efectos. En debates posteriores sobre el trabajo de Bohm, el actor sospechoso de estas posibles acciones se empezó a denominar «demonio de Bohm», «demonio bohmiano», «demonio subcuántico» y, en un epíteto particularmente original, «la surrealista bruja de Bohm».

A mediados de la década, algunos científicos creían que las discusiones sobre demonios se les estaban yendo de las manos. A Werner Heisenberg, que había descubierto el principio de incertidumbre y había dirigido el programa alemán de física nuclear durante la Segunda Guerra Mundial, no le hacían ni pizca de gracia quienes intentaban resucitar el demonio de Laplace. No se cansaba de rebatir a quienes, como Einstein, intentaban salvar el determinismo. Según él, los científicos no deberían llegar a conclusiones basadas en la posible existencia de ciertas criaturas imaginarias. En La imagen de la naturaleza en la física actual de 1955, se opuso al determinismo retomando la idea «expresada por Laplace en la ficción de un demonio». En sus Conferencias Gifford en la Universidad de St. Andrews (Escocia), durante los meses de invierno de 1955-1956, Heisenberg se enfrentó a quienes seguían esperando que una estrategia o criatura nueva

«podiera conducir de nuevo» a una «descripción completamente objetiva de la naturaleza». Tratando de poner fin a la lista creciente de seres imaginarios utilizados por la ciencia, concluyó: «Es inútil discutir sobre lo que podríamos hacer si fuéramos seres distintos». Aunque no mencionó el uso que hacía Hermann de los demonios ayudantes de Laplace, los tenía muy presente.

Brillouin estaba de acuerdo con Heisenberg: no tenía sentido intentar resucitar el demonio de Laplace y el ideal determinista que representaba. El físico acababa de conseguir financiación de la National Science Foundation para publicar las conferencias que había dado en Columbia, Berkeley e IBM en forma de libro. *Science and Information Theory* [Ciencia y teoría de la información] salió en 1956. Brillouin convenció a los lectores de la posibilidad de emplear los demonios de Maxwell para invertir el flujo natural de la entropía mediante sencillos dispositivos electrónicos. En un capítulo titulado «El demonio exorcizado», invitaba a los alumnos a «investigar las posibilidades brindadas por el demonio» y mostrar cómo se le podía dar un buen uso. El demonio de Maxwell funcionaba como un «rectificador ideal que actuaba sobre electrones individuales» y «contradecía el segundo principio». Aunque el físico advertía de que en la práctica «no existe ningún rectificador ideal», los que poseían los ingenieros se parecían mucho a uno.

El libro de Rothstein *Communication, Organization, and Science* [Comunicación, organización y ciencia] de 1958 fue más lejos. En el prefacio explicaba que le parecía «divertido» que se pudieran «expresar las tres leyes de la termodinámica en clave demoníaca». Estas tres grandes leyes de la física anulaban los poderes de tres demonios, dos de ellos con nombres de físicos. Según Rothstein, «la primera ley excluye la existencia de un demonio que crea energía de la nada, la segunda hace lo mismo con el demonio de Maxwell, mientras que la tercera se deshace del demonio de Laplace».

La reunión de la American Physical Society celebrada en Pasadena en enero de 1959 brindó a Rothstein una oportunidad de oro para presentar su metodología demonológica. Asistieron varios cientos de científicos. *The New York Times* habló de su conferencia con titulares portentosos: «UN CIENTÍFICO DA A LOS DEMONIOS SU MEREcido»; el “demonio de Aladino” se suma a la lista de imposibles que ayudan a los físicos». El artículo informaba: «Ayer, la demonología fue elevada a un pedestal al lado de temas mucho más concretos en un informe para la American Physical Society». El periodista del rotativo citaba al presentador, quien había dicho: «Incluso en su ponencia los demonios tienen

la última palabra», ya que el título anunciado había sido cambiado por uno de ellos: «El título debía ser Physical Demonology [Demonología física], pero salió, debido a un error tipográfico, como Physics Demonology [Demonología de la física]». Al parecer, Rothstein consideraba que hablar de los demonios era útil porque obligaba a los físicos a alejarse de la jerga técnica y volver a la sustancia significativa: «El uso de los demonios puede ser una especie de “higiene semántica” para evitar que los científicos digan disparates». El artículo resumía las razones dadas por Rothstein explicando por qué había llegado el momento de reintroducir los demonios en el pensamiento científico: «Es una teoría que, según él, es especialmente aplicable a los problemas teóricos de la automatización y la teoría de las comunicaciones que implican el uso de computadoras electrónicas enormemente complejas, [porque] se trata de un reino tan nuevo que a veces es difícil detectar la línea que separa lo posible de lo imposible».

A SCIENTIST GIVES DEMONS THEIR DUE

'Aladdin's Demon' Added to
List of Impossible Imps
That Help Physicists

By HAROLD M. SCHMECK Jr.

Demonology was elevated to a place beside far more concrete topics yesterday in a report to the American Physical Society.

The demons, a special breed amusing and helpful to physicists, were discussed in a theoretical physics session at the final day of the society's annual meeting at the New Yorker Hotel.

Jerome Rothstein, the physicist who gave the report, defined a demon as a hypothetical being not constrained by one of the fundamental laws of physics.

Thus, he said, any physical law can be considered as "anti-demon legislation," showing that the existence of the particular demon involved is impossible.

Two such impossibleimps called Maxwell's demon and Laplace's demon, he remarked, actually have legitimate places in scientific terminology.

Maxwell's demon is named for James Clerk Maxwell the nineteenth-century British physicist who formulated the electromagnetic theory of light. Pierre Simon de Laplace, French mathematician and astronomer who died in 1827, was noted for his

contributions to celestial mechanics and other mathematical problems.

The more venerable is Laplace's demon, which hypothetically flouts one of the fundamental laws of thermodynamics by knowing the exact position and velocity of every particle in the universe.

Would Be Omniscient

Such a demand would be omniscient because, given that knowledge, he could calculate all physical events both past and future. However, the demon must remain hypothetical because such knowledge would be possible only if everything were at absolute zero in temperature, a condition itself considered impossible.

The fallacy required to make Maxwell's demon possible was the cause of much speculation on the possibility of perpetual-motion machines during the nineteenth century, Mr. Rothstein said.

This demon would be capable of sorting out the excited hot molecules of a gas from colder, or sluggish, ones without affecting the whole system in any other way. This also is held impossible.

Mr. Rothstein has nominated another hypothetical creature, which he calls Aladdin's demon because its specialized—and impossible function—would be the creation of matter out of nothing.

To a physicist, he said, this kind of demonology can give a worth-while fresh look at complex problems on the forefront of knowledge.

It is an approach that, he said, is especially applicable to

theoretical problems in automation and communications theory that involve the services of hugely complex electronic computers. This is a realm so vast and new, he said, that it is sometimes difficult to detect the line between the possible and impossible.

Uses of Demons Cited

The difficulties can be expected to increase as science advances in this field, Mr. Rothstein said. The use of demons can be a sort of "semantic hygiene," he said, to prevent scientists from inadvertently talking nonsense.

Mr. Rothstein, a senior scientific executive in the Boston engineering and research concern of Edgerton, Germeshausen & Grier, Inc., said that even in his paper the demons had the last word. The title was supposed to be "Physical Demonology," he noted, but came out, because of a typographical error, as "Physics Demonology."

Among the many significant non-demoniacal papers given yesterday was a proposal for a device to measure the speeds

of sub-atomic particles to within a tenth of a per cent of the speed of light.

The device, under development at the University of Michigan, would be useful in nuclear physics experiments with accelerators, or "atom smashers," of extremely high energy, according to Donald I. Meyer, who gave the report. The device would make it possible to distinguish particles having a velocity of 99.9 per cent of the speed of light from those moving at 99.8 per cent. This, he said, would be equivalent to measuring the time light takes to travel about three-eighths of an inch. The speed of light is 186,000 miles a second.

FIGURA 4. Harold M. Schmeck Jr., «A Scientist Gives Demons Their Due: “Aladdin’s Demon” Added to List», New York Times (1 de febrero de 1959), p. 2. © 1959 The New York Times Company. Todos los derechos reservados. Usado bajo licencia.

A pesar de no tener instrucción formal en filosofía, Rothstein consiguió publicar un artículo en la prestigiosa revista *Philosophy of Science*. Su «Termodinámica y algunas cuestiones físicas indecibles» explicaba una vez más el progreso de la ciencia en clave demoníaca: «El tema de la “demonología física” no carece de interés por sí mismo, y está relacionado con este artículo». Inventar demonios era útil: «Porque, si un demonio se define como una entidad hipotética capaz de hacer cosas que los humanos no pueden hacer debido a alguna ley natural, entonces uno puede inventar un demonio capaz de decidir una cuestión físicamente indecible. Y la indecidibilidad equivale a proscribir ese demonio». Estaba aludiendo a su obra anterior, en la que había añadido un tercer ser hipotético: el genio de Aladino de Las mil y una noches, que cumplía las órdenes de quien sostenía la lámpara donde habitaba. Rothstein convirtió el genio de Aladino en un demonio de la ciencia, señalando que también podía denominarse «demonio de la primera ley».

Rothstein aseguró a sus lectores que llevaba muchos años trabajando en ese tema, citando su propio trabajo anterior: «La naturaleza informativa y organizativa inherente a las leyes físicas siempre permite expresar una ley como legislación antidemoníaca. [...] [Hasta ahora], dos de las tres (la de Maxwell y la de Laplace, correspondientes a la segunda y la tercera ley de la termodinámica) son informativas, y la otra (el demonio de Aladino, la primera ley de la termodinámica) tiene la capacidad de crear energía de la nada». Una versión de su conferencia en la American Physical Society apareció publicada con el título «Demonología física» en una revista internacional de cibernética y lingüística. «Cualquier ley puede formularse como la inexistencia de algún demonio», señalaba Rothstein. Los más interesantes eran los que habían prestado un gran servicio en disciplinas científicas concretas, los que «se inventaron, no ad hoc, sino antes de comprenderse bien las leyes».

La ciencia moderna «mató» y «destruyó» a los demonios, a veces con

misericordia y otras con crueldad:

El genio de Aladino, capaz de crear materia y energía de la nada, es asesinado por la primera ley. El demonio de Maxwell, que adquiría información física (mediciones) sin pagar un aumento equivalente en entropía, es destruido por la segunda ley. El demonio de Laplace (ya sea el original o una versión cuántica), que conocía el estado del universo en un momento dado, así como todo el pasado y todo el futuro, recibe su golpe de gracia de la tercera ley (imposibilidad de que la temperatura llegue al cero absoluto).

La distinción entre los demonios no era tajante, ya que todos compartían un cierto linaje: «La mayoría de los demonios ad hoc son equivalentes al genio de Aladino, híbridos de los demonios de Aladino y Maxwell o Laplace, o variaciones o especializaciones más o menos sofisticadas de los dos últimos». El genio de Aladino y el demonio de Maxwell tenían una relación especialmente complicada: «La proscripción del genio de Aladino no da necesariamente el golpe de gracia al demonio de Maxwell, aunque ya hemos visto que el primero puede hacerse pasar por el segundo». La relación del demonio de Maxwell con el de Laplace era básicamente de tamaño: «El demonio de Laplace es el de Maxwell en grande». Y el genio de Aladino, o el «demonio de la primera ley», mandaba sobre ellos y podía apoderarse del trabajo de los otros: «El de la primera ley es el más potente de todos los demonios termodinámicos. Puede simular lo que hacen los demonios de Maxwell y Laplace». Además de los «más resistentes e interesantes de la especie», Rothstein encontró «demonios de Laplace júniores» (a los que también se refería como «D. L. Jr.») que eran demonios cuánticos y de la relatividad, pero en esa fase de sus investigaciones todavía no estaba seguro de su verdadera naturaleza: «Por lo tanto, de momento debemos abstenernos de juzgar si los demonios cuánticos y júnior de Laplace son distintos, si están relacionados o si son idénticos». Él tenía una corazonada sobre los demonios cuánticos y de la relatividad: «Sospecho, y subrayo que es solo una sospecha, que, cuando se formule una mecánica cuántica relativista, ambos demonios resultarán ser el mismo».

Rothstein, muy atento a las triquiñuelas de los demonios de la ciencia, recalcó la lección más importante de su estudio: que estos demonios eran poderosos, pero

no todopoderosos: «Los demonios omnipotentes y omniscientes son incompatibles con la termodinámica». El estudio de los demonios podía ayudar a los científicos a determinar qué máquinas eran imposibles de fabricar, permitiéndoles construir las más viables. Gracias al estudio de los demonios, podrían saber qué aspectos de las máquinas valía la pena mejorar para acercarse lo máximo posible al ideal demoníaco, aun sabiendo que ciertas características no podrían imitarse jamás a la perfección: «Así pues, la formulación demonológica de la termodinámica y otros campos puede revestir algo más que relevancia histórica, filosófica o humorística: puede evitar los intentos de diseñar máquinas tan inviables como un dispositivo de movimiento perpetuo». Con la ayuda de esas criaturas, la energía mental y física de los innovadores no se malgastaría persiguiendo fantasías vanas, sino objetivos alcanzables. El acoplamiento «de aparatos medidores, computadoras y máquinas controladas por estas (que toman decisiones con arreglo a la información suministrada por los aparatos medidores) ha dado lugar a aparatos tan versátiles y poderosos que son comparables a un demonio». Esas innovaciones eran tan mágicas que «seguramente, el impacto de esas máquinas en personas con una visión medieval sería tan grande como el de un verdadero demonio».

El trabajo demonológico atrajo la atención de los periodistas, causó estupor entre el público y puso en entredicho los escrúpulos de algunos colegas de Rothstein. Pero eso no impidió que en los círculos técnicos se siguieran investigando. El científico austro-estadounidense Heinz von Foerster, que trabajaba en la Subdivisión de Sistemas de Información de la Oficina de Investigación Naval de la Universidad de Illinois en Urbana, fue uno de los muchos que reconsideraron los demonios de Laplace y Maxwell en relación con la mecánica cuántica. En un simposio de mayo de 1959, explicó que su demonología se basaba en sistemas entrelazados de demonios «internos» y «externos»: «Si se permite trabajar juntos a ambos demonios, lo tendrán increíblemente más fácil» que si se les «obliga a trabajar solos». Si se les concatena así, pueden aproximarse a su antigua gloria: «Hoy, esos tipos no son tan hábiles como antes. [...] Antes de 1927, podían vigilar un orificio arbitrariamente pequeño por el que el recién llegado tenía que dejar pasar y calcular con una precisión arbitrariamente elevada el momentum» de una partícula. Ahora, «por desgracia, están ceñidos por el principio de incertidumbre de Heisenberg». Ese mismo año, Brillouin publicó un artículo que se sumó al montón que estaba publicando la revista Nature respecto a las nuevas investigaciones: «Hace más de un siglo, Laplace inventó un demonio [que] esta discusión exorciza». Brillouin concluyó: «El principio de neguentropía de la información ya ha respondido de forma terminante a la paradoja del demonio de

Maxwell, y elimina el demonio de Laplace sin más discusión».

EL DEMONIO DE BORN

Tras leer los últimos trabajos de su amigo francés Brillouin, Max Born, célebre por su interpretación estadística de la mecánica cuántica, volvió a aludir al demonio de Laplace en una conferencia. Primero, explicó por qué había surgido la necesidad del demonio de Laplace: «Dado que las artes de la observación y la aritmética requeridas» por la física clásica «parecen exceder las capacidades humanas, (a finales del siglo xviii) el astrónomo Laplace habló de un espíritu demoníaco capaz de hacerlo todo y de emular el ideal del físico». Born contó que la idea se había extendido como la pólvora y, en su opinión, de manera injustificada a otras áreas como la historia, la sociología y la economía, influyendo en la ideología e incluso en la política: «Hubo y hay escuelas, como el materialismo marxista, que buscan predecir de manera correcta e infalible el desarrollo social y político de la humanidad». Los entusiastas de ese demonio olvidaban que el laplaciano [der Laplacesche Dämon] solo podía hacer su trabajo cuando podía «medir con absoluta precisión», algo que en muchos casos era imposible.

Born concluyó: «Somos hombres, no demonios. El demonio ya es solo un ideal lejano». Como la posibilidad de la medición absoluta solo funcionaba para «un poder demoníaco, no humano», Born argumentó que el concepto del determinismo, junto con el demonio correspondiente, ya no era válido, aunque investigadores como Einstein no quisieran desprenderse de él. No compartía ninguno de sus reparos: «Si se quiere representar el determinismo en la literatura, yo lo llamaría una novela fantástica; lo que conocemos como ficción». Born estaba dispuesto a dejar de creer en esa ficción: «Yo también disfruté de esa novela durante mucho tiempo, hasta que me di cuenta de que no reflejaba la realidad». Si la incertidumbre cuántica había sacado los colores al demonio de Maxwell, la muerte del de Laplace ya se había anunciado tres veces.

Entre los que seguían embelesados con lo que Born tajaba como una «novela» de ficción resaltaba Bohm que todavía buscaba al demonio que devolvería la ciencia a la senda del determinismo. Creyendo en un posible «cambio de

paradigma inminente en la teoría cuántica», organizó un coloquio en la Universidad de Cambridge en 1967. Uno de los veinticinco invitados al coloquio fue Rothstein, que también trataba de desestabilizar la consolidada interpretación dominante de la mecánica cuántica. En el volumen publicado, Rothstein acentuaba las paradojas de la mecánica estadística «Loschmidt, Zermelo, irreversibilidad y demonios varios». Aunque la interpretación dominante de la física cuántica se basaba en la suposición de que no existían fuerzas que encauzaran a las partículas cuánticas en un determinismo causal, él recalca que el hecho de no haberlas podido detectar hasta ese momento no significaba que nunca las fueran a hallar.

Durante aquellos años, un puñado de científicos pensaron que el intento de reinstaurar el demonio de Laplace en su posición suprema era un proyecto digno. Al mismo tiempo, sin embargo, la mayoría estaba de acuerdo en que la forma que Bohm proponía para llevarlo a cabo y la forma en que Rothstein lo hizo (invocando explícitamente a los demonios) requerían más cambios en la metafísica, la epistemología y la lógica de los que la ciencia permitía, incluso en el ambiente contracultural de los años sesenta. Pero lo que ya quedaba claro era que el materialismo tradicional, surgido de la vieja división cartesiana entre alma y cuerpo, ya no parecía un marco viable para comprender nuestro lugar en el universo. Eugene Wigner explicó el nuevo paradigma en «Observaciones sobre la cuestión mente-cuerpo», escrito pocos años antes de ganar el Premio Nobel de Física: «El epítome de esa creencia era la convicción de que, conociendo la posición y la velocidad de todos los átomos en un instante de tiempo, podríamos calcular el destino del universo para todo el porvenir». Esa convicción había quedado en entredicho, como había quedado en entredicho la creencia de que podía trazarse una línea clara entre la mente y la materia.

XI

LOS DEMONIOS INFORMÁTICOS

En los años cincuenta, los pioneros en inteligencia artificial (IA) desarrollaron una nueva estrategia de programación creativa para romper los límites de lo que se podía lograr con los ordenadores. El criptólogo y matemático Alan Turing articuló el nuevo enfoque.

Turing sostenía que había que abandonar la visión de Laplace como modelo de programación informática. En vez de diseñar computadoras que siguieran algoritmos y alcanzaran resultados previamente determinados, había que programarlas para que aprendieran por sí solas. Esas máquinas, diseñadas para ser más inteligentes que nosotros, podrían llegar a resultados correctos que no comprenderíamos.

Con esas nuevas técnicas de programación, las computadoras no seguirían órdenes predeterminadas, sino que harían «algo que nosotros no entendemos en absoluto». Entonces, si los científicos dotaban a «la máquina de los mejores órganos sensoriales que el dinero podía comprar, y luego le enseñaban a entender y hablar inglés», sus capacidades podrían ser ilimitadas. Esta clase de programas caracterizan el nuevo método de programación extensible que impulsa la mayoría de los sistemas de IA y que suscita temores generalizados, desde el miedo a la introducción de sesgos sutiles en los sistemas automatizados hasta el temor de que la IA se apodere por completo de nuestro mundo e incluso del universo.

Una vez acabada la guerra, Turing encontró tiempo para pensar detenidamente en el futuro de las computadoras. En el año 1950 publicó un ensayo que cambió para siempre la historia de la computación. En «Maquinaria computacional e inteligencia», publicado en la revista *Mind*, analizó a fondo la idea de Laplace y señaló que la concepción laplaciana de la inteligencia ya casi se había materializado en las computadoras con las que él mismo trabajaba, como la Manchester Mark I.

Turing admiraba las ambiciones científicas de la «visión de Laplace», ya que «a partir del estado completo del universo en un instante de tiempo, descrito por las posiciones y velocidades de todas las partículas, debería ser posible predecir los estados futuros». Las computadoras podían realizar esos cálculos: «Incluso cuando valoramos las máquinas físicas reales, en lugar de las máquinas utópicas, conocer con precisión razonable el estado en un momento dado ya permite conocer con precisión razonable cualquier momento futuro». Con esas nuevas máquinas, «la predicción que estamos considerando se acerca bastante más a la práctica que la que planteó Laplace».

Esos poderes habían acarreado problemas imprevistos. En el «universo en su conjunto», era imposible calcular todas las consecuencias a partir de las condiciones iniciales, como se había imaginado. Un cambio diminuto en una única condición podía «tener efectos desmesurados en un momento posterior». La omisión del más mínimo detalle podía echar por la borda cualquier cálculo futuro, con consecuencias potencialmente mortales: «El desplazamiento de un solo electrón en una milmillonésima parte de un centímetro puede marcar la diferencia entre que un hombre muera sepultado por una avalancha al cabo de un año o se salve». La brillante idea de Laplace era imperfecta debido a su perfección.

Turing propuso otra estrategia. Mucha gente consideraba que una prueba, como jugar al ajedrez, podía determinar la inteligencia de humanos o computadoras. Pero Turing sugirió que ese criterio también podía dar lugar a errores. Él propuso una prueba de inteligencia nueva y original basada en un criterio totalmente distinto: un conocido juego de salón de la época conocido como el juego de imitación. Quizás ese juego se asemejaba más a nuestra concepción general de la inteligencia que el mismísimo ajedrez. Y lo sorprendente era que también podía ser más fácil construir una máquina a la que se le diera bien ese juego.

El juego de imitación solía tener tres jugadores. Un jugador era el interrogador, que no veía a las otras dos personas y hacía preguntas para intentar adivinar el género de cada una: hombre o mujer. De los otros dos jugadores, uno intentaba que el interrogador llegara a una conclusión errónea. ¿Se podía programar una computadora para que asumiera el papel de un jugador y «diera respuestas que típicamente daría un hombre» para embaucar al interrogador y ganar la partida? De ser así, la máquina habría engañado al interrogador haciéndole creer que era humana, independientemente de su género.

El «test de Turing» se impuso enseguida como criterio para valorar la inteligencia artificial. Si una computadora era casi indistinguible de un ser inteligente como el Homo sapiens, ¿por qué había que negarle ese estatus? El artículo de Turing desmontaba sistemáticamente a renombrados detractores de la idea de que las computadoras pudieran poseer inteligencia, como la famosa «objeción de Ada Lovelace». Turing calculó que se necesitarían sesenta trabajadores codificando a la velocidad que codificaba él y trabajando sin parar durante cincuenta años para poder programar una computadora que rindiera bien en el juego de imitación.

EL PANDEMÓNÍUM DE SELFRIDGE

Al otro lado del Atlántico, los informáticos seguían una estrategia diferente en pos de un objetivo similar. En otoño de 1958 se produjo un gran avance. Durante cuatro intensos días, destacados científicos de todo el mundo se reunieron en el Laboratorio Nacional de Física (NPL) de Reino Unido para hablar de la mecanización de los procesos de pensamiento.

En su discurso de apertura de la primera mañana, el director del NPL aludió a Descartes: «El proceso de pensamiento evoca la famosa observación de Descartes: Cogito ergo sum, Pienso, luego existo». Pero señaló que los sucesos recientes requerían otra máxima: «Permítanme invertir la proposición de Descartes y decir que, ya que existimos, podemos pensar. Por lo tanto, pensemos con algún fin». Una brillante presentación cuando el congreso estaba a punto de terminar revolucionó por completo la disciplina. Su publicación en las actas del simposio la convirtió en un texto fundacional de la informática y la inteligencia artificial.

El informático del MIT Oliver Selfridge supo aplicar la nueva estrategia utilizando subrutinas llamadas «demonios». Esos demonios informáticos empezaron a popularizarse en la década de los sesenta, cuando un proceso demonio se definió como «un proceso del sistema (no del usuario) de ejecución automática». Marvin Minsky y otros pioneros de la inteligencia artificial encargaron a estudiantes de posgrado del MIT que programaran más y más demonios o daemons para ayudar a los ordenadores a adquirir conocimientos

generales. Los «mailer daemons del correo electrónico», los «demonios de internet» y otros que realizaban tareas en segundo plano permitieron la comunicación entre humanos y máquinas. Los diccionarios no tardaron en añadir una nueva acepción a la entrada «demonio» para incluir su variante informática.

El término empezó a usarse para aludir a un tipo de programa que «se ejecuta en segundo plano sin intervención del usuario, ya sea de forma continua o solo cuando se activa automáticamente a través de un evento o condición particular». Recientemente un historiador del internet calculó que «los demonios son producto de piratas informáticos, desarrolladores de programas libres, empresas de telecomunicaciones y la industria de infraestructuras de red, valorada en 41.000 millones de dólares».

Selfridge sostuvo ante los participantes del congreso que nuevos avances en el campo requerían que los científicos cambiaran su mentalidad respecto al pensamiento. La razón por la que las «máquinas pensantes» habían sido incapaces de superar un nivel elemental era sencilla: las computadoras solo hacían lo que se les ordenaba. Solo producían lo que se les daba de antemano. Bombeaban electrones por un conjunto determinado de cables, igual que en la antigüedad se bombeaba agua por un conjunto determinado de conductos y canales. En ambos casos, se seguía servilmente la ruta de un algoritmo.

Selfridge argumentó que los límites de las computadoras no solo estaban en el algoritmo que tenían que seguir, sino en la conceptualización equivocada de sus capacidades. Nunca llegarían a ser más inteligentes si solo se les daba una secuencia de reglas a cumplir. Su nueva propuesta era similar a la de Turing. Algo sabía él sobre la relación entre la inteligencia y las convenciones. Era nieto ilegítimo del millonario propietario de los grandes almacenes británicos Selfridges. Su padre había embarazado a una empleada en el negocio familiar y, rompiendo con toda tradición, se habían marchado a los Estados Unidos.

De vuelta al Viejo Continente, donde había nacido en secreto, presentó su ponencia titulada «Pandemónium: un paradigma para el aprendizaje». Desde el podio, se dirigió a algunos de los investigadores más destacados sobre el tema de la inteligencia artificial y argumentó que el progreso dependía de que se programaran las computadoras para actuar como «demonios». En lugar de obligarles a seguir reglas fijadas de antemano, los programas con demonios probarían distintas estrategias y opciones y se adaptarían sobre la marcha, en función del éxito o del fracaso que tuvieran acometiendo la tarea dada. Una

multitud de «demonios» y «subdemonios» trabajarían en paralelo organizados jerárquicamente. Los de abajo trabajarían entre bastidores, como lo hacían los dependientes de la tienda familiar, realizando tareas sencillas y repetitivas, y luego convocarían a los que estaban por encima de ellos en la jerarquía del programa informático.

La presentación de Selfridge causó sensación. El éxito de su nuevo enfoque hizo que las computadoras programadas así parecieran tan inteligentes que los científicos empezaron a preguntarse si la propia mente humana funcionaba del mismo modo. Algunos psicólogos cognitivos empezaron a referirse a las etapas del pensamiento de la computadora y la mente inteligente indistintamente en referencias al trabajo de estos «demonios». Pronto el trabajo de Selfridge se convirtió en un modelo de inteligencia general tanto para las computadoras como para los humanos.

En la tercera sesión de la conferencia, Selfridge introdujo los demonios sin rodeos: «No vamos a disculparnos por el uso frecuente de terminología antropomórfica o biomórfica, [ya que] nos parece útil para describir nuestras ideas». Propuso un modelo de inteligencia artificial basado en una jerarquía de demonios vociferantes que trabajaran en distintos planos, llamando la atención de los que estaban más arriba en la jerarquía y siendo escuchados dependiendo de lo fuerte que gritaran: «Cada demonio cognitivo computa un chillido. Y de todos los chillidos, el demonio del nivel más alto, el decisorio, simplemente escoge al que gritó más fuerte». A esos «demonios cognitivos» se les encargaría avanzar haciendo adivinanzas y comparaciones sencillas entre sus conjeturas y ciertas mediciones. Cuando la conjetura lanzada por el demonio se acercaba al objetivo, se le ordenaba pegar un grito. Cuanto mayor era la coincidencia, más fuerte se desgañitaba. El funcionamiento básico de los demonios informáticos, programados para seguir reglas «si-entonces», era similar al que realizaban los de Maxwell: si molécula caliente, entonces detener; si fría, entonces dejar pasar. Esta actividad —que los microprocesadores gestionaran bits para que fueran en una dirección y no en otra— funcionaba tanto a nivel de programa como de la máquina física. ¿Cuánto más inteligentes podían llegar a ser? ¿Podrían servir para reducir la entropía, o incluso para eludir la segunda ley de la termodinámica?

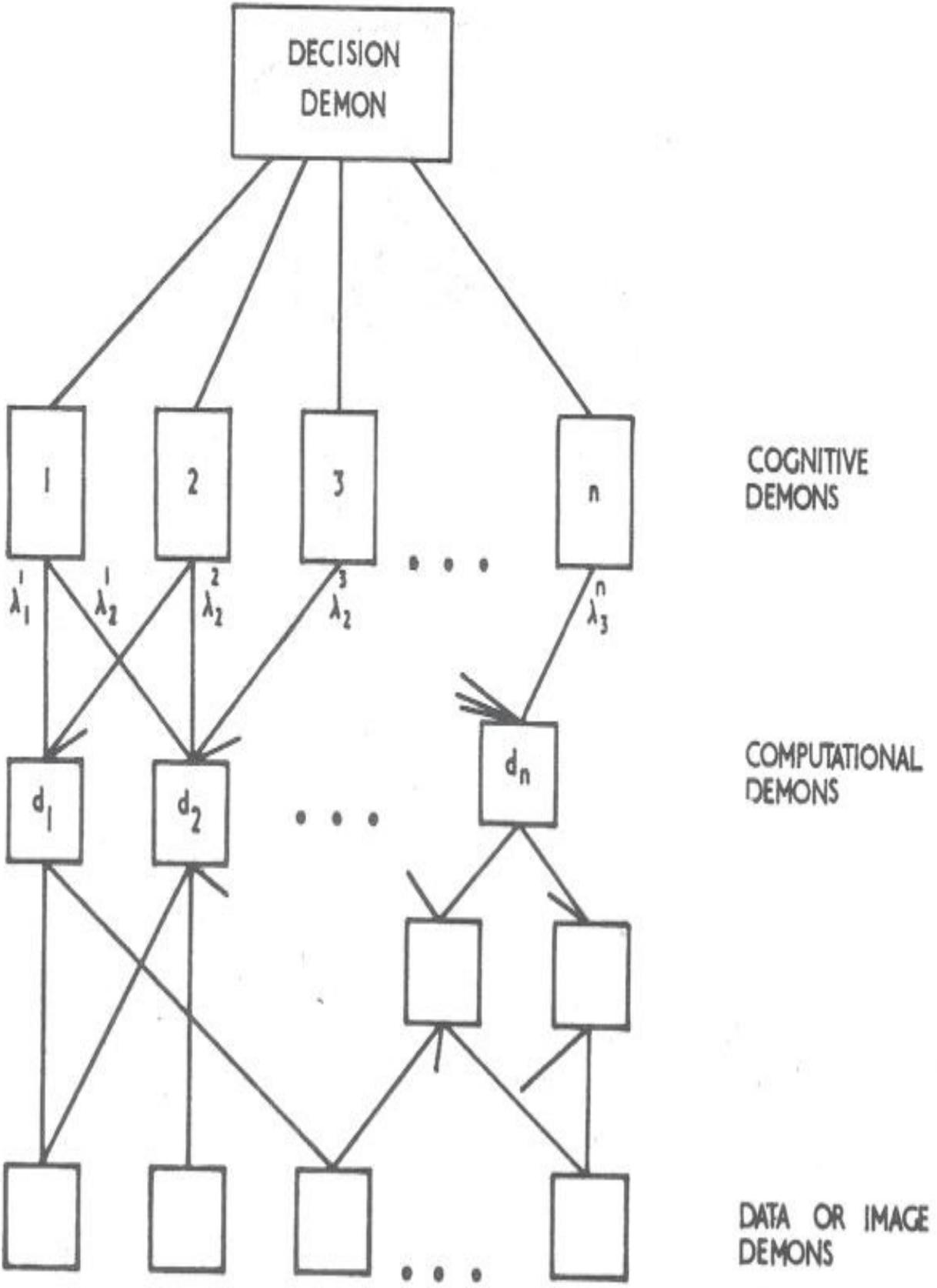


FIGURA 5. Pandemónium modificado.

Selfridge trabajó con una IBM 704 programable con válvulas de vacío, una de las primeras computadoras fabricadas en serie que salieron al mercado. Y, como director del grupo 34 del Laboratorio Lincoln del MIT, se dedicó a una tarea práctica: enseñar a las computadoras a leer el código Morse transmitido por un mecanógrafo humano y traducirlo automáticamente a mensajes mecanografiados. De conseguirlo, esas computadoras podrían sustituir a miles de telegrafistas y mecanógrafos, agilizando las comunicaciones en todo el mundo. Selfridge soñaba con sustituir muchos otros trabajos de secretaría, por ejemplo, fabricando una máquina de voz a texto y mejorando en términos generales el reconocimiento de patrones, caracteres y letras de imprenta. De ese modo, las máquinas podrían recibir mensajes automáticamente sin necesidad de que nadie los introdujera a mano.

Los demonios del programa Pandemónium de Selfridge tendían que adaptarse y evolucionar para sobrevivir. La esperanza del científico era que esos cambios adaptativos promovieran «una especie de evolución» en su sistema. Se podía diseñar un proceso de «selección natural» dentro de la computadora para que fuera despiadada: «Si cumplen una función útil, sobreviven, y quizás incluso sean la fuente de otros subdemonios que también sean juzgados por sus méritos». No se perdonaría a ningún demonio mediocre, ni se le permitiría reproducirse: «Eliminar a los relativamente pobres y animar al resto a generar nuevas máquinas a su imagen y semejanza».

El físico y neurocientífico Donald MacKay elogió la presentación de Selfridge y admitió que le hizo replantearse su propio trabajo: «¡Nunca había sospechado sus implicaciones demoníacas!». Empezó a ver demonios en otras situaciones muy diferentes de las tratadas en la ponencia: «El “pandemónium” del doctor Selfridge guarda cierto parecido familiar con una clase de mecanismo considerado en algunos trabajos anteriores».

John McCarthy, otro de los genios presentes aquel día, quedó maravillado. Lo que le intrigaba del nuevo enfoque no era solo su utilidad para el aprendizaje automático. El modelo de Selfridge parecía describir a la perfección el

funcionamiento del cerebro humano. McCarthy decidió «comentar brevemente algunas de las ventajas del modelo Pandemónium como modelo real de la conducta consciente». McCarthy acababa de acuñar el término «inteligencia artificial» en la Conferencia de Dartmouth de 1956, y trabajaba en dotar de sentido común a las computadoras, un paso previo para que acabaran desarrollando una inteligencia humana. Era un evangelista de la «IA fuerte», un término que usado para designar la idea de que los programas informáticos podían realmente pensar. Pronto McCarthy argumentaría que las computadoras y otros dispositivos similares no solo podían pensar, sino tener creencias propias: «Cabe decir que máquinas tan simples como los termostatos tienen creencias, y las creencias parecen ser una característica de la mayoría de las máquinas capaces de resolver problemas».

Lo que más impresionó a McCarthy de la presentación de Selfridge fue la semejanza entre el trabajo de los demonios que actuaban en segundo plano y nuestros procesos de pensamiento inconsciente: «Si concebimos el cerebro como un pandemónium —como una colección de demonios—, tal vez lo que hacen los demonios pueda considerarse la parte inconsciente del pensamiento; y lo que gritan a los cuatro vientos para ser oídos, la parte consciente del pensamiento». Los comentarios de McCarthy resultaron clarividentes.

El pandemónium de Selfridge pronto se puso en práctica. En 1960, Selfridge publicó «Reconocimiento de patrones con máquinas» en *Scientific American*, donde explicó con brío que se había probado un sistema Pandemónium que aprendía de la experiencia. Por primera vez, las computadoras de los Laboratorios Lincoln del MIT fueron capaces de reconocer letras manuscritas. Hasta entonces, las máquinas se habían mostrado muy inteligentes en algunos aspectos, pero muy tontas en otros.

Aunque algunas computadoras jugaban al ajedrez y al juego de damas muy bien, y a veces mejor que sus programadores, Selfridge lamentaba que no estaban «bien equipadas para seleccionar de su entorno las cosas o las relaciones sobre las que debían pensar». Ni siquiera identificaban los números que «un niño reconoce antes de aprender a sumarlos». Y, lo que era peor, no entendían «las instrucciones orales más sencillas». Para que las máquinas pudieran pensar, había que corregir esas deficiencias: «Comprender el habla y leer textos impresos son ejemplos de una habilidad intelectual básica que puede recibir nombres diversos: cognición, abstracción o percepción. Pero quizás el mejor término general para designarla sea reconocimiento de patrones».

La clave para lograr programarlas a reconocer patrones residía en diseñar muchos demonios que examinaran la misma información a la vez: «En cierto modo, unos demonios pequeños inspeccionan las distintas características y, luego, todos gritan la respuesta al mismo tiempo a un demonio decisorio». Estos demonios estaban organizados para evitar conflictos internos: «Un programa Pandemónium controla la situación empleando demonios que gritan más o menos fuerte». Con eso permitían realizar tareas repetitivas en paralelo y maximizar la eficiencia: «De esa idea nace el nombre de “pandemónium” para referirse al procesamiento en paralelo».

El pionero de la inteligencia artificial Marvin Minsky también dio una ponencia en el simposio, titulada «Mecanización de los procesos de pensamiento», y quedó encantado con el nuevo enfoque. Selfridge contrató a Minsky para trabajar en los Laboratorios Lincoln y ambos se convirtieron en grandes aportadores del campo de la IA. El revolucionario artículo de Minsky «Pasos hacia la inteligencia artificial», publicado en Proceedings of the Institute of Radio Engineers en 1961, describía en detalle las ventajas del modelo de programación informática Pandemónium: «El modelo propone que algunos procesos intelectuales corran a cargo de una jerarquía de submáquinas que operen simultáneamente, llamadas “demonios”».

Los demonios de la IA siguieron mejorando. El doctor en matemáticas Allan Newell fue uno de los muchos científicos que se dieron cuenta de lo prometedor que era el modelo de Selfridge. En los años siguientes, se convertiría en una de las voces más influyentes en el campo de la IA y la psicología cognitiva, fusionando prácticamente ambas disciplinas en una sola. Tras ser reclutado por la Marina a los diecinueve años, Newell había visto cómo la bomba atómica casi destruía el atolón Bikini, en el Pacífico Sur y elaboró mapas de la radiación generada alrededor de la isla. Tras dejar el ejército, Newell decidió estudiar física en Stanford y matemáticas en Princeton, pero abandonó los estudios de posgrado para trabajar para RAND en Santa Mónica.

Un día Newell tuvo «un episodio de conversión durante una charla de Oliver Selfridge». Se convenció de que programar demonios era el mejor camino para lograr la inteligencia artificial. Pocos meses después de presenciar la charla, Newell publicó su revolucionario artículo «La máquina de ajedrez», en el que esbozó una nueva forma de enseñar a los ordenadores a jugar al juego. Años más tarde, consiguió programar un ordenador que encontró pruebas para muchos de los teoremas lógicos de los Principia Mathematica de Alfred North Whitehead y

Bertrand Russell.

Igual que dos cerebros pueden más que uno, dos demonios podían ser más listos que uno. Sus aptitudes parecían casi infinitas, pero solo si se les educaba como era debido. El problema del exceso de chefs en una cocina también se aplicaba a los demonios. En «Problemas de organización básica en programas de resolución de problemas», dentro del libro *Self-Organizing Systems* [Sistemas de autoorganización], Newell señalaba que la eficacia de los demonios informáticos dependía de su buena organización: «Metafóricamente, podemos pensar en un conjunto de trabajadores que miran a la misma pizarra: cada uno es capaz de leer todo lo que hay en ella y de saber si tiene algo que valga la pena añadir».

Este entorno común de aula y oficina se modeló en forma de código para beneficiar a los demonios informáticos. La forma en que se disponían los demonios reflejaba la organización jerárquica de los despiadados e incluso infernales empleos modernos, diseñados para optimizar la eficiencia empresarial y maximizar ganancias. Solo los más fuertes podían sobrevivir en la jungla empresarial. Los demonios más fuertes se servían de los más débiles y los más débiles se servían de los aún más débiles hasta que los últimos de la fila eran sacrificados y escupidos fuera del sistema. Los que estaban en la cima gritaban con éxito a costa de los demás. Se creía que los demonios de la parte inferior de la escala actuaban como nuestra «memoria de trabajo» inconsciente; eran obreros rudimentarios tan absortos en tareas simples y repetitivas que ni siquiera sabían lo que hacían. El mundo interior del universo de demonios informáticos diseñados para competir entre sí imitaba el mundo exterior, donde la explotación era la norma y no la excepción, y donde los ingenieros buscaban con afán sistemas cada vez mejores para sustituir a los empleados por máquinas.

LOS DEMONIOS DE LOS LIBROS DE TEXTO

A principios de la década de 1960, los demonios de la ciencia y sus exorcismos ya eran habituales en los libros de texto sobre física. *Symbols, Signals, and Noise* [Símbolos, señales y ruido] (1961), del ingeniero de comunicaciones John Pierce, incluía un dibujo y una descripción detallada de la «hipotética e imposible criatura» conocida como demonio de Maxwell. Ese mismo año

apareció una nueva edición de Cibernética de Norbert Wiener y en 1962 salió una segunda edición de Science and Information Theory de León Brillouin. En su nuevo prefacio, Wiener declaraba: «Los autómatas, que la primera edición de este libro apenas pronosticaba, han alcanzado su plenitud», y «los peligros sociales relacionados» —sobre los que había advertido también— se habían «alzado descaradamente por el horizonte». En la nueva edición, Brillouin añadía un nuevo apartado de acertado título: «Un ejemplo simple para debatir: el demonio de Laplace exorcizado». Su objetivo era seguir demostrando que los avances recientes en electrónica e informática podían servir para taponar momentáneamente las goteras de nuestro universo entrópico.

Entre estos libros, el que causó más sensación fue Lecciones de física de Feynman, publicado con gran éxito entre 1963 y 1965. Richard Feynman era un físico tan poco ortodoxo que un compañero lo describió como «mitad genio y mitad bufón», un epíteto que también podría encajar con el demonio que acabaría llevando su nombre. Si había alguien capaz de desarrollar un exorcismo definitivo, probablemente fuera Feynman, reconocido por todos como uno de los físicos más brillantes del siglo.

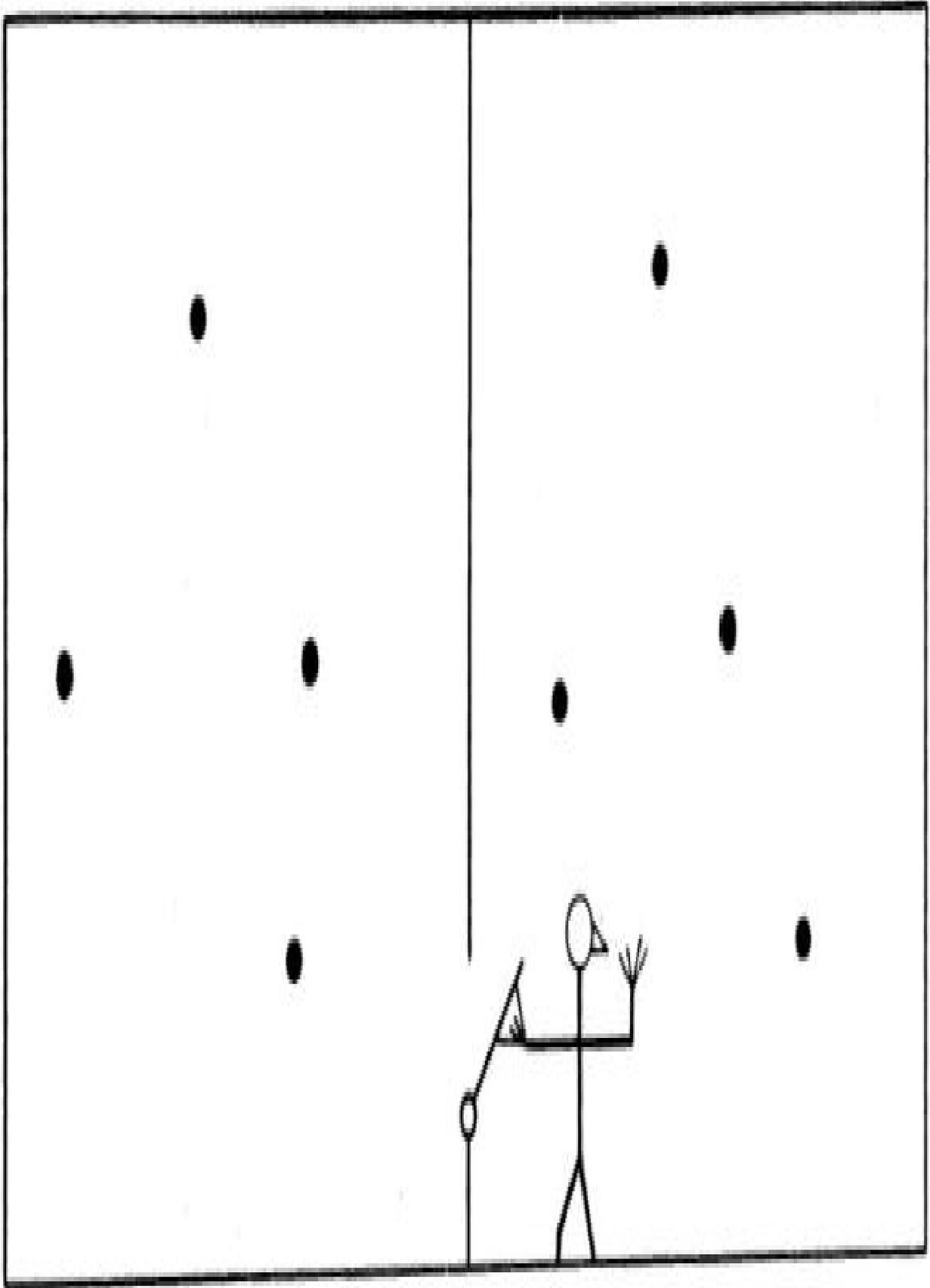


FIGURA 6. John R. Pierce, Symbols, Signals, and Noise: The Nature and Process of Communication (Nueva York: Harper & Row, 1961), p. 199.

Lo intentó en dos ocasiones: primero, mientras enseñaba a impresionables estudiantes universitarios sobre la imposibilidad de producir trabajo a partir de la nada; y, más tarde, cuando se dedicó a comprender la física informática. Feynman, brillante y poco convencional, tenía opiniones aún más brillantes y poco convencionales sobre el demonio de Maxwell. Su «pequeño demonio» tenía ojos en la nuca que lo convertían en un «demonio extraespecial».

Una de las conferencias más célebres de Feynman comenzaba describiendo un ser más diminuto de lo que se había imaginado jamás en términos realistas. Usándolo como ejemplo explicó a los ansiosos estudiantes universitarios por qué nadie, por muy inteligente que fuera, lograría construir jamás un demonio de Maxwell perfecto capaz de infringir la segunda ley: «Imaginemos dos recipientes de gas a la misma temperatura con un pequeño agujero entre ellos. En el agujero hay un pequeño demonio (¡que puede ser una máquina, por supuesto!) y una puerta que el demonio puede abrir o cerrar».

El modelo de Feynman para una máquina accionada por un demonio era similar a los modelos de molinos de agua o de viento tradicionales contruidos con ruedas dentadas, trinquetes y gatillos donde estos dirigen el movimiento en una sola dirección. Si las corrientes cambian e impulsan las aspas en la dirección opuesta a la deseada, el gatillo las detiene. Este modelo se usa en todo tipo de instrumentos, juguetes y relojes mecánicos. Empleamos artilugios similares para subir persianas, tensar correas y cuerdas, e incluso para atrapar el aire en las bombas neumáticas que pueden levantar grandes pesos. Funcionan de maravilla, pero con el uso acaban rompiéndose debido a la tensión y la fricción. Los tornillos se levantan, las aspas se desajustan, las cuerdas y cordones se rompen, y las bisagras se sueltan. Hay que reapretar, reajustar y sustituir las piezas.

Feynman utilizó estos ejemplos para plantear una cuestión teórica más general: ¿cuándo y cómo puede utilizarse el movimiento de partículas que se desplazan de forma relativamente aleatoria a fin de aprovechar la energía y producir trabajo útil? La mecánica cuántica abría nuevas puertas a la especulación. ¿Se podría

construir un minimolino impulsado por el viento molecular? ¿También acabaría por romperse? ¿Se podría así, con un diminuto trinquete y un gatillo, aprovechar el movimiento molecular browniano y levantar una pulga? El físico describió el hipotético artilugio impulsado por moléculas de átomos:

Supongamos que tenemos un recipiente de gas a cierta temperatura y que en su interior hay un eje con aspas. Las moléculas de gas que bombardean las aspas las hacen oscilar. Lo único que tenemos que hacer es enganchar en el otro extremo del eje una rueda que solo pueda girar en un sentido: el trinquete y el gatillo. De esa forma, cuando el eje intente oscilar en un sentido, no girará, pero cuando lo intente hacia el otro lado, sí girará. La rueda se moverá lentamente. Tal vez incluso podamos atar una pulga a una cuerda atada a un tambor del eje y, así, ¡levantar el insecto!

Feynman demostró con solvencia que esa máquina también acabaría por dejar de funcionar, y que se estropearía por la presión desigual de las moléculas. El físico explicó que la raíz del problema estaba en el «pequeño demonio», que empezaría a cansarse y a temblar hasta que ya no sabría lo que estaba haciendo. «Resulta que, si construimos un demonio de tamaño finito, el propio demonio se calienta tanto que deja de ver bien al cabo de un tiempo». Después de funcionar durante un rato, «el demonio [...] debe calentarse. Al poco tiempo, no sabe si va o si viene, y mucho menos si las moléculas van o vienen. Así que no funciona». Los circuitos eléctricos no eran tan diferentes de los filtros, los trinquetes y los gatillos mecánicos, solo que operaban dirigiendo electrones en vez de material sólido. «Encontramos lo mismo en un rectificador eléctrico».

A finales de los sesenta, la explicación de Feynman se daba por buena. Salvo excepciones momentáneas, el universo fluía y evolucionaba en una dirección determinada debido a las debilidades congénitas del diminuto demonio. La flecha del tiempo y el sentido unidireccional de su flujo estaban conectados a sus limitaciones. Como decía Feynman: «Su comportamiento unidireccional está ligado al comportamiento unidireccional de todo el universo». Esa unidireccionalidad era una característica innegable del universo: «¿Todas las leyes de la física son reversibles? ¡Evidentemente que no! No hay más que intentar recomponer un huevo roto. Si reproduces una película al revés, en unos

minutos todo el mundo se echará a reír». ¿Podríamos luchar contra esa direccionalidad? Lo hacemos todo el rato: «Subimos las persianas y dejamos que salga la luz». Con esfuerzo e ingenio, podemos hacer que nuestro universo parezca distinto del real, pero solo durante un lapso de tiempo limitado.

El demonio de Feynman planteaba más preguntas de las que respondía. El físico admitió que no podía responder por completo a todas las preguntas relativas a esos demonios y al universo en el que operaban. ¿Por qué las leyes del universo se suspendían en instancias y espacios delimitados? ¿Por qué el universo permitía la existencia de bolsas de excepcionalidad momentánea? ¿Cuántas excepciones podía haber? Para responder a esas preguntas, había que saber más sobre el universo y sobre las circunstancias que rodearon su nacimiento. La conclusión del físico era que «el comportamiento unidireccional no podrá entenderse del todo hasta que el misterio del inicio del universo se libere aún más de la especulación para acercarse a la comprensión científica».

EL MICROCHIP

El año 1967 fue bueno para los demonios de la ciencia. La criatura de Maxwell fue objeto de un largo artículo en *Scientific American*. El texto empezaba con un intrigante subtítulo: «Este ser hipotético fue invocado por James Clerk Maxwell hace casi un siglo por infringir la segunda ley de la termodinámica y ha traído de cabeza a muchos físicos destacados desde entonces». Su autor, Werner Ehrenberg, era jefe del Departamento de Física Experimental del Birkbeck College. Su interés por esas cuestiones se remontaba a la década de los cuarenta, cuando mostró una nueva forma de deducir la segunda ley en «una nota sobre la entropía y los procesos irreversibles», publicado en la *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. En el Birkbeck College, Ehrenberg trabajaba con David Bohm, a quien habían contratado en Brasil como catedrático de Física Teórica. Décadas antes, Ehrenberg había hecho importantes aportaciones a la mecánica cuántica con su colega Reymond Siday. Ambos fueron de los primeros en descubrir que los potenciales electromagnéticos podían afectar a partículas de carga eléctrica incluso cuando su campo eléctrico y magnético eran nulos (lo que ahora se conoce como el efecto Aharonov-Bohm, o Ehrenberg-Siday-Aharonov-Bohm). Años antes, en su intento por profundizar

en la estructura del átomo, Ehrenberg había desarrollado el tubo de rayos X de foco fino, que acabó siendo fundamental para descubrir el ADN. Rosalind Franklin y Maurice Wilkins utilizaron un instrumento basado en el diseño de Ehrenberg para obtener y recopilar los datos esenciales para que James Watson y Francis Crick descubrieran la estructura helicoidal del ADN.

«Durante casi un siglo, el “demonio” invocado por Maxwell [...] ha perseguido al mundo de la física», escribió Ehrenberg. El interés por los demonios incrementó con el uso y el desarrollo de la electrónica de microchips. Para entender cómo funcionaban los dispositivos electrónicos de estado sólido — como los diodos, los semiconductores y los transistores— y cómo podían mejorarse, era necesario entender al demonio de Maxwell, Szilárd y Gabor. Ehrenberg aducía: «Esos dispositivos son como los hipotéticos artilugios que traducen el movimiento descendiente de una partícula browniana a un movimiento puramente ascendente, o que realizan el viejo truco demoníaco de permitir que solo las moléculas rápidas vayan de izquierda a derecha».

Cada vez más microchips se programaban para dirigir una corriente de electrones en un sentido u otro, abriendo o cerrando compuertas semiconductoras. De hecho, operaban como incansables demonios de Maxwell. Lo que más entusiasmaba a los investigadores de esos componentes microelectrónicos era la posibilidad de acoplarlos a sistemas de ingeniería más grandes y antiguos, como coches y aviones, con tal de reducir la ratio entre la energía obtenida y la consumida: «Un demonio, u otro ser inteligente, podía meditar primero sobre la forma de mejorar la relación entre la entropía perdida y la ganada utilizando grandes fluctuaciones».

Ehrenberg pedía a los lectores que pensaran en una simple red de pesca. ¿En qué se parecía o en qué se diferenciaba de los rectificadores, filtros, diodos y semiconductores?: «Hay dispositivos similares a escala macroscópica que son bien conocidos y que pueden servir, por ejemplo, para pescar». Como cualquier red, válvula, membrana o filtro, acababan doblándose o rompiéndose bajo tensión. Por esa razón, los científicos habían «informado al pequeño demonio de Maxwell de que, en realidad, él y su pared no son más que membrana semipermeable de una especie que no existe», salvo en términos utópicos. Pero poco importaba que el demonio de tamaño finito tendiera a calentarse si su vida podía prolongarse manteniéndolo a una temperatura fresca, o si podía sustituirse fácilmente y a bajo coste por otro que fuera joven y fresco.

Si se podían superar los límites, se superaban. Ehrenberg concluía su artículo en *Scientific American* sugiriendo que los poderes creativos de la mente humana podían vencer estos desafíos prácticos: «Así que el demonio se ha convertido en *Homo sapiens* y la pelota está en el tejado de las ciencias biológicas, en particular, del estudio del hombre». La literatura científica sobre los demonios llevó a algunos expertos como Ehrenberg a advertir contra las expectativas excesivamente optimistas de las sociedades y culturas de alta tecnología. No todo el mundo sacaba el mismo provecho de sus avances. La pobreza extrema crecía a la sombra de la desmesurada riqueza. Accidentes, tragedias y ganancias inesperadas se extendían por todo el planeta a pesar de deberse a sucesos muy improbables. El físico habló de una avalancha mortal cuando una montaña de residuos de carbón se desplomó arrasando el pueblo galés de Aberfan en 1966. Habían muerto ciento dieciséis niños y veintiocho adultos. Un simple grano de arena se desprendió del resto y provocó el deslizamiento repentino de toneladas de escombrera de la mina de carbón que sepultaron una escuela y, luego, el pueblo entero. ¿Los científicos serían capaces de domar a los demonios informáticos para comprender y, tal vez, prevenir tragedias como aquella?

Los componentes electrónicos que imitaban las capacidades del demonio de Maxwell cada vez se usaban más y amenazaban con extremar la proporción entre los efectos de baja y alta probabilidad en la naturaleza. Con esos demonios, tenía sentido apostar por las excepciones a la segunda ley. El demonio en recinto «debe esperar gastar más fotones de los que vale el premio gordo. Pero ¿y si se arma de valor, confía en su suerte y gana a la primera? Al fin y al cabo, hay gente a quien le toca la lotería».

Para Ehrenberg, los golpes de suerte y los desastres eran ejemplos que hacían notar la mano del demonio de Maxwell. «Pensemos en el rayo globular o en catástrofes como la de Aberfan, en la que un montón de escombros se movieron de repente y engulleron muchas casas». Pero los beneficios también eran manifiestos: «Aunque no ayude a suministrar energía a un submarino», las pequeñas acciones de ese demonio podrían sumar bastante: «Detengámonos aquí y démosle las gracias al buen viejo demonio maxwelliano».

Ehrenberg creía que los científicos podrían encontrar otro demonio con poderes mejorados. Tras hablar de los debates en curso sobre las variables ocultas en mecánica cuántica, Ehrenberg preguntaba: «Así entonces, ¿encontraremos un demonio nuevo, mejor y más pequeño, que interfiera con las variables ocultas?». Ehrenberg murió menos de una década después de escribir su artículo sobre el

demonio de Maxwell, pero dejó escrito el borrador de un libro sobre causalidad, necesidad y azar. La obra póstuma introducía una criatura llamada «demonio de Born» para hablar de las paradojas de la mecánica cuántica.

La criatura de Born tenía la capacidad y velocidad suficientes para perseguir con insistencia partículas subatómicas. Gracias a su velocidad y capacidad, podía conectar valores estadísticos con resultados determinables. Era una criatura capaz de ver el determinismo oculto tras el aparente indeterminismo de la mecánica cuántica. Su doble visión permitía desarrollar una «interpretación de conjunto» de los efectos cuánticos que conciliara las explicaciones dinámicas y probabilísticas a nivel de los cuantos. Como explicó Ehrenberg: «El demonio de Born se enfrenta entonces al conjunto. No se enfrenta primero a un mar inmaculado e inexplorado y, después, a uno en el que se acaba de encontrar la isla». La tarea de perseguir electrones en sus órbitas alrededor de los núcleos era muy difícil, porque «un electrón, tomado como partícula real, giraría alrededor del núcleo unas 10¹⁶ veces por segundo». En esas circunstancias, «hasta un demonio podía darse por vencido». Eso sí, si se encontrara tal criatura, se podría reconciliar la mecánica cuántica con la «creencia de que la probabilidad se propaga en el espacio (multidimensional) y en el tiempo según leyes deterministas en forma de ecuaciones diferenciales». Eso explicaría misterios como el libre albedrío, porque aunque «en el restaurante de la vida tenemos un menú limitado, nuestra elección deliberada es puramente aleatoria para el cocinero». Cuando Ehrenberg escribió esas líneas, creía que la probabilidad de que existiera dicho demonio era remota. Ningún experimento se había acercado siquiera a revelarlo. «En suma, cabe concluir que la física no es demonología».

EL MIT Y EL PROYECTO MAC

Mientras los físicos estaban cada vez más divididos en torno a algunas de las dudas fundamentales de su campo, los informáticos seguían construyendo demonios. Las protestas universitarias de 1968 mantuvieron a algunos estudiantes radicales fuera de las aulas. Pero otros se sumieron más que nunca en sus estudios, hasta vivir prácticamente pegados a sus laboratorios y a los monitores de sus computadoras. Una nueva generación de científicos e ingenieros se dejó seducir por el sueño utópico de que las nuevas alianzas entre

computadoras y humanos y los flujos libres de información crearían un mundo mejor y más pacífico.

En el MIT, el ambicioso Proyecto MAC (acrónimo en inglés de «hombres y computadoras») estaba en pleno apogeo. Su meta era «materializar una alianza entre hombres y máquinas» y crear las tecnologías adecuadas para que ambos colaboraran «de forma directa y eficaz». Su progreso fue trepidante y atrajo a algunos de los investigadores con más talento de la época. El informe de progreso del Proyecto MAC para 1968-1969 definía el proceso «demonio» como «un proceso del sistema (no del usuario) de ejecución automática». Fernando Corbató, que lideró el proyecto, acabó revelando que los desarrolladores se habían inspirado en el demonio de Maxwell. Desde entonces, el término se utiliza para designar un programa que se ejecuta en silencio, en segundo plano, y que está listo para responder a las peticiones de otros demonios.

Los demonios del Proyecto MAC fueron esenciales para las nuevas «redes informáticas», que en ese momento eran «un campo nuevo de gran potencial». Según el informe del Proyecto MAC, durante el año se habían desarrollado varios demonios y estaban casi listos para salir al mercado. Con ellos, los investigadores podrían desarrollar los «sistemas informáticos multiacceso de propósito general», que se erigieron en el modelo para ARPANET y, luego, para internet. El informe de 1969 afirmaba: «Estamos deseando participar en la red experimental ARPA, que enlazará ordenadores multiacceso de varias universidades». Abhay Bhushan, un alumno de la India que estaba en EE. UU. cursando un máster en ingeniería eléctrica, fue el elegido del equipo para desarrollar más demonios, puesto que ya había «publicado dos artículos sobre el nuevo campo y está pensando en investigar sobre el tema para su tesis».

Unos años después de que el Proyecto MAC del MIT anunciara que su infraestructura de comunicaciones informáticas se basaría en demonios para ejecutar procesos en segundo plano, Bhushan lanzó uno de los primeros sistemas de intercambio de archivos informáticos: el protocolo de transferencia de archivos (FTP). Ese protocolo permitía a los usuarios intercambiar archivos mediante demonios (o FTPd, abreviatura de «demonio FTP») sin tener que «iniciar sesión explícitamente en un sistema remoto, o incluso sin saber “usar” el sistema remoto». Para recibir un archivo, el usuario del ordenador ya no tenía que seguir una serie de instrucciones en tiempo real. El FTPd lo hacía automáticamente con la ayuda de «procesos “demonio” que “escuchan” sockets acordados y siguen el protocolo de conexión inicial casi igual que lo hace un

logger». Bhushan señaló que esos procesos alimentaban un «protocolo a nivel de usuario» que permitía a los usuarios y a los programas que los utilizaban «usar indirectamente los ordenadores centrales remotos». Los demonios podían ejecutar «un proceso intermedio que hace que la mayoría de las diferencias en comandos y convenciones sean invisibles». Eran tan útiles que, con ellos, los científicos lograron conectar por primera vez dos ordenadores del MIT (el GE645/Multics con el PDP-10/DM/CG-ITS), y esperaban unir pronto esos dos ordenadores con el PDP-10 de Harvard.

PROGRAMACIÓN DE DEMONIOS

A medida que los informáticos creaban demonios para facilitar la conexión entre computadoras y entre computadoras y humanos, inventaban otros demonios para aumentar su inteligencia. Las computadoras realizaban cálculos a la velocidad de la luz, pero programarlas para que «entendieran cosas» era mucho más difícil.

Los estudiantes del Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT recibieron el cometido de intentarlo. Eugene Charniak, que estudió con Minsky, Seymour Papert y Terry Winograd, se dedicó a desarrollar demonios que enseñaban a las computadoras a comprender historias sencillas. Al cabo de poco, «demonios de Charniak» era un término que usaban los profesionales para designar a los demonios informáticos de esa clase.

El Departamento de Defensa de EE. UU. financió el proyecto con afán. Charniak inició su brillante andadura en los campos de inteligencia artificial, aprendizaje profundo y redes neuronales priorizando la enseñanza a las computadoras para que «entendieran» los libros infantiles. Su tesis doctoral de agosto de 1972 presentada al Departamento de Ingeniería Eléctrica del MIT llevaba el ambicioso título «Hacia un modelo de comprensión de cuentos infantiles». El autor explicaba que el uso del término «demonio» había aparecido en la literatura informática de la mano de Selfridge y Minsky. Ahora los usaba para desarrollar la «profundidad del procesamiento semántico» y modelaran «el efecto del “contexto”» en las computadoras. Su técnica era tan novedosa que era difícil de explicar, pero un concepto central caracterizaba toda su propuesta: «Para resumir esta tesis, podríamos fijarnos en algunos hilos que conectan muchos de los

capítulos. Seguramente, el hilo más persistente sea la idea del “contexto” aplicada a través de los demonios».

Al intentar programar computadoras que pudieran responder preguntas sobre cuentos sencillos, los científicos estudiaban cómo los niños iban comprendiendo y adquiriendo conocimiento en general. La investigación en IA avanzó concibiendo las computadoras como niños pequeños, simples e ignorantes; y viendo los niños cada vez más como computadoras poco inteligentes. Con el tiempo, la ciencia educativa evolucionó para considerar el aprendizaje una especie de programación de la mente humana.

Programar demonios era complicado. Como decía Charniak, para empezar «había que pulir varios problemas»: «Un demonio debería encarnar un hecho relativamente general sobre una situación independiente de las personas o los objetos concretos implicados, así que necesitamos maquinaria para vincular demonios a situaciones concretas». Los programadores no solo tenían que escribir todo lo que sabían sobre una palabra concreta, sino definir las «interacciones demonio-demonio», advirtiendo que «la interacción demonio-demonio es probablemente más compleja de lo que hemos indicado hasta ahora». También tenían que crear instrucciones para «destruir demonios»: «Si los demonios van a plasmar el contexto actual de la historia, necesitamos maquinaria para eliminarlos cuando dejen de ser necesarios». El riesgo subyacente, por supuesto, era «destruir a un demonio cuando no debíamos».

Los primeros demonios programados sirvieron para crear un programa capaz de responder a preguntas sobre *Up and Away*, un sencillo libro de lectura de primero de primaria publicado por Houghton Mifflin. La historia resultó ser un desafío mayúsculo para las máquinas neófitas. El proyecto fue viento en popa hasta que la computadora se topó con el término *piggy bank* que significa «hucha cerdito», pero literalmente «banco porcino». Esa expresión desconcertó al programa y lo sumió en un bucle estéril de análisis de las relaciones entre los bancos y los cerdos. Para evitar que eso ocurriera y enseñar a la computadora a responder a una pregunta sobre el *piggy bank*, el alumno estrella de Minsky programó un demonio apropiado (llamado DEMON PB), usando siglas, que aportara el contexto necesario. El programador empezó escribiendo todo lo que sabía sobre el tema. Para que el programa funcionara con otros cuentos, habría que esmerarse y programar todos y cada uno de los objetos que aparecieran en otros relatos. El estudiante no se rindió. Pronto, muchas personas se unieron a él para programar demonios y compartirlos como código abierto. De esa forma,

poco a poco las computadoras fueron respondiendo a cada vez más preguntas sobre más aspectos de una historia.

Otro estudiante de posgrado de Minsky que trabajaba en el Laboratorio de Inteligencia Artificial afrontaba el mismo desafío: «Crear un programa que entienda historias comprensibles para los niños». Como no sabía mucho de niños, recurrió a su mujer y a algunos pequeños para crear DEMONIOS que correspondieran a «la información contextual» de la historia. Los cuentos que eligió tenían personajes bebés, así que procedió a «escribir DEMONIOS para entenderlos». Empezó redactando una lista de todo lo que creía que podían saber los niños sobre los bebés, antes de seguir escribiendo sobre otros temas que podían aparecer en el relato. En poco más de dos páginas, dispuso casi toda la información básica que utilizarían los DEMONIOS BEBÉ del programa. Después de redactar el primero, escribió otra página con todo lo que sabía acerca de los biberones para el siguiente demonio: el DEMONIO BEBÉ BIBERÓN. A continuación, el estudiante codificó otros: el DEMONIO BEBÉ HAMBRE, el DEMONIO BEBÉ DAME DE COMER, el DEMONIO BEBÉ LLORAR, el DEMONIO BEBÉ RUIDO, y así sucesivamente. Su propósito era «facilitar la construcción de un ser que comprenda historias infantiles, lo cual no deja de ser imprescindible para entender el habla general».

TOWARD A MODEL OF CHILDREN'S STORY COMPREHENSION

by

Eugene Charniak

A.B., University of Chicago

(1967)

M.S., M.I.T.

(1968)

SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY

at the

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

August 1972

Signature of Author _____
Department of Electrical Engineering, August 25 1972

Certified by _____
Thesis Supervisor

Accepted by _____
Chairman, Departmental Committee on Graduate Students

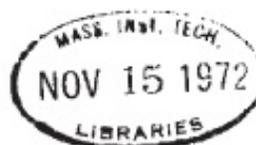


FIGURA 7. Eugene Charniak, «Toward a Model of Children's Story Comprehension» (PhD dissertation, MIT, 1972), pp. 1, 79.

Reproducido con autorización del Instituto Tecnológico de Massachusetts.

4.2 What Demons Look Like

At the very end of section 3.5 we used a simplified diagram to describe a demon which connected money coming out of a piggy bank with the person who shook the PB now having the money. In this section we give a more detailed notation.

The basic form of a demon is:

```
(DEMON <demon's name>
      <list of variables>
      <pattern the demon is looking for>
      <e1>
      <e2>
      .
      .
      .
      <en>
      )
```

Program to be run if the
proper assertion is found

So our PB-OUT-OF demons would have the outline

```
(DEMON PB-OUT-OF
      (<variables>)
      (?N OUT-OF ?M ?PB)
      .
      .
      .
      )
```

To fill in the rest of the demon we will need two primitives, GOAL and ASSERT.

The Primitive GOAL

GOAL corresponds exactly to THGOAL in Micro Planner, so those who know the language can skip this description. GOAL is primarily an information obtaining primitive. So for example:

```
(GOAL (IN JACK HOUSE))
```


MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ARTIFICIAL INTELLIGENCE LABORATORY

Artificial Intelligence
Memo #265

August 1972
Reprinted January 1974

INFANTS IN CHILDREN STORIES -
TOWARD A MODEL OF NATURAL LANGUAGE COMPREHENSION

Garry S. Meyer

ABSTRACT

How can we construct a program that will understand stories that children would understand? By understand we mean the ability to answer questions about that story. We are interested here with understanding natural language in a very broad area. In particular how does one understand stories about infants? We propose a system which answers such questions by relating the story to background real world knowledge. We make use of the general model proposed by Eugene Charniak in his Ph.D. thesis (Charniak 72). The model sets up expectations which can be used to help answer questions about the story. There is a set of routines called BASE-routines that correspond to our "real world knowledge" and routines that are "put-in" which are called DEMONS that correspond to contextual information. Context can help to assign a particular meaning to an ambiguous word, or pronoun.

Work reported herein was conducted at the Artificial Intelligence Laboratory, a Massachusetts Institute of Technology research program supported in part by the Advanced Research Projects Agency of the Department of Defense and monitored by the Office of Naval Research under Contract Number N00014-70-A-0362-0003.

Reproduction of this document, in whole or in part, is permitted for any purpose of the United States Government.

FIGURA 8. Garry S. Meyer, «Infants in Children's Stories: Toward a Model of Natural Language Comprehension» (tesis de maestría, Laboratorio de Inteligencia Artificial, MIT, agosto de 1972, memorándum 265), pp. 1, 30, 31, 32.

Un pequeño error en la interpretación de una sola palabra podía arruinar todo el programa. Al estudiante de Minsky le surgieron dudas preocupantes sobre lo que afirmaban sus profesores: en concreto, que estaban creando máquinas capaces de aprender y actuar de forma inteligente. En su tesis confesó que, con la mano en el corazón, no creía estar creando lo que decían esos profesores: «Nos obligan a hacer todo el trabajo cuando queremos aportar conocimientos al sistema». No se apreciaba el mérito de los alumnos diligentes como él, que se disfrazaba como inteligencia artificial. Sin embargo, aunque ese estudiante de posgrado llegó agotado al final del proyecto, otros siguieron con su labor.

A First Look at Infants

The initial task I attempted was to write DIALOGS for understanding infants in the context of the Charniak model. The first thing I did was to look at several stories that were either about infants or had them in them. From this experience, plus the knowledge gained by talking with three children, ages 2, 6, and 8, and with my wife's help, I produced the following summary of the knowledge that I think children have about infants:

Infants are happy to sleep most of the time, which they do either in a crib, bassinet, or any comfortable and "safe" place (mother's arms). When they are not sleeping they are either playing, eating, or relieving their bodily functions (described by children with euphemisms like: poo-poo, bunny, wee-wee, etc.). Infants usually wear diapers because they don't control their body movements very well. Dad or Mother must change the diaper after this happens. Excrement causes irritation which leads to pain and will thus cause crying. Babies also have all of the common characteristics we attribute to most humans (i.e. 2 arms, 2 legs, 2 eyes, 10 fingers, etc.), except they are proportionally smaller. Their size being bigger than a Tiny Tears doll (or any small doll for that matter) and smaller than a large stuffed animal. Infants are "new" (although not necessarily improved) so they can not do many of the things that older humans do. That is, they don't know how to walk, talk, play with most games, or dress, wash, or feed themselves. Infants cry when hungry. Crying has been shown to be inhibited both by feeding and by nonnutritive

sucking. You can reduce crying by holding a baby or by supplying a continuous auditory stimulation (singing a lullaby). Young infants are burped after feeding, this is to bring up trapped air that they may take in while feeding. To burp, hold the baby over your shoulder and pat it on the back gently. They are fed liquid food (usually milk or a formula) in a bottle or from a mother's breast. When they get a little older they move up to soft foods called "baby food." When little, they eat frequently and at regular intervals. Milk or formula must be warmed to take the chill off. When the baby starts cutting teeth, called teething, the baby gets cranky and cries easily due to its gums being tender and sore. Baby is washed by mother in a layette or small tub possibly with the help of older children or father. Infants are too little to splash and play with toys when they bathe as older children often do. Infants' skin are very tender so they are oiled and powdered. This is done after a bath and is accomplished by sprinkling a little on and rubbing it in "very" gently. They feel small and soft, and they are therefore "nice" to hold, but they wiggle a lot so you must be very careful or they may fall. Dropping a baby is considered "bad form" and can be very serious, as are other actions that cause harm. Pinching, hitting, pushing, and kicking are some of the ways in which you can hurt a baby. If you intentionally hurt a baby then that is reason for your being reprimanded. There are other ways of causing a baby to cry, like making a loud noise, taking away something it thinks it owns, or frightening the baby by holding it the wrong way. Very young infants grab onto things like your finger or eyeglasses and smile at you. They make sounds when happy, like goo-goo. They are also highly susceptible to diseases so you must stay away from them when you are sick. Babies need a lot of attention from parents, causing other older children to feel "out of it" and thus to become jealous. This jealous reaction is also caused by the fact that baby is not responsible for its actions and therefore is

not punished for the same things that an older child might be punished for. Babies don't always know what is bad for them so you must watch them. This appears to the older child to be "unfair" treatment. Another cause for hostility is the fact that people bring presents to the new baby and not to the older children. Having a baby is a "Joyous Event" and is usually celebrated. Mother has to go to the hospital to have the baby. Pregnancy precedes giving birth.

The amount of information here is considerable larger and more complex than the knowledge about objects like piggy bank or baby bottle. Much of the information is of the form of "babies can not ____". This implies that children have a good idea of what they themselves can do. Many of the stories are based on "can not do" sort of facts and many are centered around the ways in which a baby acts differently from "us" (children). We can not use the information in the form that it is above. It is not clear at all how we would use a fact like "Babies feel small and soft." I have only been able to formalize a small subset of the facts above. The task of formalizing all of it in the context of Charniak's model may in fact be very difficult. I will present what little I have done here and then move on to baby bottle.

El reto de desarrollar sistemas de IA basados en demonios informáticos se extendió del MIT a Stanford, en la Costa Oeste. Un alumno del pionero de la IA Roger Schank leyó todo lo que había que saber sobre los demonios y explicó que, «básicamente, un demonio es un proceso que puede activarse mediante determinadas combinaciones de situaciones». Estableció el plan de su proyecto:

La idea es engendrar demonios en cada fase de una historia, por decir algo. Los demonios «están al acecho» hasta que detectan que pueden ser útiles para algún hecho o situación posterior, momento en el que se activan y liberan su potencial para influir en la interpretación del patrón que los ha activado. [...] Los demonios emergen de la animación suspendida cuando se detectan patrones para cuyo tratamiento se los ha equipado.

El estudiante se lamentó de que «muchos demonios eran culpables de “no mostrar sus cartas”» y, como tantos otros durante aquella época, buscó formas de ensanchar su ámbito de aplicación.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En ese momento, las sucesivas mejoras del modelo Pandemónium de Selfridge habían demostrado el valor de los demonios de procesamiento en paralelo, que se convirtieron en la clave de los modelos cognitivos y las arquitecturas informáticas de procesamiento distribuido en paralelo (PDP).

Los demonios dispuestos en paralelo ocupaban un lugar destacado en los nuevos programas de inteligencia artificial que creaban reglas sobre la marcha y no necesitaban ser programados de antemano. Los demonios del software se diseñaron para que actuaran como un grupo de espectadores expertos: «Un demonio es una especie de rutina que espera a que ocurra algo y que comienza a ejecutarse “espontáneamente” cuando ocurre ese hecho esperado». Cualquiera

que haya observado con atención un suceso para pasar a la acción en función del resultado, desde los postores en una subasta hasta operadores bursátiles o corredores de apuestas, se sentirá identificado: «Una analogía es un anfiteatro lleno de expertos que observan el centro de la pista en busca de información útil. Cuando aparece esa información, los expertos saltan y dicen: “¡Sí, puedo hacer algo con eso!”, e inmediatamente empiezan a realizar funciones con la información». Los demonios eran activados o invocados igual que un grupo de expertos que esperan atentos para actuar en función de la información. Aunque «vigilante» podría considerarse un «nombre más apropiado y menos siniestro», el término «demonio» se consideró el más oportuno. Los ordenadores que ejecutaban los nuevos programas de IA aprendían solos, casi como niños. Según Allen Newell, a diferencia de lo que ocurre en otras arquitecturas, las instrucciones «se activan en paralelo cada vez que se cumplen sus condiciones, por lo que actúan como demonios».

Marvin Minsky era tan optimista con esos avances que empezó a imaginar cómo sería programar ordenadores para que fueran capaces de entender chistes. A las máquinas les costaba mucho diferenciar la comedia de la tragedia, y aún más identificar la ironía y el sarcasmo. Los cuentos planteaban retos formidables a los programadores que querían diseñar ordenadores capaces de responder a preguntas sencillas sobre los relatos. Minsky sabía que su alumno Charniak había propuesto utilizar demonios para ayudar a los ordenadores a entender el «contexto». La sugerencia de Charniak había sido: «Cada vez que oímos hablar de un suceso concreto, se despiertan agentes de reconocimiento específicos». Esos agentes demoníacos «proceden a vigilar y esperar otros sucesos relacionados», que a su vez activan otros demonios, y así sucesivamente. Según Minsky, «como esos agentes de reconocimiento aguardan en silencio y solo intervienen en determinadas circunstancias, a veces se les llama “demonios”». Su uso suscitó muchas preguntas: «¿Cómo de fácil sería activar a los demonios? ¿Cuánto tiempo deberían permanecer activos?». Los riesgos eran patentes: «Si se activan muy pocos demonios, tardaremos en comprender lo que ocurre. Pero si se activan demasiados, nos confundiremos por culpa de las falsas alarmas. Se podrían entender ciertas partes de una historia utilizando demonios separados y aislados, pero no hay soluciones sencillas a estos problemas. Y lo que llamamos “comprensión” es una enorme acumulación de habilidades». Si los ordenadores empezaran a ganar en «comprensión» activando demonios sucesivamente, nuestra propia comprensión también podría estar sujeta a sus caprichos. Minsky se preguntó si nosotros también podíamos comprender únicamente gracias a sus manipulaciones: «Contar o escuchar un cuento nos fascina, pero ¿cuánta de esa

fascinación proviene de las manipulaciones de las expectativas de nuestros demonios?».

«UNA SOCIEDAD DE PEQUEÑOS DEMONIOS»

En 1988, Science publicó un artículo en el que se describía el nuevo «estilo de aprendizaje» de las mejores IA. Esas máquinas empleaban «una sociedad de pequeños demonios» con excelentes «modales» para imitar la inteligencia. Estos serviciales duendes se saltaban las limitaciones de los programas informáticos con algoritmos y reglas. El crítico explicaba que no eran «un algoritmo de programación convencional, sobre todo si por “algoritmo” se entiende un procedimiento inequívoco y claramente definido que manda al ordenador lo que debe hacer en cada paso». Las nuevas IA conseguían «algo un poco más sutil». Aprendían de la experiencia.

El pensamiento sutil venía acompañado de problemas menos sutiles. Los riesgos de esas arquitecturas de IA abiertas eran evidentes. Los demonios podían luchar entre sí dentro de los programas. Pero ¿qué pasaría si las cosas no iban bien? «¿Qué pasa si ninguno de los demonios tiene nada que decir, o sea, si ninguna de las reglas se aplica a la situación planteada? O, peor aún, ¿qué ocurre si varios demonios se activan simultáneamente y empiezan a luchar por el poder?». Esa arquitectura en particular tenía claras ventajas, pero también importantes desventajas, ya que el programa compartía con los humanos la peligrosa capacidad «de extraer lecciones equivocadas de la experiencia». Como imitaban tan bien la inteligencia humana, las arquitecturas de IA abiertas también reproducían las debilidades humanas; no tenían «forma de borrar una regla incorrecta de la memoria, igual que un humano no puede olvidar su nombre solo con decidirlo». Igual que algunos tendemos a sacar conclusiones erróneas del entorno, un ordenador programado según ese modelo podría hacer lo mismo. El ordenador podría incluso caer en la locura. Según el artículo: «El potencial es catastrófico. Es muy fácil imaginar que el programa vaya acumulando errores hasta que su razonamiento se asemeje a una especie de esquizofrenia terriblemente confusa».

El primer paso de Newell y sus colaboradores para vencer estos escollos «fue

enseñar modales a los demonios. En lugar de hacer que cada uno gritara una orden cuando se cumplían sus condiciones, les hizo expresar opiniones como “el operador Q1 (toma la dama de tu oponente) es mejor que el operador Q2 (toma el peón de tu oponente)”, o “el operador Q7 (sacrifica tu alfil) es mejor”». Pero los buenos modales no bastaban. Los programadores sabían que necesitaban instalar un demonio como moderador de la mesa redonda, así que «modificaron el sistema de producción en su conjunto para que funcionara como un congreso de negocios extremadamente formal». El demonio moderador desempeñaba un papel fundamental: «En lugar de permitir que los demonios activados se pelearan por determinar quién daba las órdenes, dejaba que todos dieran su opinión. Hasta que todos no se hubieran verbalizado, el programa no decidía».

El principal beneficio de emplear a esos demonios era su actitud contemplativa y su paciencia: «Estos demonios invierten la mayor parte del tiempo a contemplar tranquilamente algo llamado “memoria de trabajo”, que es una especie de pizarra interna que registra datos sobre la situación actual». Permanecer en ese estado era una forma ideal de ejecutar órdenes condicionales y optimizar el uso de la memoria, porque «cuando uno de ellos ve algo que le gusta —es decir, cuando las condiciones en el campo “si” de la regla coinciden con la situación vigente en la memoria de trabajo— salta y grita la orden que aparece en “entonces: hacer esto”». Poco después, los demonios pueden volver a su modo centinela inactivo pero vigilante, «y todo el mundo vuelve a sentarse a esperar a que salte otro demonio».

EL SANTO PATRÓN DE LA CIBERNÉTICA

El demonio de Maxwell cobró tanta importancia en varias áreas de la física que fue coronado como santo patrón durante el congreso anual de la American Society for Cybernetics en otoño de 1972. Heinz von Foerster, cibernético y profesor de ingeniería eléctrica de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, dio la charla inaugural. Llevaba décadas estudiando el demonio de Maxwell durante su gestión del Laboratorio de Computación Biológica, donde había alcanzado una comprensión práctica, matemática y filosófica de los sistemas autoorganizados. En su opinión, las computadoras eran «isomorfos funcionales» de ese ser. Dirigiéndose a sus colegas, les pidió que reflexionaran

sobre lo que les había reunido aquella tarde. Y, lo que era más importante, ¿qué santa figura les cuidaba?

Foerster suspiraba por un supervisor benigno capaz de unir los campos dispares que componían la cibernética y ayudar a sus practicantes a desarrollarla aún más: «¿Por qué no somos como la mayoría de nuestras ciencias hermanas y no tenemos un santo patrón o una deidad que nos conceda favores mientras buscamos nuevos conocimientos, o que proteja a nuestra asociación de los males tanto externos como internos? Urania cuida de los astrónomos y físicos; Deméter, de la agricultura, y varias musas velan por las diferentes artes y ciencias. Pero ¿quién ayuda a la cibernética?». Por suerte, encontró un aliado en el demonio de Maxwell: «Nadie más que este respetable demonio podría ser nuestro mecenas, pues el demonio de Maxwell es el paradigma de la regulación».

Para Foerster, «la regulación» de cualquier sistema era una «pócima general y omnipresente». El demonio sabía cómo funcionaba mejor que nadie: «El demonio de Maxwell no solo retrasa la entropía y es un paradigma de la regulación, sino que es un isomorfo funcional de la máquina universal de Turing». Ese hábil patrón reunía los tres conceptos: «regulación, retraso de la entropía y computación, los cuales constituyen una red conceptual entrelazada que, para mí, es la esencia de la cibernética».

Foerster contó que el demonio de Maxwell se le había aparecido una noche y le había propuesto ser su aliado. El científico describió el encuentro con humor durante su discurso: «Una noche, se me apareció alguien de repente, mientras reflexionaba sobre esta cuestión cósmica». Al principio, su reacción ante el visitante no fue positiva: «Por desgracia, no era una de las encantadoras diosas que bendicen las demás artes y ciencias». Se trataba de un bromista: «Estaba claro que esa graciosa criaturita sentada en mi escritorio tenía que ser un demonio». El científico y el demonio no tardaron en entablar conversación, pero entonces la criatura desapareció: «Al cabo de un rato empezó a hablar. Estaba en lo cierto. “Soy el demonio de Maxwell”, dijo. Y luego desapareció». La idea de que la mayoría de las acciones de las computadoras eran casi idénticas a las de un demonio de Maxwell arraigó mucho. Durante el resto de su vida, Foerster consideró que «la habilidad computacional de la máquina y las dotes de ordenación del demonio eran equivalentes».

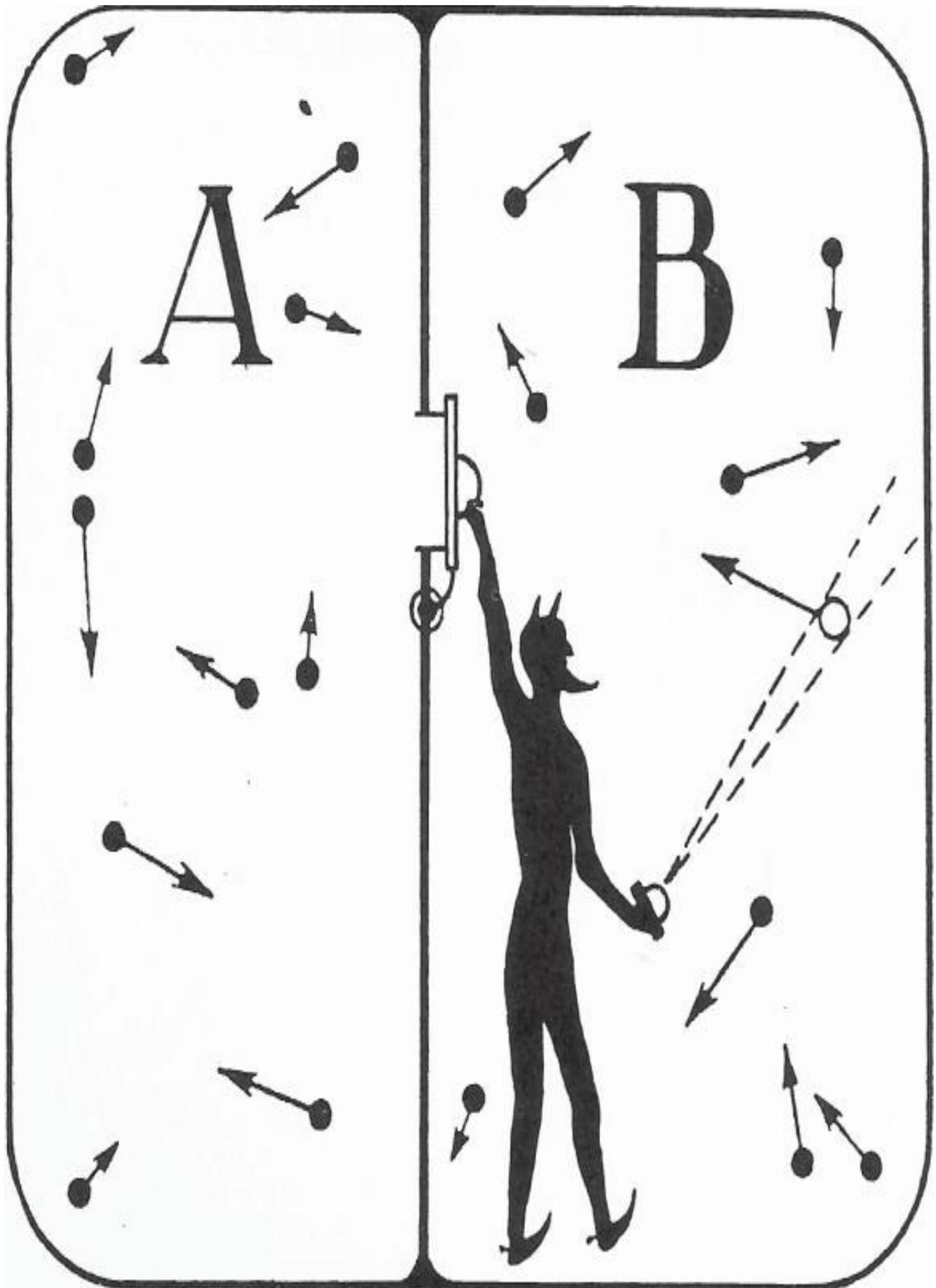


FIGURA 9. A. Y. Lerner, *Fundamentals of Cybernetics* (Nueva York: Plenum, 1975), p. 257. Impreso con el permiso de Springer Nature.

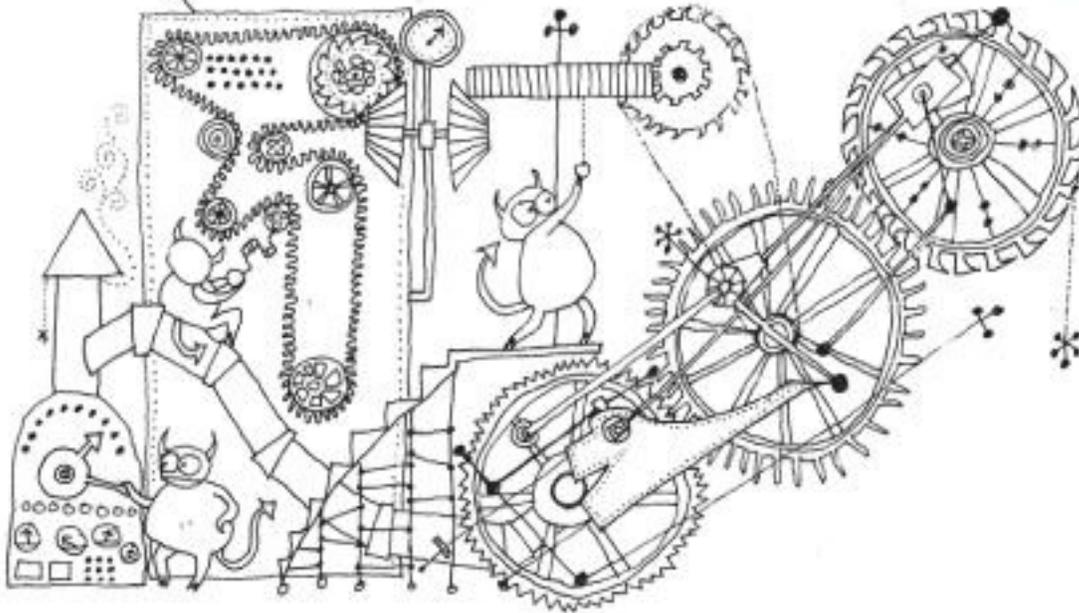
Más allá de la física, por aquel entonces los demonios ocupaban un lugar prominente en varias disciplinas que intentaban explicar los procesos generales del pensamiento. Los informáticos recibían llamadas para publicar en revistas de lingüística y psicología y eran invitados a congresos de esos campos. Un popular libro de texto de *Introducción a la Psicología* escrito por profesores de la Universidad de California en San Diego estaba ilustrado con «encantadores demonios» que mostraban los procesos mediante los cuales las computadoras y las personas reconocían la forma de las letras del alfabeto.

Academic Press

International Edition



Human Information Processing



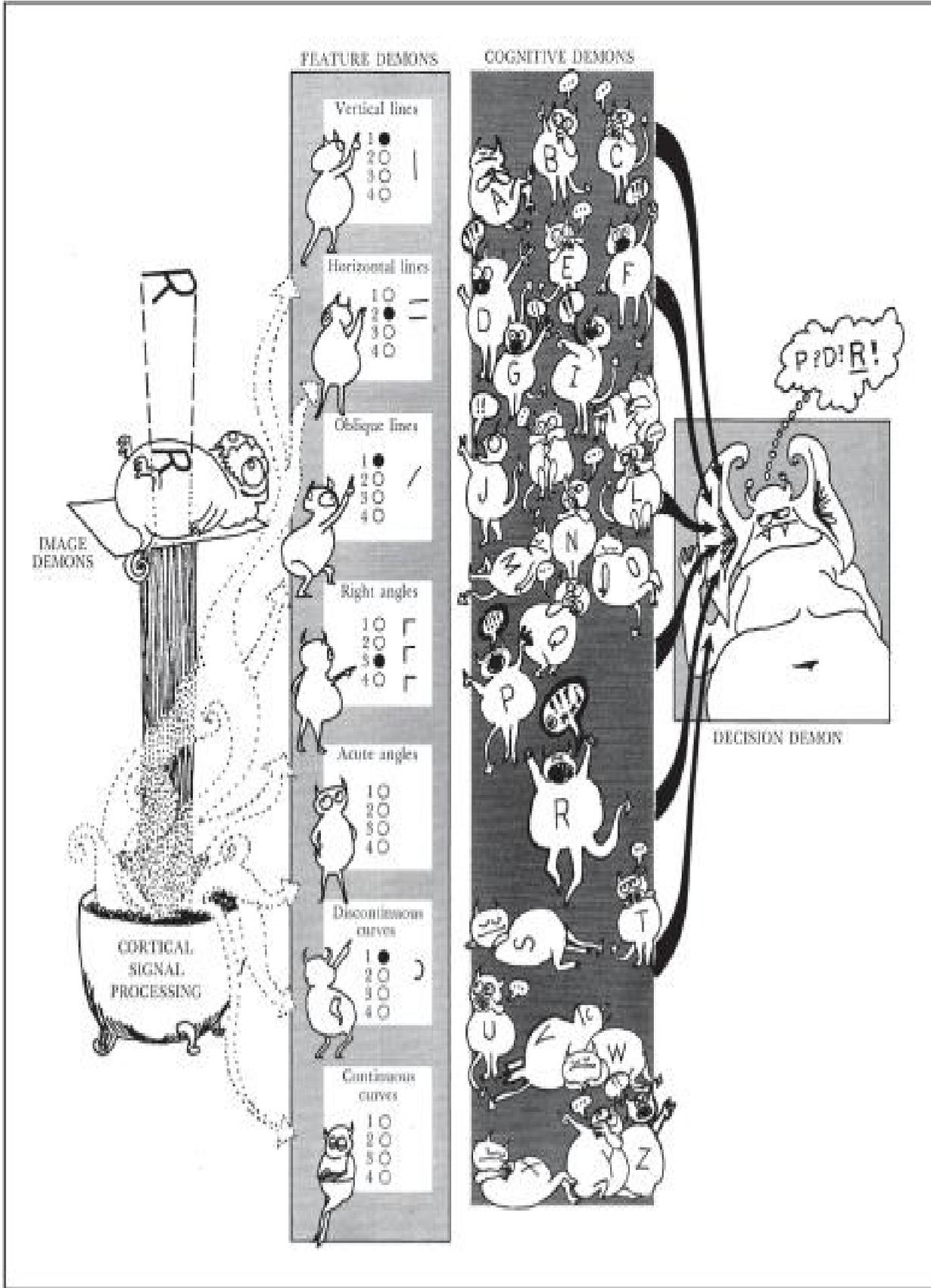
An Introduction to Psychology



LINDSAY • NORMAN

FIGURA 10. Peter H. Lindsay y Donald A. Norman, *Human Information Processing: An Introduction to Psychology* (Nueva York: Academic Press, 1972), portada y p. 121.

Reimpreso con autorización de Elsevier.



Los «mejores amigos» de los programadores consiguieron penetrar en los relatos populares de la psicología cognitiva, donde se emplearon sus características y tendencias para describir los procesos generales del pensamiento. A medida que se extendió internacionalmente el uso de demonios y daemons en la informática, esas criaturas empezaron a influir en la neurociencia, a cambiar nuestra comprensión de la evolución de la vida inteligente en la Tierra e incluso a explicar la conciencia. Destacados intelectuales llenaban auditorios, salas de conferencias y páginas enteras promoviendo sus teorías sobre la inteligencia, la evolución, la religión, la historia, la moralidad y el libre albedrío aludiendo a los demonios informáticos. Los programadores de décadas anteriores habían estudiado psicología para aprender a diseñar ordenadores con IA, pero a finales de siglo se había girado la tortilla: los psicólogos con conocimientos teóricos estudiaban cómo se programaban los ordenadores para comprender mejor la mente.

EL DEMONIO DE SEARLE

Cuando los ordenadores personales empezaron a apoderarse de los hogares estadounidenses en la década de los ochenta, nació la idea de un demonio capaz de manipular las sinapsis neuronales. El «demonio de Searle» fue una creación filosófica diseñada para rebatir las teorías científicas y filosóficas que entendían el cerebro como un programa informático. Ese hipotético demonio se situaría en el cerebro e iría interceptando y retransmitiendo las sinapsis neuronales. Por fuera, no se podría detectar ningún cambio. Nada cambiaría en el comportamiento del sujeto con su cerebro endemoniado. Una persona actuaría exactamente igual que sin él. Su conducta y sus pensamientos serían idénticos a los que tendría sin él. El demonio solo retransmitiría sinapsis neuronales que ya se hubieran lanzado. Este demonio se podría sustituir por un mecanismo intermediario entre neurona y neurona.

El experimento mental de Searle fascinó a filósofos y científicos por igual. La mera posibilidad de que un demonio fuera capaz de asumir un aspecto central de los procesos de pensamiento demostraría la opción de usar un mecanismo simple

para realizar operaciones mentales básicas. De ser así, una interpretación del experimento mantenía que los mecanismos simples dotados con IA podrían considerarse esencialmente idénticos a los organismos vivos inteligentes.

John Searle, un profesor de filosofía de Berkeley radicalmente opuesto a la idea de que los programas informáticos poseyeran inteligencia de algún tipo, publicó «Mentes, cerebros y programas» en septiembre de 1980. En ese momento no sabía que el artículo le brindaría el honor de que un demonio llevara su nombre. El artículo cosechó elogios nada más publicarse: «Seguramente esté destinado a convertirse en un clásico casi de inmediato». Pese a su estilo académico, el autor transmitía una clara sensación de exasperación en cada oración y arremetía contra colegas y científicos de renombre. No dejaba títere con cabeza. Su autor argumentaba en contra de la «IA fuerte», una etiqueta para la escuela de pensamiento que se abría camino en el mundo académico afirmando que los ordenadores podían pensar, tal vez incluso mejor que nosotros. Los ataques entre los críticos y defensores de la IA fuerte recrudecían. No había signos de tregua. Para algunos científicos y filósofos, el Gedankenexperiment de Searle demostraba que solo máquinas tan especiales como el Homo sapiens podían entender significado y significancia. Para los críticos de Searle, demostraba que las máquinas también podían hacerlo, y que incluso podían ganarnos la partida. Esos demonios exacerbaban el desacuerdo entre los críticos y los defensores de la IA, tensando aún más la delicada cuerda entre científicos y filósofos.

Searle no tenía ningún problema con la idea de que ciertas máquinas muy especiales pudieran pensar. Admitía que nuestro propio cerebro era una de esas máquinas. Su discrepancia era más sutil: «Según la IA fuerte, el ordenador no es una mera herramienta para estudiar la mente, sino que, debidamente programado, es una mente en sí. La tesis es que los ordenadores con programas adecuados comprenden y tienen otros estados cognitivos». Él se oponía a la afirmación de que los programas informáticos fueran los responsables de esos pensamientos y llegaba a una conclusión categórica: «Ningún programa por sí solo se basta para pensar».

ABACUS

THE MAGAZINE FOR THE COMPUTER PROFESSIONAL

VOL 3 NO 4 SUMMER 1986

BOSTON COLLEGE
JUL 07 1986
PROPERTY OF O'NEILL LIBRARY



PHILOSOPHY,
AI, AND THE
CHINESE ROOM

STRING-
PROCESSING
LANGUAGES

PROCSHEETS

QA
76
.A2X

SPRINGER-VERLAG NEW YORK • BERLIN • HEIDELBERG • TOKYO \$4.95

FIGURA 11. Abacus: Magazine for the Computer Professional 3 n.º 4 (verano de 1986): imagen de portada de Ed Soyka. Reimpreso con autorización de Springer; permiso transmitido a través del Copyright Clearance Center, Inc.

Pero las discrepancias sobre la IA fuerte revelaban discrepancias más profundas entre Searle y sus interlocutores. La posible atribución de intencionalidad a máquinas o programas abría un nuevo y tenebroso universo ético. En nuestro cerebro podía estar operando algo así como un demonio maligno cartesiano y ni siquiera el raciocinio podría salvarnos. ¿Se podría culpar a una IA si sus actos desembocaban en un delito o una catástrofe? ¿Qué similitudes había entre un delito de la IA y una falta de un sujeto por embriaguez, demencia, pasión o inconsciencia? En los debates sobre el demonio de Searle, surgió otro complejo dilema: ¿hasta qué punto podríamos sustituir o mejorar nuestros procesos de pensamiento y seguir siendo nosotros mismos? A medida que se construían más máquinas pensantes, los investigadores empezaron a debatir sobre lo que significaba pensar. ¿Qué tenía de artificial? ¿Quién destacaba en términos de inteligencia y cómo podríamos usar demonios para volvernos aún más listos?

DE LOS MICROCHIPS A UNIX

Unos meses antes de que cayera el Muro de Berlín en 1989, Ronald Reagan se deshizo en elogios hacia el microchip en su primer discurso tras dejar la presidencia: «El David del microchip derribará al Goliat del totalitarismo». Estos diminutos circuitos de silicio frecuentemente se comparaban a los demonios de Maxwell y se explicaban con referencias a los demonios cuánticos. Su utilidad aumentó junto con los progresos en nuevas técnicas de programación. Los demonios y subdemonios programables se codificaban regularmente en los sistemas operativos. El manual de UNIX de ese año, conocido coloquialmente como el «libro del diablo», incluía el término en su glosario, donde señalaba que la palabra no tenía connotaciones negativas: «El término inglés antiguo, daemon, significa “ser deificado”, a diferencia del término demon, que se traduce como “espíritu maligno”».

Ese mismo año, Evi Nemeth, programadora y experta en sistemas operativos, explicó el uso del vocablo en su campo. En una de las biblias de la informática, el Unix System Administration Handbook [Manual de administración de sistemas Unix] de 1989, escribió: «En realidad, daemon es una forma mucho más antigua de “demonio”; los daemons no sienten una inclinación particular hacia el bien o hacia el mal. Sirven para ayudar a definir el carácter o la personalidad de una persona». Y profundizó en el uso del término: «El “demonio personal” de los antiguos griegos era similar al concepto moderno del “ángel de la guarda”. Eudaemonia es que te ayude o te proteja un espíritu bondadoso». Nemeth concluyó: «Por regla general, los sistemas UNIX parecen estar infestados de daemons y de demonios».

Mientras los físicos seguían comprendiendo las limitaciones del demonio de Maxwell, los demonios informáticos causaron sensación. En los noventa, el diccionario inglés New Hacker's ya incluyó el término en una de sus primeras ediciones:

daemon

[del término de origen mitológico, más tarde racionalizado como el acrónimo de «Disk And Execution MONitor»]. Programa que no se invoca explícitamente, sino que permanece latente a la espera de que se cumpla alguna condición. El perpetrador de la condición no necesita saber que un daemon está al acecho, aunque a menudo el programa realizará una acción solo porque sabe que invocará implícitamente a un demonio. [...] Así, escribir un archivo en el [...] directorio del spooler invocaría al spooling daemon, que imprimiría el archivo. La ventaja es que, en este ejemplo, los programas que desean imprimir archivos no necesitan competir por el acceso ni entender ninguna idiosincrasia. [...] Simplemente introducen sus peticiones implícitas y dejan que el daemon decida. El sistema puede generar automáticamente los daemons, que pueden vivir para siempre o ser regenerados cada cierto tiempo. Daemon y demonio se utilizan a menudo indistintamente, pero parecen tener connotaciones distintas. [...] Si bien el significado y la pronunciación han cambiado, creemos que este glosario refleja el uso actual (1991).

La entrada también explicaba que «el vocablo daemon entró en la informática» de la mano de personas que trabajaban en un sistema de tiempo compartido compatible. La diferencia entre daemon y demon (en español, demonio) era pequeña, pero importante:

demonio

n. 1. [MIT] Parte de un programa que no se invoca explícitamente, sino que permanece inactivo a la espera de que se cumpla alguna condición. Véase [daemon]. La diferencia es que los demonios suelen ser procesos dentro de un programa, mientras que los daemons suelen ser programas que se ejecutan en un sistema operativo. Los demonios son especialmente comunes en los programas de IA. Por ejemplo, un programa de manipulación del conocimiento podría implementar reglas de inferencia como demonios. Cada vez que se añadiera un nuevo conocimiento, se activarían varios demonios (dependiendo del dato concreto) que crearían conocimiento adicional aplicando sus respectivas reglas de inferencia al dato original. A su vez, esos nuevos datos podrían activar más demonios a medida que las inferencias se filtraran a través de cadenas de lógica. Entretanto, el programa principal podría continuar con cualquiera que fuera su tarea principal. 2. [fuera del MIT] A menudo utilizado de forma equivalente a daemon, especialmente en el mundo UNIX, donde la ortografía y la pronunciación de daemon se consideran un tanto arcaicas.

En realidad, ¿qué son los demonios informáticos? En su libro *Bots: The Origin of New Species* [*Bots: El origen de nuevas especies*], el periodista tecnológico Andrew Leonard adujo que «aunque su manifestación física no sea más que el parpadeo de la corriente eléctrica a través de un chip informático de silicio, los bots existen en el mundo real». A finales de los noventa, los daemons no eran solo una subcategoría de muchos otros tipos de bots, sino versiones de programas de robots mecánicos que exploraban «la realidad hipervinculada del ciberespacio, cartografiando e indexando la ingente cantidad de información disponible en la World Wide Web». Sirvieron de modelo para muchos daemons posteriores. Según Leonard, «el daemon de Corbató ocupa un lugar destacado en el gran árbol de los bots. Es el ur-bot, la forma primigenia a la que todos los bots presentes y futuros deben su ascendencia». Con el auge de los ordenadores

personales programables e internet, el alcance de estos bots aumentó exponencialmente: «Hoy, los daemons son el mejor amigo de un programador, uno de los lubricantes que permiten a la maquinaria electrónica de bits y bytes moverse sin problemas». En décadas posteriores, constituirían el grueso del tráfico virtual, haciéndose pasar por usuarios humanos y superándolos en número. Incluso los usuarios habituales de correo electrónico «se encuentran constantemente con el vigilante mailer daemon, un engranaje vital de la oficina de correos electrónica que resuelve incontables problemas de envío (mensajes a direcciones inexistentes, buzones desbordados, reenvíos y redireccionamientos)».

A medida que los sistemas informáticos de UNIX conquistaban el mundo, la palabra daemon pasó a abreviarse como una simple «d» al final de otros términos técnicos. Los más populares son «inetd», «nfsd», «sshd», «named» y «lpd» (el demonio de impresión en línea). En general, actúan como deben hacerlo. «Los daemons de impresión monitorizan los servidores de archivos del ordenador para ver si hay algún archivo esperando a ser enviado a la impresora», y los «daemons temporales» ejecutan «instrucciones a horas específicas». Estos daemons tuvieron un papel clave en las tecnologías que permitieron a los usuarios comunicarse a través de ordenadores conectados a una red. Ejecutaban tareas programadas en las redes, contestaban y dirigían correos electrónicos automáticamente y ayudaban a configurar los programas. Eran invisibles (ni se los veía ni se pensaba en ellos), a menudo hacían tareas serviles en segundo plano y eran asistentes que esperaban con paciencia el momento adecuado para actuar. Para entonces, la figura del daemon ya se había asentado como la mascota de UNIX.

U N I X
PROGRAMMER'S MANUAL



Reference Guide

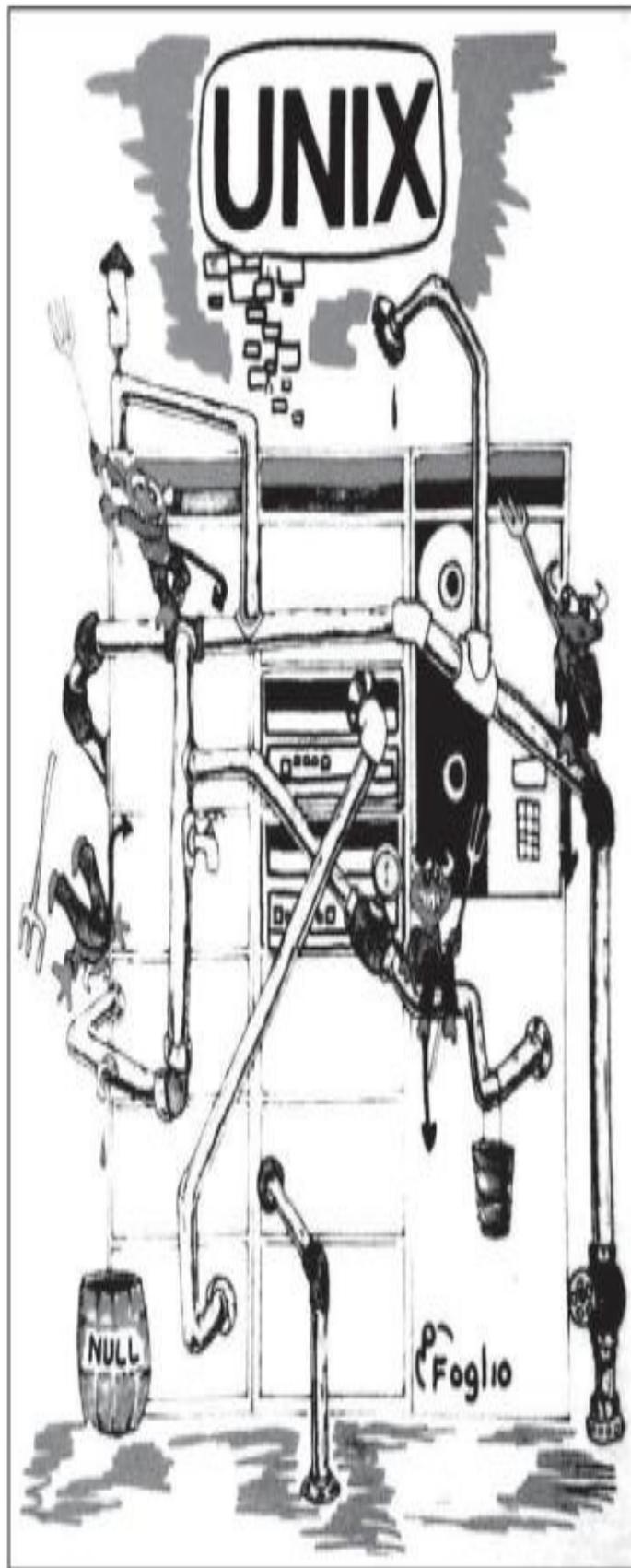


FIGURA 12. Unix System Manager's Manual (1984), imagen de portada de John Lasseter, Lucasfilm, Ltd.; camiseta UNIX diseñada por el dibujante de cómics Phil Foglio basada en una fotografía Polaroid de la computadora DEC PDP-11/40 del Chicago Circle. Reproducido con autorización de Phil Foglio.

HTTPd fue el primer protocolo de servidor web basado en daemons que permitió a los ordenadores comunicarse entre sí. Pronto salió como software libre. Años después de su primer lanzamiento, Leonard explicaba: «Un daemon HTTP (protocolo de transferencia de hipertexto) reside en un ordenador que almacena páginas de inicio de la World Wide Web y está siempre alerta para responder a las peticiones de otros ordenadores que solicitan acceso a documentos web locales». La World Wide Web y el desarrollo de internet se apoyaron en el HTTPd. Como dice un historiador de internet: «Internet está repleto de demonios de todo tipo. Su inteligencia inhumana se extendió por la infraestructura global». «Internet es una infraestructura poseída. En cada rúter, switch y hub, en casi cada rincón de internet, hay incrustado un daemon que escucha, observa y comunica». A finales de siglo, los científicos cognitivos e informáticos contaban con catálogos completos de líneas de código diseñadas para actuar como criaturillas inteligentes.

NEUROCIENCIA Y PSICOLOGÍA COGNITIVA

En su libro *Cómo funciona la mente*, el experto en psicología cognitiva Steven Pinker señaló que cada vez era más fácil comprender nuestra mente porque científicos e ingenieros tenían a su disposición «un inventario de demonios en stock que hacen cosas útiles». Gracias a ellos, había nacido «una nueva forma de entender la inteligencia humana». Los psicólogos cognitivos podían estudiar la mente como «ingenieros del software mental». Nuevas técnicas de programación de IA les ayudaban a «hacer ingeniería inversa de la psique» para entender cómo funcionaba. Ya que ahora tenían «un buen catálogo de piezas a partir del cual pedir demonios inteligentes» su tarea era mucho más fácil que antes.

Los demonios computacionales recibían muchos nombres. Según Pinker: «Las estructuras de datos se leen, interpretan, examinan, reconocen y revisan sin parar, y las subrutinas encargadas de todo ello se conocen sin ningún pudor como “agentes”, “demonios”, “supervisores”, “monitores”, “intérpretes” y “directores”». Formaban parte de «un sistema de producción con memorias» y un conjunto de «reflejos, a veces llamados demonios porque son entidades simples y autónomas que esperan de brazos cruzados para entrar en acción». En su mayor parte, buscaban información para encontrar coincidencias. Como explicaba Pinker: «Uno de los demonios está diseñado para responder a esas consultas explorando en busca de marcas idénticas en las columnas de Memoria a largo plazo y Meta». Con un «demonio que entra en acción» y «un demonio que hace la comprobación», el ordenador —o la mente como ordenador— podía responder a preguntas específicas sobre el conjunto de datos que no estaban completamente especificadas de antemano.

«Un demonio computacional» es inteligente porque se sitúa «en lo alto de la cadena de mando», de modo que «la inteligencia del sistema surge de las actividades de los demonios mecánicos no tan inteligentes que se hallan en su interior». Un demonio siempre «delega el control al agente más ruidoso, rápido o fuerte situado en un nivel inferior». Una vez que un demonio encuentra una coincidencia, se necesita otro demonio por debajo para evitar que «haga sin sentido una copia detrás de otra como el aprendiz de brujo». Para evitar la idiotez, hay que utilizar demonios cada vez más necios: «Si parece que necesitamos un demonio más inteligente, alguien tiene que encontrar el modo de construirlo a partir de otros más estúpidos». Supuestamente, la inteligencia surgía de las pequeñas acciones de cadenas de demonios estúpidos organizadas jerárquicamente siguiendo el modelo de la arquitectura informática integrada de aquella época.

Según Pinker, las teorías tradicionales de la mente tenían que basarse en el problemático concepto del «fantasma en la máquina». La frase se usaba para subrayar la paradoja de pensar en las mentes como poseedoras de facultades superiores a las que podían reducirse a la biología y la física. En principio, la obra de Pinker alejaba este fantasma. «No sería un fantasma en la máquina», porque los demonios podrían mostrar cómo el pensamiento y el ordenador surgieron de «solo otro conjunto de reglas “si-entonces”».

¿Los científicos podían utilizar demonios para combatir esos fantasmas? De fructificar, la estrategia podría emplearse para promover un plan secularista y

materialista. Pinker sostenía que, al fin y al cabo, los demonios que daban lugar a los procesos de pensamiento eran reducibles a sistemas mecánicos: «Al descifrar el software de la mente, al final es posible que solo usemos demonios tan estúpidos que podamos sustituirlos por máquinas». En un capítulo titulado «La lámpara de Aladino», Pinker señalaba: «Por último, tendrías que llamar a los cazafantasmas y sustituir a los demonios más pequeños y estúpidos por máquinas y, en el caso de las personas y los animales, por máquinas construidas a partir de neuronas: redes neuronales». Analizando «los pensamientos y el pensar» en clave de los demonios computacionales creados por ingenieros informáticos, Pinker señalaba que, en teoría, esos procesos «ya no eran enigmas espirituales, sino procesos mecánicos comprensibles». El último demonio en la jerarquía era «tan estúpido que se podría “sustituir por una máquina”». Según ese modelo, la base de la inteligencia era puramente mecánica.

XII

AGUJEROS NEGROS Y COMPUTACIÓN CUÁNTICA

En la era de la energía atómica y de las computadoras, los demonios estaban por doquier. Se volvieron necesarios para entender tanto el software como el hardware y el universo en el que estos operaban. Durante los años setenta, los estudiantes de física añadían un demonio a las ecuaciones de mecánica estadística. En su libro de texto de 1970 *Foundations of Statistical Mechanics* [Fundamentos de la mecánica estadística], el físico Oliver Penrose explicaba por qué había que incluirlo: «Si combinamos el demonio (denotado por D) con el sistema sobre el que actúa (denotado por S') en un sistema compuesto $D + S'$ » la entropía de todo el sistema aumenta.

Para llegar a esas conclusiones, Penrose empezó concibiendo el cerebro de Sherlock Holmes como un sistema termodinámico: «Un demonio de Maxwell con esa tremenda capacidad de memoria podría provocar disminuciones de entropía no superiores a $10^{10} k \ln 2^m$, que equivale aproximadamente a 10-11 de la disminución de entropía cuando 1 g de agua se enfría de 300 a 299 °K». La quimera de Penrose del demonio de Maxwell unida a la memoria de Sherlock Holmes demostró que las limitaciones de la memoria acababan afectando a la capacidad de pensamiento o de cálculo de cualquier entidad. Al introducir el símbolo de esa criatura en las ecuaciones de la termodinámica, descubrió una de las leyes más importantes sobre las limitaciones de cualquier sistema informático, incluido uno biológico: el coste de olvidar o eliminar recuerdos, era necesario y tenía un peso termodinámico. En cuanto un cerebro se llenaba de recuerdos, dejaba de funcionar. Para convencer a sus lectores, el físico se remitía a las novelas policíacas de sir Arthur Conan Doyle y una lección que aparecía en ellas: la memorización de datos inútiles era perjudicial para la solución de problemas. Como decía el célebre detective: «Considero que el cerebro de un hombre es, en un principio, como un pequeño desván vacío que hay que llenar de muebles según se desee. Es un error pensar que ese pequeño habitáculo tiene paredes elásticas capaces de estirarse hasta cualquier límite. Que no os quepa duda: llegará un punto en que, por cada ampliación de conocimientos, olvidaréis

algo que sabíais antes. Por lo tanto, es de suma importancia que los hechos inútiles no defenestren a los útiles». Para resolver problemas, crímenes y acertijos, olvidar era tan importante como recordar.

A raíz de las recientes investigaciones sobre los demonios en la teoría de la información y la informática, los cosmólogos reelaboraron sus teorías sobre el universo. Para responder a algunos de los grandes enigmas del universo concernientes a su origen y su historia, empezaron a preguntarse qué ocurriría con los demonios de Maxwell en las cercanías de un agujero negro. Con estas preguntas intentaban entender mejor el lugar de la inteligencia humana en el universo y cuáles eran las posibilidades de aprovechar su energía frente a la degeneración entrópica.

EL DEMONIO DE WHEELER

El «demonio de Wheeler» nació durante una conversación entre Jacob Bekenstein, un joven doctorando en física en la Universidad de Princeton, y su tutor, el físico John Archibald Wheeler. Wheeler era una eminencia en la disciplina. Había trabajado en el Proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial y luego había trabajado en la bomba de hidrógeno. En Princeton, se había convertido en un experto en la materia y se había interesado por los «agujeros negros», término que él mismo había acuñado. Aunque los agujeros negros y las bombas de hidrógeno parecían en apariencia ser temas muy distintos, para entenderlos se necesitaba conocer la física de las reacciones termonucleares que operaban en ambos casos.

Por remota que fuera en ese momento, la posibilidad de extraer energía de los agujeros negros fascinaba a Wheeler y a un pequeño círculo de investigadores. También les seducía la idea de que esas extrañas singularidades pudieran albergar una serie de demonios totalmente nuevos, algunos de los cuales serían capaces de engullir información y energía, disminuir la entropía a un nivel nunca visto antes y detener el tiempo.

Desde su nacimiento en México, Bekenstein escaló rápidamente por la jerarquía académica y llegó a Princeton tras haber pasado una temporada en el Instituto Politécnico de Brooklyn. Durante la trascendental conversación con su profesor,

Wheeler le dijo que las explicaciones sobre los agujeros negros permitían que «una criatura malvada, tal vez llamada “demonio de Wheeler”, cometiera el crimen perfecto contra la segunda ley de la termodinámica». La posible existencia de esa «maldad» en el universo le resultó «angustiosa» al joven estudiante, así que procedió a combatirla en su tesis. Bekenstein prometió «derrotar los ardides del demonio de Wheeler y hacer que la física de los agujeros negros» fuera coherente con la termodinámica.

La enorme presión gravitatoria de los agujeros negros lo tritura todo en su interior. ¿Acaso el hábil y delicado demonio de Maxwell podría sobrevivir en esas condiciones tan extremas? Un agujero negro era un reto incluso para el más pequeño de los seres imaginarios. El modelo estándar del mundo subatómico se quebraba en esas condiciones. ¿El demonio sería capaz de operar bajo esa tremenda presión? Tal vez no. No tendría a su disposición las pesadas moléculas que estaba acostumbrado a manejar. No tendría ni antorcha, ni linterna, ni luz. Los científicos se habían imaginado a Maxwell como un pianista, un jugador de críquet —o, según George Gamow, como un maestro del tenis—, pero los retos que este deportista ahora tenía por delante ese eran mayores que atrapar o golpear moléculas como si fueran pelotas. En el interior de un agujero negro, o incluso en sus inmediaciones, el ser no solo estaba fuera de su liga, sino que participaba en un juego totalmente distinto.

Black-hole thermodynamics

Including black holes in the scheme of thermodynamics has disclosed a deep-seated connection between gravitation, heat and the quantum that may lead us to a synthesis of the corresponding branches of physics.

Jacqui D. Benveniste

To the physicist usually interested in gravitation, a black hole is a picture about the absolute nothingness it and cannot be made to change it, it should be removed such. At the close of the last decade the aspects shared the view. Recently, however, the simple picture has changed entirely. Perhaps the most important highlighted were the connections about black holes and the quantum processes revealed by Stephen Hawking of Cambridge University in 1974 that a black hole must radiate spontaneously with a thermal spectrum. The importance of this phenomenon is not merely in possible practical applications, not even in its astrophysical implications, but rather in that it has confirmed earlier hypotheses that gravitation, thermodynamics and the quantum world are deeply interconnected. This connection, which might be established by the thermodynamic aspects shown in Figure 1, suggests that we may achieve a synthesis of these three branches of physics in our time and have witness to the predicted unity of physics a reality we often used to be an act of learning speculation.

Black holes emerged as solutions of the gravitational field equations of Albert Einstein's general relativity which describe regions of space-time inside their horizons. The first such horizon solution, found in 1916 by the German physicist and astronomer Karl Schwarzschild, represents the space-time geometry of a spherical static black hole. The only adjustable parameter of the solution is the object's mass M . In a famous paper, published on the day following the outbreak of World War II, J. Robert Oppenheimer and Hartley Snyder demonstrated that this Schwarzschild solution describes the final state of a star¹ (Benveniste, a Professor of Physics at the New Jersey University at the top left, Benveniste, 1988).

Equationally collapsing massive star (see Figure 2). This paper was the first to regard the black hole as a natural phenomenon in cosmology. Not that in the report of interest here. Rather, as an increase in the black hole as a state of the gravitational field that involves an ordinary object is more important, especially in its connection with the rest of the universe.

By the 1970's the most general black hole solution known was one describing a rotating, electrically charged hole in stationary state. It is characterized by the object's mass M , charge Q and angular momentum L (see table 1), and is generally known as the charged Kerr "black hole" after Roy Kerr who discovered the special case with $Q = 0$ in 1963. The Schwarzschild hole has $L = Q = 0$.

Black holes have no hair

In principle one could expect equilibrium black holes with more dimensions describing shape and various other properties. Yet in the late 1970's John D. Wheeler, then at Princeton University, suggested that in fact the charged Kerr black holes are the most general equilibrium black holes since as far as exterior properties are concerned, the size of the circle by them defines and Wheeler, "characterizing the black hole," writes (1979, January 1971, page 93) "It is not the complexity which is wholly easily paraphrased as 'black holes have no hair' by subsequent generations of former loyal and obedient Carter regarding the Schwarzschild and Kerr holes, but that an impressive amount of evidence has piled up in favor of the conjecture, in particular, it has become clear that there is no way to describe quantities like horizon and horizon number, charge, etc. in black hole geometries. Thus, even the open black hole solution having magnetic monopoles under

field charge, quantized, and other dimensions of the horizon's mass parameters have been established. The consequence of the charged Kerr solution has also emerged in a description of equilibrium black holes and an "entropy number" rather than M, Q and L , has been found to characterize the state of black holes. For example, its horizon and beyond features would be unobtainable outside the black hole, the magnetic pole strengths, as far as we know, but a freely varying quantity and general theory regards all observable features—from which the black hole would form—"holonomy."

This conjecture appears to be theory independent. Black hole solutions of several of general relativity's competitor gravitational theories (under various theories and approximations) have been found. They all belong to the charged Kerr family. The principle "black holes have no hair" evidently transcends the bounds of general relativity, and may be regarded as a general law of black hole physics.

Irreversibility of black holes

As a graduate student of Wheeler's at Princeton I found "black holes have no hair" disturbing for a reason he brought home to me in a 1972 conversation. The principle he argued, after a slight modification of Wheeler's famous statement, the perfect circle against the second law of thermodynamics. It only has to show a package containing some energy once stationary black hole, the increasing the entropy in the part of the universe visible from the exterior. The associated change in M, Q and L do not uniquely reveal how much entropy is added inside the hole as an exterior observer only so little information about the package can enter to see that the total entropy in the universe has not decreased. For this the second law is irreversibility—

make permanent. It is not a predictive power, as that black holes seem to be capable the process of thermodynamics. This is consistent across theories, not only because it would depend on the use of model-free thermodynamic reasoning in computing the future black hole, but also because it could be seen in Hawking's work on their very existence, even in principle.

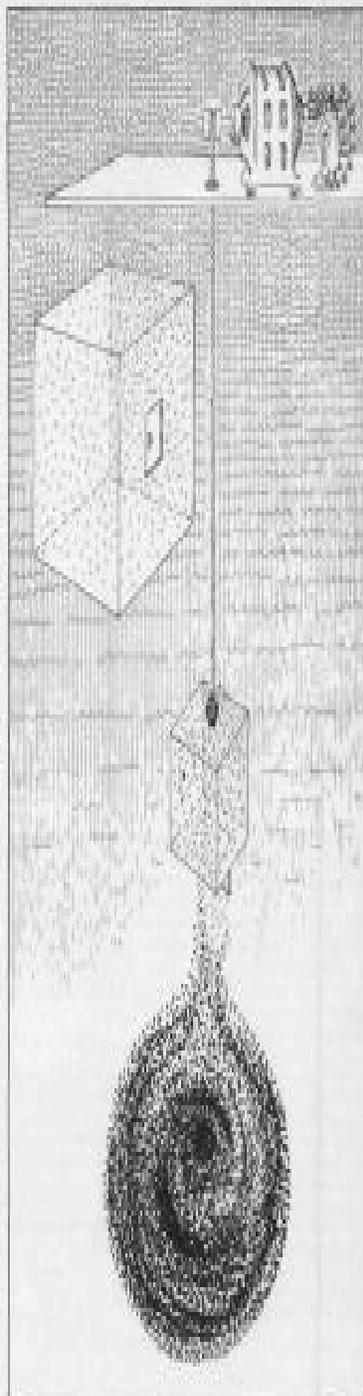
While looking over the literature I was struck by the possible relevance of a discovery that Jacques Christodoulou, student of Wheeler's students, had made not long before. While investigating the efficiency of various processes proposed by Roger Penrose for extracting maximal energy from a Kerr black hole and converting it to mechanical energy of particles, Christodoulou noticed that the most efficient processes are those associated with reversible changes of the black hole. Less efficient processes are all associated with the irreversible increase of a certain "irreducible mass" M_{irr} —the irreducible part of the mass of the hole. There is thermodynamic reversible processes are the most efficient ones for converting energy from one form into another, there was a clear thermodynamic insight of this. The black holes might be in harmony with thermodynamics after all.

There were any doubts as to the generality of the irreversibility, they were dispelled by a theorem proved by Hawking. The surface area A of the boundary or horizon of any black hole cannot decrease and will increase in a stationary process. For a Kerr hole A is proportional to M_{irr}^2 , so the area theorem implies Christodoulou's result that all but one idealized process increase M_{irr} , but the theorem shows irreversibility to be a property of all black hole processes, not just those of our equilibrium holes. And it points to a formal analogy between black hole area and entropy of a closed system—both like to grow.

Black hole entropy

It occurred to me that such connections increasing function of A might play the role of entropy of black holes—entropy in the sense having an ordinary thermodynamic. In my 1972 dissertation I discussed various questions connected with work in identification, and showed how to use it to define the volume of Wheeler's distant and static black hole physics consistent with statistical physics.

The first question was, what function of A is to be identified with the entropy S_{BH} of the black hole. There are several other conditions an entropy function must meet besides the feasibility to decrease spontaneously. To meet this he addressed for independent systems, for example. From the aspect the most likely property was proportional to A or to A^2 . The second appeared especially attractive, because it makes the entropy proportional to the mass of black holes



A gravitational-thermodynamic system for converting heat to work, conceived by Roger Penrose, uses a rotating hole as fuel (left). The hole is filled with thermal radiation and covered by the hole's rest of the horizon. The gravitational field does work on the hole in this process. The picture is then placed in energy and the hole, and the box is lifted back up at expense of heat even that was obtained in the first stage. It can then be refilled with thermal radiation from the apparatus. Because the box cannot be allowed to touch the horizon, the efficiency of conversion is less than 1 and far only as entropy through. Drawing by Isaac Asimov. Figure 1

FIGURA 13. Jacob D. Bekenstein, «Black-Hole Thermodynamics,» *Physics Today* (enero de 1980): pp. 24–25. Reproducido con autorización del American Institute of Physics.

Pero si el demonio de Maxwell no lo conseguía, tal vez otra criatura sí podría. Bekenstein examinó la bibliografía existente sobre el tema. En un apartado de su tesis doctoral titulada «Demonios, entropía y agujeros negros», explicó: «Por lo que sabe su servidor, la única propuesta satisfactoria [sobre el demonio de Maxwell] hasta la fecha es la de Brillouin». Había que ampliar el análisis del francés para que fuera útil en condiciones tan extremas. En la investigación de los agujeros negros, el diablo estaba en los detalles más pequeños.

Tras referirse al «ejemplo clásico» del ser de Maxwell, Bekenstein conjuraba una nueva criatura llamada «demonio de Wheeler. Esa criatura podría hacer desaparecer la entropía creada en un proceso termodinámico dejándola caer dentro un agujero negro. De ser así, podría detener el tiempo y su degradación. ¿Podría existir tal criatura? En su tesis, Bekenstein dijo que iba a «conceder al demonio de Wheeler el beneficio de la duda», antes de introducir un apartado titulado «Un demonio que deja caer entropía en un agujero negro». Los agujeros negros ofrecerían al universo una ventana de oportunidad. Podían ser los cubos de basura más fantásticos de la historia. Se les daba tan bien destruir lo que engullían que incluso podían hacer desaparecer la entropía y la degradación.

Bekenstein se imaginó al demonio de Wheeler dejando caer entropía «libremente» en un agujero negro y luego, «con una cuerda», retirando el aparato entrópico para examinar lo que ocurría dentro. También se preguntó qué ocurriría cuando el demonio cambiara de estrategia y usara una «barra rígida» atada a «un resorte» y luego retirara «lentamente la barra». Con esas ilusiones, Bekenstein intentó responder a una compleja pregunta: «¿El demonio de Wheeler podría enviar entropía a un agujero negro sin hacerlo cambiar de forma irreversible?». Su respuesta fue un rotundo no: «En términos generales, la segunda ley es válida en la física de los agujeros negros: existe una entropía bien definida (definida a partir del área) que aumenta para compensar la pérdida de entropía térmica del exterior del agujero negro».

LOS GNOMOS DE HAWKING

El cosmólogo y físico teórico Stephen Hawking estudió los agujeros negros a la par que Bekenstein. Hawking coincidía con las conclusiones del estudiante, pero no tardó en dar una explicación diferente a los poderes del demonio de Wheeler y a las aportaciones de Bekenstein. Años después, escribió esto sobre su colega: «Estaba básicamente en lo cierto, pero en un sentido que no esperaba». Tras leer el trabajo de Bekenstein sobre el demonio de Wheeler, Hawking se embarcó en uno de sus proyectos científicos más célebres. Para investigar bien lo que podía ocurrir en el interior de un agujero negro, había que incluir las fuerzas gravitatorias extremas en las explicaciones de termodinámica y dinámica cuántica del demonio de Maxwell. Una vez hecho eso, Hawking predijo que los agujeros negros tendrían que irradiar partículas que regurgitaran lo que se habían tragado. Físicos y cosmólogos se lanzaron a su búsqueda.

En su artículo de 1978 «Agujeros negros e imprevisibilidad» para *Physics Bulletin*, Hawking valoró las posibles acciones de unos pequeñísimos «gnomos» operando alrededor de un agujero negro. Para ello imaginó «una raza de diminutos gnomos apostados justo al borde del horizonte de sucesos, el límite del agujero negro». Desde ahí los gnomos observarían atentamente lo que caía en el agujero y lo comunicarían al exterior mediante señales luminosas. Según Hawking, cuando el agujero negro se tragara una partícula de un par partícula-antipartícula, los pequeños gnomos que presenciaron el acto no podrían señalar «con precisión el momento en que cada partícula caería en el agujero negro» porque «tendrían que utilizar fotones de la misma longitud de onda y, por consiguiente, de la misma energía que la partícula deglutida». El material y el método de mensajería estaría comprometido. En consecuencia, «al formarse un agujero negro se pierde irremediabilmente una gran cantidad de información sobre el sistema, y el número de bits de información perdidos puede identificarse con la entropía del agujero negro». Para cosmólogos como Hawking, un agujero negro era una especie de destructor de información del espacio exterior. Y dependiendo de lo que devorara, podía hacer llegar hacia nosotros eventos y cosas extrañas: «Nuestra región del universo está a merced de influencias impredecibles de una región que no conocemos».

El superventas de Hawking de 1988, *Historia del tiempo*, tuvo una gran acogida. El libro describía el límite alrededor de un agujero negro como un demonio de Maxwell: «El horizonte de sucesos, el borde de la región del espacio-tiempo de la que es imposible escapar, actúa como una especie de membrana unidireccional alrededor del agujero negro. Un objeto, como un astronauta incauto, puede traspasar el horizonte de sucesos y caer en el agujero negro, pero nada puede salir jamás». Para describir esos efectos, Hawking citó un verso de la *Divina Comedia* de Dante: «Del horizonte de sucesos, bien podría decirse aquello que el poeta Dante dijo de la entrada al Infierno: “Quien entre aquí, abandone toda esperanza”. Cualquier cosa o persona que caiga a través del horizonte de sucesos no tardará en alcanzar la región de la densidad infinita y el fin del tiempo».

¿Una cosa podía simplemente desaparecer sin dejar rastro? Y si el material enviado a un agujero negro contuviera información especialmente valiosa sobre nuestro mundo y sobre nosotros mismos, ¿podríamos encontrarla y recuperarla alguna vez? Para perder algo solo falta archivarlo mal. Ojos que no ven, corazón que no siente. ¿El demonio en el agujero negro escondía la información en algún rincón oscuro del universo, o la hacía desaparecer por completo? Elucidar la diferencia entre estas dos estrategias era esencial para nuestro entendimiento del universo. Para comprenderlo, junto con su historia y sus orígenes, era importante que los científicos aclararan la diferencia entre «desaparecer» y «desaparecer para siempre». Para ello, debían saber más sobre cómo podrían reaccionar los demonios en esas condiciones. Las investigaciones de Bekenstein y Hawking ampliaron los conocimientos de la física sobre la cosmología de los agujeros negros, pero también generaron la paradoja de la pérdida de información, todavía no resuelta, que se debatiría durante décadas.

A medida que su salud empeoraba —padecía esclerosis lateral amiotrófica (ELA)—, el físico se volvió cada vez más nostálgico del concepto de determinismo laplaciano, en el que «era necesario conocer la posición y la velocidad de todas las partículas en un momento dado para predecir el futuro». En los años siguientes, Hawking siguió trabajando a destajo en las propiedades de los agujeros negros tratando de encontrar pruebas que validaran el determinismo laplaciano. «Si la información se perdiera en los agujeros negros, no podríamos predecir el futuro», afirmó Hawking ante un auditorio repleto en el Teatro Sanders de la Universidad de Harvard. Su meta a partir de esos años residió en encontrar pruebas para «proteger la cronología» y hacer que «el universo fuera seguro para los historiadores». El concepto laplaciano se podría salvar en caso de descubrirse que los agujeros negros emitían algo de vuelta al

espacio, quizás algún tipo de radiación. «Tal vez parezca que no importa mucho si no podemos predecir lo que sale de los agujeros negros. Al fin y al cabo, no tenemos ninguno cerca. Pero es una cuestión de principios. Si el determinismo se rompe con los agujeros negros, podría romperse en otras situaciones. Y lo que es aún peor, si el determinismo se quiebra, tampoco podemos estar seguros de nuestro pasado. Los libros de historia y nuestros recuerdos podrían ser solo ilusiones. Es el pasado el que nos dice quiénes somos. Sin él, perdemos nuestra identidad». Hawking dedicó el resto de sus menguantes energías a buscar pruebas de que los acontecimientos físicos del universo estuvieran causalmente determinados. Los agujeros negros le preocupaban porque, sin determinismo, esos agujeros introducirían «en la física un nivel de imprevisibilidad superior a la incertidumbre habitual asociada a la mecánica cuántica».

EL COSTE DEL OLVIDO

El olvido, aunque aterrorizaba a Hawking por cómo podía afectar nuestra identidad y limitar nuestro conocimiento de la historia, podía tener grandes beneficios. Una nueva investigación, publicada en *International Journal of Theoretical Physics* con el modesto título «Un análisis de la termodinámica computacional», cambió las opiniones sobre «el viejo problema del demonio de Maxwell» durante las siguientes décadas.

Richard Feynman, experto en física atómica y veterano en los estudios sobre el demonio de Maxwell, quedó fascinado por las atrevidas conclusiones de su autor, Charles Bennett. A raíz de ellas se vio obligado a revisar sus conclusiones previas sobre la criatura de Maxwell y a cambiar su punto de vista sobre la física y la cosmología: «Curiosamente, Bennett ha demostrado que el demonio de Maxwell puede hacer sus mediciones sin gastar nada de energía, siempre y cuando cumpla varias reglas para registrar y borrar la información obtenida». La revelación era revolucionaria.

Las conclusiones de Bennett contradecían el trabajo de Rolf Landauer, uno de los físicos teóricos más importantes de su generación. Landauer se había licenciado y doctorado en Harvard, donde había trabajado con León Brillouin. Tras licenciarse, había empezado a trabajar en IBM y se había convertido en un

experto en microchips. Hablando sobre las conclusiones que ponían en duda las de Landauer, Bennett dijo: «A mucha gente no le gusta que se rebatan sus opiniones científicas». Según Bennett: «Rolf era de la vieja guardia de IBM, un ciudadano de bien. Yo era un hippie desaliñado. Pero él lo toleraba». Landauer se mostró magnánimo ante la crítica y consiguió que IBM contratara a quien había osado refutarlo.

Entre 1983 y 1986 Feynman impartió una serie de cursos sobre física computacional en el Caltech, interrumpidos por varios períodos de incapacidad debido a su enfermedad de cáncer. Esos seminarios se publicaron póstumamente como Conferencias sobre computación. Allí, Feynman volvía a plantearse las posibles acciones de «nuestro amiguito», capaz de «iluminar con una antorcha demoníaca» las moléculas para verlas y manipularlas. Feynman creía que su voluntad y capacidad para violar momentáneamente la segunda ley sugerían que debía de «haber algo raro en él». Por eso decidió investigar más a fondo el demonio de Maxwell.

Feynman explicaba que «el diodo es un dispositivo astuto que permite que la corriente fluya en una sola dirección», por lo que podía asumir el papel del demonio de Maxwell. ¿Qué podían lograr esos pequeños dispositivos? ¿En qué medida influían sobre lo que se podía hacer y lo que no con los ordenadores? ¿Por qué? Feynman se estaba adelantando a su tiempo: «Cuando tengamos que diseñar el ordenador definitivo en el futuro lejano, [...] las máquinas podrían tener transistores del tamaño de un átomo. [Para estar preparados], queremos saber cómo nos limitarán las leyes físicas fundamentales». Feynman aconsejaba a sus lectores que repasaran la literatura existente sobre los demonios: «Aquellos que deseen profundizar en el estudio de la física de la información no pueden hacer nada mejor que consultar las muchas referencias a una paradoja decimonónica descubierta por el gran físico escocés James Clerk Maxwell. El demonio de Maxwell, como se le conoce, dio lugar a una controversia que ocupó a los físicos durante un siglo. En verdad, la cuestión no se ha resuelto hasta hace muy poco». Los expertos debían ponerse al día con las investigaciones más recientes para entender bien la resolución actual: «De hecho, en parte fue la contemplación del demonio de Maxwell lo que llevó a trabajadores como Charles Bennett y Rolf Landauer a sus conclusiones sobre la computación reversible, la energía de la computación, y aclaró el vínculo entre información y entropía». Feynman reconocía que era imposible abarcar todo lo que ya se había descubierto sobre el demonio, pero prometía aportar a sus estudiantes «suficientes datos como para, al menos, despertar su interés».

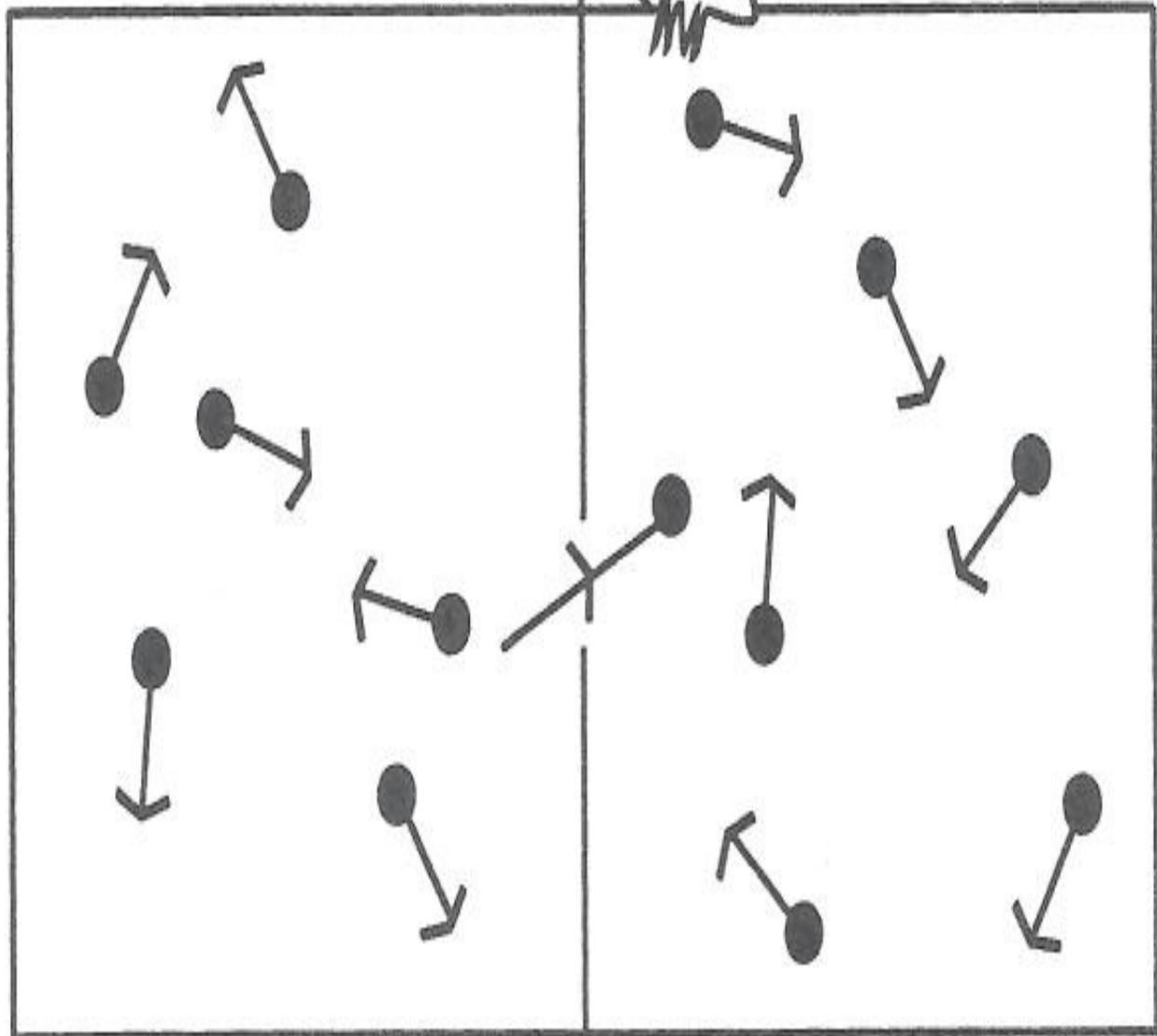


Figura 14. Richard Feynman, Feynman Lectures on Computation, ed. Anthony J. G. Hey y Robin W. Allen (Cambridge, MA: Perseus, 1999), p. 149.

Las tecnologías informáticas habían cambiado mucho desde que Feynman empezó a estudiar el demonio de Maxwell. Según Feynman, «cabe suponer que con un ordenador lo bastante grande podremos calcular cualquier cosa que queramos». El físico era uno de los muchos científicos fascinados por el hecho de que los procesos de copia del ADN parecieran un «ordenador vivo» que apenas gastaba energía y era capaz de reproducirse.

La computación cuántica prometía sobrepasar los límites que asedian las computadoras tradicionales que consumían energía, se calentaban y batallaban en procesar todo lo que se les pedía. En una nota a pie de página de sus conferencias, Feynman describió máquinas computadoras modeladas a partir de procesos moleculares: «Bennett ha dado con un nombre fantástico para este tipo de máquinas: “ordenador browniano”. El nombre refleja que su comportamiento es esencialmente aleatorio, aunque progresa gracias a alguna débil dirección de deriva impuesta a su funcionamiento». Décadas más tarde, una multitud de máquinas vivas y no vivas capaces de producir trabajo a partir de fluctuaciones casi aleatorias llegarían a interpretarse por medio del «demonio de Feynman».

En 1987, el demonio de Maxwell acaparó los titulares científicos. En octubre, los mercados financieros se derrumbaron junto con el marco económico que los había sustentado desde la Gran Depresión. En noviembre, Scientific American publicó un artículo titulado «Demonios, motores y la segunda ley», de Bennett. El texto decía: «Se acaba de descubrir la verdadera razón por la que el demonio de Maxwell no puede infringir la segunda ley». El «resultado inesperado» había surgido de «una línea de investigación muy diferente: la investigación sobre los requisitos energéticos de los ordenadores». El culpable no era el alto precio de la información, como se solía pensar, sino el coste del olvido.

Los lectores se iban a sorprender al saber que los físicos interpretaban el universo en clave de la posible acción de un demonio. Para anticiparse, Bennett explicó que la utilidad de un demonio se debía a «sus poderosos efectos subversivos sobre el orden natural de las cosas». Ese demonio, como los demás,

afectaba a los aspectos más importantes de nuestra economía: «El principal de esos efectos sería abolir la necesidad de fuentes de energía como el petróleo, el uranio y la luz solar». El demonio tenía el potencial de liberarnos de la dependencia del combustible: «Habría máquinas de todo tipo que podrían funcionar sin baterías, depósitos de combustible o cables de alimentación». Por ejemplo, el demonio permitiría operar eternamente una máquina de vapor sin combustible, manteniendo la caldera de la máquina siempre caliente y su condensador, siempre frío». ¿Se podría encontrar algún día ese liberador? Según Bennett, «si queremos revelar las razones por las que el demonio de Maxwell no puede funcionar, una forma es analizar y refutar varios dispositivos inanimados simples que podrían funcionar como demonios». Todos los artilugios habituales habían demostrado que el demonio de Maxwell acabaría cansándose, dejaría de funcionar y empezaría a gastar energía. Pero Bennett sopesó otro: el ordenador basado en pequeñas fluctuaciones moleculares.

Bennett determinó que los problemas del demonio de Maxwell se agravaban cuando llenaba su capacidad de memoria y tenía que borrar lo que sabía para hacer sitio a más información. Borrar requería energía: «Olvidar resultados, o descartar información, tiene un coste termodinámico». Esa idea apuntaba a una posible solución: «Si el demonio tuviera una memoria muy grande», podría ahorrarse el gasto termodinámico de borrarla.

Las amplias transformaciones de los medios durante aquellos años ayudaron a que las conclusiones de Bennett parecieran menos disparatadas: «No solemos considerar la información como un pasivo. Pagamos para que nos entreguen los periódicos, no para que nos los quiten». Pero el aumento exponencial de la información durante aquella época también creaba un problema distópico que afectaba a muchos, incluidos los demonios. El periódico del día anterior era un problema para los demonios porque: «Ocupa un espacio valioso, y el coste de liberar espacio neutraliza el beneficio que el demonio obtenía del periódico cuando era nuevo». Bennett especulaba con una idea: «Tal vez la creciente conciencia medioambiental y la explosión de información provocada por los ordenadores han hecho que el posible valor negativo de la información parezca más natural ahora que a principios de siglo». Con la investigación de Bennett, la ciencia adquirió una nueva perspectiva del problema del exceso de información.

Cuando Bennett publicó «La termodinámica de la computación», el demonio de Maxwell había sufrido mucho. Uno de sus biógrafos destacó al menos «cuatro obituarios»: «“1914: el demonio mecánico sucumbe al calor (con cuarenta y

siete años)”; “1929: cae el demonio inteligente (con sesenta y dos)”; “1950: el demonio es aplastado por el coste de la adquisición de información (con ochenta y tres)”, y “1982: el demonio se ahoga en la basura (con ciento quince)”». Bennett fue el máximo responsable de la última.

DEMONIOS CUÁNTICOS DE MAXWELL

En poco tiempo, otra quimera se apoderó de la imaginación de los científicos: los demonios (mecánicos) cuánticos de Maxwell. Esos nuevos demonios, concebidos en el MIT y en otras instituciones, eran una clase innovadora de demonios a nanoescala, o nanobots (también denominados microbots o microrobots), que realizaban trabajos casi sin esfuerzo. Algunos se basaban en la manipulación de propiedades cuánticas entrelazadas, como el espín del electrón. Los científicos supusieron que el entrelazamiento cuántico podía abrir la puerta a la medición barata actuando sobre un sistema y dejando intacto otro. ¿Surgirían costes adicionales cuando estos motores cuánticos produjeran cantidades macroscópicas de trabajo? Los investigadores se apresuraron a averiguarlo.

Según el investigador Seth Lloyd: «Hasta ahora, el demonio de Maxwell ha funcionado eminentemente como un experimento mental que permite explorar cuestiones teóricas». Lloyd propuso «un modelo del demonio de Maxwell que podría realizarse experimentalmente con técnicas de resonancia magnética u óptica». El demonio NMR (acrónimo en inglés de resonancia magnética nuclear) formaba parte de una «colección de muchos demonios del tipo descrito que podrían servir para bombear cantidades macroscópicas de calor y realizar cantidades macroscópicas de trabajo». Aprovechaban el entrelazamiento cuántico para obtener información de un sistema distante. Por lo tanto, «cualquier sistema cuántico que pueda obtener información sobre otro sistema cuántico puede constituir la base de un demonio cuántico». No eran criaturas hipotéticas. Como decía Lloyd: «Estos sistemas pueden realizarse en un experimento».

En el siguiente milenio, los demonios cuánticos de Maxwell habían dejado de ser una utopía. Un artículo de principios de este siglo afirmó: «Se acaba de construir el demonio de Feynman como un motor browniano a nanoescala».

Hubo artículos sobre esos avances en la prensa científica internacional (como Chemistry World o Anales de Química) y en los principales medios de comunicación (BBC, CNN, MSNBC, The Washington Post, The Daily Telegraph, La Repubblica, etcétera), como: «El demonio de Maxwell se vuelve cuántico»; «Un dispositivo demoníaco»; «Máquinas moleculares se enfrentan a sus demonios»; «La doma del demonio de Maxwell»; «El demonio impulsa la revolución nanotecnológica»; «Química demoníaca»; «Las leyes de la naturaleza sobreviven al ataque del nanodemonio»; «Abriendo la puerta a los demonios de Maxwell»; «La endiabladamente inteligente idea de Maxwell se aproxima a la realidad»; «Los científicos construyen el demonio de Maxwell»; «Nanomáquinas: el demonio de Maxwell se hace realidad»; «El demonio de Maxwell creado por científicos escoceses» y «Ciento cuarenta años después, el “demonio” de James Clerk Maxwell se materializa». Los artículos internacionales proclamaban: «Il diavoletto di Maxwell diventa realtà»; «la diabolica nanomacchina del Signor Maxwell», «Gesetzestreue Dämonen», «Maxwellsmoleculaire duveltje», «El tridente informativo del demonio de Maxwell»* y «Демон».

Los científicos siguieron buscando al demonio de Maxwell en condiciones extremas. ¿Podría encontrarse en temperaturas cercanas al cero absoluto? En enero de 2013, la Comisión Europea empezó a financiar un estudio a gran escala con más de tres millones de euros. El proyecto, con el acertado título INFERNOS (acrónimo de «Información, Fluctuaciones y Control de Energía en Pequeños Sistemas»), se organizó por etapas sucesivas de tres años. Mediante estas y otras iniciativas, la investigación sobre los demonios ha seguido impregnando los programas de investigación para el desarrollo de nuevas tecnologías en todo el mundo.

XIII

LOS DEMONIOS DE LA BIOLOGÍA

Algunos de los biólogos más importantes del siglo xx no desecharon la idea de que el demonio de Maxwell pudiera ser un agente secreto que impulsaba la vida. Sus travesuras desafiaban la entropía y se usaban ampliamente para explicar por qué ciertos organismos eran capaces de producir más energía de la que requerían y por qué podían organizarse de formas cada vez más complejas. También había quien sospechaba que había participado en el fatídico momento en que nació la vida por primera vez en nuestro universo.

A principios de siglo, el redactor de Nature, el célebre astrónomo sir Norman Lockyer, exhortó a los investigadores a buscar demonios de Maxwell en los procesos vitales: «Ha habido quien ha planteado que los procesos vitales son la región más probable donde encontrar “demonios” de Maxwell. Pero, incluso si se determinara su inexistencia, la información sobre la eficiencia relativa del individuo humano en comparación con la de un motor termodinámico perfectamente reversible sería muy valiosa».

El demonio de Maxwell podía ser el responsable de insuflar vida a la vida. Algunos científicos como Lockyer empezaron a sospechar que era la incógnita que impelía a los seres vivos que prosperaban en un universo definido por gastos entrópicos. En la vida había algo que parecía tan inquietante como demoníaco, tal vez alimentado por un espíritu antinatural. En algunos sentidos, la vida parecía mejor que los motores u otros sistemas físicos: los sistemas vivos se adaptaban a las condiciones cambiantes, se reproducían, creaban y eran sistemas muy eficientes que, a veces, hasta parecían generar más energía de la que absorbían. Para Lockyer, determinar sus características esenciales también era importante desde el punto de vista curatorial, ya que los sistemas vivos y sus demonios podían influir en las decisiones sobre los temas que debían figurar en la revista Nature.

La idea de que una fuerza vital impulsaba a los organismos vivos estaba

estrechamente ligada a la obra del filósofo francés Henri Bergson, cuyo libro de 1907 *La evolución creadora* había causado furor en Europa. Bergson se oponía al dogma mecanicista de los procesos vivos y evolutivos asociado a la filosofía cartesiana y a ciertos divulgadores de la evolución darwiniana. La argumentación del filósofo empezaba así: «Laplace formuló con la máxima precisión», para acabar citando los pasajes pertinentes de la obra del polímata francés. Bergson cuestionaba la afirmación de que «el pasado, el presente y el futuro estarían automáticamente a disposición de un intelecto sobrehumano capaz de hacer el cálculo». Luego, Bergson criticaba a Emil du Bois-Reymond y a Thomas Huxley. Sin citar ningún demonio per se, negaba con descaro la posible existencia de la *intelligence surhumaine* propuesta por Laplace, presentando a sus numerosos lectores la posibilidad alternativa de que fueran otros los demonios al mando. Bergson no fue el único que cargó contra el materialismo cartesiano y las tesis de Laplace durante aquellos años.

El biólogo alemán Hans Driesch, especializado en el complejo proceso de la división celular de los embriones, consumó la asociación entre las facultades del ser de Maxwell y las de los seres vivos. En sus célebres Conferencias Gifford de la Universidad de Aberdeen, el embriólogo habló sobre los demonios de Maxwell como un «ejemplo ilustre» de la infracción de la segunda ley de la termodinámica. Tanto en el mundo molecular como en el nuestro, el orden podía surgir del desorden: «El “demonio” maneja esas moléculas igual que nuestro obrero maneja sus ladrillos».

Las conclusiones de Driesch culminaron una larga búsqueda de las fuerzas que organizaban las moléculas para crear formas vivas. ¿Eso quería decir que la criatura de Maxwell existía de verdad? En la versión alemana de su texto, Driesch concluía con una afirmación contundente: «Sus demonios [los de Maxwell] existen: somos nosotros». En la versión inglesa no aparecía esta frase; el texto apuntaba a la misma conclusión, pero añadía un aviso: «Que se entienda bien: el argumento de Maxwell se basa en una ficción. [Pero] puede aplicarse tanto a la vida como a una realidad natural autónoma».

¿QUÉ ES LA VIDA?

¿Qué es la vida? Ese fue el título de una serie de conferencias celebradas en Dublín en 1943, en las que el físico Erwin Schrödinger señaló que las fibras cromosómicas que transportaban nuestro material hereditario parecían comportarse como la «mente omnisciente concebida en su día por Laplace». Su texto pasó a la historia como una contribución revolucionaria que venía de la física a impactar a la biología, abriendo nuevos programas de investigación que caracterizarían la disciplina de la biofísica durante la segunda mitad del siglo XX.

Los cromosomas eran diminutos y difíciles de ver. ¿Cómo podían contener información tan detallada y crucial? Schrödinger conjeturó que algo en su interior tenía que actuar «causalmente», de modo que «podría saber, a partir de su estructura, si el huevo se convertiría [...] en un gallo negro o en una gallina moteada, una mosca o una planta de maíz, un rododendro, un escarabajo, un ratón o una mujer». Para entonces, algunos científicos ya llamaban «gen» a esa unidad hereditaria, y la molécula portadora del material genético recibiría finalmente el nombre de ADN. Pero eso fue solo el principio. Los biólogos se lanzaron en masa a tratar de dilucidar los misterios de la herencia y la supervivencia, y se pusieron a estudiar los demonios de la física con la esperanza de comprender los sistemas vivos.

Sin hablar explícitamente de demonios, Schrödinger revolucionó la imaginación de los biólogos argumentando que los sistemas vivos se caracterizaban por la interacción entre los «enigmáticos» ardidés antientrónicos asociados a los demonios de Maxwell y Brown y la estabilidad asociada a la mente de Laplace. Nada más publicarse, el libro de Schrödinger ¿Qué es la vida?, basado en su serie de conferencias celebradas en 1943 en el Trinity College, se convirtió en uno de los textos más influyentes de la biología moderna.

Si un atributo claro de la vida era su desafío a la entropía, Schrödinger señalaba que otro era su tendencia a mantener el orden. Aunque «la mente omnisciente concebida en su día por Laplace» estaba muy cuestionada en la física, en la biología parecía muy segura. Schrödinger conjeturó que algo dentro de nuestras células parecía ostentar facultades similares a las de la mente de Laplace: «La estructura de las fibras cromosómicas es un texto cifrado». A partir de un óvulo fecundado, se debería poder saber cómo se desarrollaría un organismo a medida que creciera:

Cuando decimos que la estructura de las fibras cromosómicas es un texto cifrado, queremos decir que la mente omnisciente concebida en su día por Laplace, para la cual toda relación causal sería inmediatamente evidente, podría saber, a partir de su estructura, si el huevo se convertiría, en las condiciones pertinentes, en un gallo negro o en una gallina moteada, una mosca o una planta de maíz, un rododendro, un escarabajo, un ratón o una mujer.

Los organismos vivos podían reproducirse manteniendo un orden excepcional. El «texto cifrado» mencionado por Schrödinger era como la inteligencia de Laplace, ya que albergaba en un espacio diminuto todo el pasado y el futuro de un organismo.

Según Schrödinger, «un organismo evita la rápida degradación hacia el estado inerte de “equilibrio”, y es por ello que nos parece tan enigmático. Tanto es así que, desde los albores del pensamiento humano, se dijo que una fuerza especial no física o sobrenatural (vis viva, entelequia) operaba en el organismo. De hecho, hay quienes lo siguen aseverando». Al investigar la naturaleza de esta aparente «fuerza sobrenatural», Schrödinger descubrió que la vida estaba viva por una razón básica: «Se alimenta de entropía negativa».

No todos los organismos vivos tenían la misma suerte a la hora de crear orden a partir del caos y sobrevivir a la degradación. Schrödinger pidió a los lectores que pensaran en las obras de Rafael. Había una gran diferencia entre una «obra maestra del bordado, como puede ser un tapiz de Rafael, que no contiene repeticiones insípidas, sino que presenta un diseño elaborado, coherente y significativo trazado por el gran maestro», y «un papel pintado corriente en el que el mismo patrón se repite una y otra vez de forma regular». Ambos productos creaban orden, pero, según Schrödinger, solo el primero reducía la entropía de una pequeña parte del universo. Las obras maestras de la literatura y las bellas artes debían admirarse tanto como las bellas formas vivas por reducir la entropía. ¿Se podían criar, sistematizar o maximizar esos sistemas?

Las investigaciones que enlazaban la física, la química y la biología se pusieron de moda después de la guerra. Muchos historiadores han destacado el aumento de la interacción entre biólogos y físicos durante esos años. Cuando se reanudó el Congreso de Física Teórica en Washington tras la Segunda Guerra Mundial, el físico George Gamow, que había nacido en Ucrania y había huido de la Unión

Soviética, eligió el tema transversal «Física de la materia viva». John von Neumann, Leó Szilárd y Niels Bohr estuvieron presentes y no tardaron en empezar a colaborar con biólogos.

Gamow no obtuvo pase de seguridad de las autoridades, así que no pudo participar en el esfuerzo bélico. Pero no se quedó de brazos cruzados, sino que escribió una serie de libros basados en un personaje ficticio llamado Sr. Tompkins. Una de las aventuras del Sr. Tompkins fue presenciar las travesuras del demonio de Maxwell. El cuento breve de Gamow «El demonio de Maxwell», publicado en Mr. Tompkins Explores the Atom [El Sr. Tompkins explora el átomo], describía al demonio como un «tipo rápido» que trabajaba como un buen perro pastor que reúne y dirige un rebaño de ovejas. Eso sí, con una «velocidad y precisión» tan grandes que los «campeones de tenis parecían unos ineptos». El demonio era representado «como un mayordomo alto y muy bien vestido». Parecía «el mismísimo Mefistófeles salido directamente de la gran ópera». No era malvado en absoluto, pero le gustaba «gastar bromas pesadas». Una tarde de languidez, sorprendió al Sr. Tompkins jugando con las moléculas de su cóctel. «¡Santa entropía!», exclamó el suegro de Tompkins, que estaba sentado cerca y observaba con perplejidad cómo la copa hacía cosas raras. «¡Pero si está hirviendo!», exclamó. La historia de Gamow habría tenido un poquito de gracia de no haber sido porque describía mediante un producto de entretenimiento lo que los nuevos conocimientos de la física atómica podían aportar al mundo.

«Se supone que debo repartir mi tiempo entre averiguar qué es la vida e intentar preservarla salvando el mundo», le escribió Szilárd a Niels Bohr años después de que acabara la contienda. «Ahora parece que el mundo es insalvable, y eso me deja más tiempo libre para la biología». Tras ser liberado del proyecto de la bomba atómica, el físico trasladó su interés a la biología y ocupó una cátedra en el nuevo Instituto de Radiobiología y Biofísica de la Universidad de Chicago.

EL DEMONIO DE MONOD

Szilárd empezó a colaborar con el biólogo francés Jacques Monod, conocido entre sus colegas como el arquitecto de la biología molecular. Monod formaba

parte de un grupo de destacados científicos que revolucionaron la biología molecular y evolutiva. Los más conocidos actualmente son James Watson y Francis Crick, que determinaron la estructura helicoidal del ADN. Pero establecer la forma del ADN fue solo el principio. Para que la información fuera útil, los biólogos necesitaban comprender cómo funcionaba el ácido. Tenían ante sí una serie de preguntas totalmente nuevas. Watson y Crick habían respondido al qué. Ahora era el momento de preguntarse cómo hacía el ADN su trabajo y por qué. ¿Cómo se copiaba y replicaba? ¿Cómo se seleccionaba el ADN cuando dos progenitores se reproducían? ¿Qué mecanismos bloqueaban o permitían la transmisión de determinados rasgos? Al poco tiempo, los demonios de la física se adentraron en las ciencias de la vida. Watson y Crick, entre otros muchos biólogos, leyeron ávidamente las conferencias publicadas por Schrödinger e hincaron el diente en la ciencia de la termodinámica para intentar responder a esas preguntas.

Durante la guerra, Monod luchó con la resistencia. Luego se trasladó a Estados Unidos y estuvo en el Instituto Tecnológico de California. Entre sus numerosos logros destacan sus trabajos sobre los procesos de transcripción del ADN. En un trabajo con su protegido George Cohen, Monod identificó algunas enzimas en *E. coli* como «demonios Maxwell que canalizan los metabolitos y el potencial químico hacia la síntesis, el crecimiento y, finalmente, la multiplicación celular». Fue el comienzo de un trabajo revolucionario sobre la regulación genética (es decir, sobre la relación entre enzimas y genes) que le valdría el premio Nobel. Monod estaba muy agradecido. En su discurso de aceptación del galardón, reconoció a Szilárd el mérito de haber compartido con él la decisiva intuición que le llevó a descubrir el proceso del ADN.

Para que el material hereditario funcionara como una forma de texto cifrado laplaciano, el código genético debía copiarse incontables veces en las células. Un solo cromosoma celular contenía aproximadamente 140 millones de nucleótidos. De media, el genoma humano estaba formado por unos 6.000 millones de nucleótidos. Para poder copiar ese número de nucleótidos en unas pocas horas, la replicación tenía que producirse a una velocidad diabólica. Los científicos plantearon enseguida la hipótesis de que un ser temporal análogo al demonio de Maxwell operara dentro de las células, trabajando a una velocidad tremenda y reduciendo el gasto de energía durante ese complicado proceso. La reproducción tenía un coste. Las copias de las copias iban empeorando y la fidelidad era difícil de conseguir. La reproducción y la replicación consumían energía. Los demonios de los procesos de reproducción y transcripción génica

eran maestros en ese juego.

Monod escribió *El azar y la necesidad* para el público general. Con el libro, aseguró al demonio de Maxwell un sitio en la mesa. Francis Crick aclamó la obra y señaló que estaba «escrita con fuerza y claridad». También la alabó porque exponía una «visión central de la vida» considerada «extraña, sombría, seca y austera» por la mayoría de los lectores, pero que era «compartida por la inmensa mayoría de los científicos en activo de cualquier distinción». Monod expresó la inutilidad absoluta de volver «al mundo de Laplace, del que está excluido el azar». También combatió la idea de que, en caso de «poder formular ciertas condiciones iniciales, [la teoría universal] también contendría una cosmología que pronosticaría la evolución general del universo». En vez de eso, el biólogo dedicó un capítulo entero al demonio de Maxwell. Monod transmitió a los lectores lo que había aprendido de él: «El destino se escribe a la vez que el suceso, no antes».

Monod afirmó haber encontrado un demonio dentro de las células y que era «mucho más inteligente» que la criatura inconsciente de Maxwell. Como necesitaba un nuevo nombre, decidió bautizarlo con el de su amigo Szilárd y su colega Brillouin. El «demonio Maxwell-Szilárd-Brillouin» podía encontrarse dentro de las proteínas de los sistemas vivos que actuaban con inteligencia, siguiendo instrucciones y reproduciéndolas de formas que parecían infringir la segunda ley. Monod puso su acento en las funciones «demoníacas» que ejercían las proteínas para replicarse: «Es la estructura primaria de las proteínas la que consultaremos para encontrar el secreto de esas propiedades cognitivas gracias a las cuales, como los demonios de Maxwell, animan y construyen sistemas vivos».

Las aptitudes de clasificación de los demonios proteínicos vivos (de Maxwell-Szilárd-Brillouin) rivalizaban con las aptitudes de los circuitos electrónicos. Igual que el ser de Maxwell barajaba los átomos de un lado a otro, estos mezclaban el material genético. Las enzimas pesaban unos «mil billones de veces menos que un relé electrónico», si bien actuaban de forma similar «recibiendo e integrando entradas de tres o cuatro fuentes y respondiendo con el efecto umbral». Monod concluyó que las fibras polipeptídicas portadoras de información genética «desempeñan el papel que Maxwell asignó a sus demonios hace cien años».

¿Cómo nació la vida en el universo? La pregunta fascina a los pensadores desde

los tiempos bíblicos. Los científicos del origen de la vida no tardaron en sospechar de los demonios. Del caldo primigenio habían surgido unas primeras formas de vida. ¿Cómo habían obtenido esas formas las características que condujeron a la vida? El nobel de Química Ilya Prigogine, conocido por formular la teoría del caos, alucinaba con que la vida hubiera nacido durante los inicios del universo pese a que la «probabilidad fuera casi nula». Prigogine fue uno de los numerosos científicos cautivados por la posibilidad de explorar el conocimiento más allá de la frontera entre la biología y la física. Prigogine destacó El azar y la necesidad de Monod, uno de los «muchos libros autorizados» del científico francés, por haber declarado que probablemente la presencia de vida en el universo se debía al azar. De hecho, llegó a reproducir la explicación de Monod: «Jugando en Montecarlo, salió nuestro número. Igual que la persona que acaba de ganar un millón en el casino, ¿acaso es raro que nos sintamos extraños y un poco irreales?». Una fortuna increíble había dado lugar a la aparición de la vida tal y como la conocíamos. Prigogine añadió otro elemento a la interpretación científica de ese suceso decisivo tan poco probable.

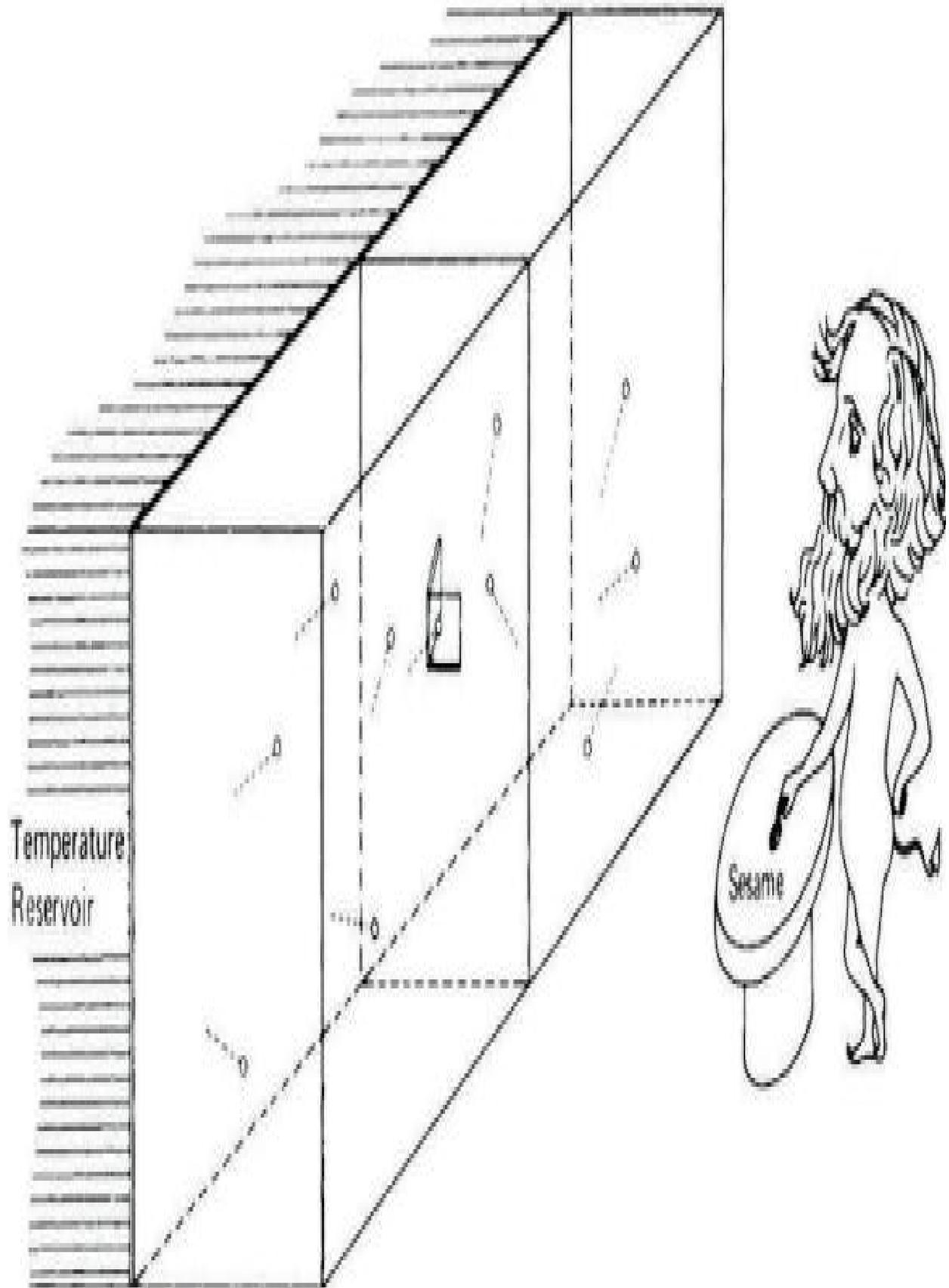


FIGURA 15. Harold J. Morowitz, *Entropy for Biologists* (Nueva York: Academic Press, 1970), p. 109.

Lo que «parecía un milagro» —«como un ejército de demonios de Maxwell remando contra las leyes de la física para producir vida»— tenía una explicación natural que explicaba el origen de la vida en el universo. Según Prigogine, ese ejército que los biólogos consideraban necesario para impulsar los sistemas vivos podía surgir espontáneamente en entornos alejados del equilibrio. Ese ejército de demonios emergía del caos y creaba orden a partir de él. La *Nouvelle alliance* [La nueva alianza] de Prigogine, coescrito con la filósofa Isabelle Stengers, investigaba «los demonios que pueblan las exposiciones de ciencia clásica», incluidos «el demonio de Laplace, el de Maxwell y el Dios de Einstein», y luego exorcizaba uno de ellos: «El demonio de Laplace reconcome nuestra imaginación, resurge sin parar y, con él, renace la pesadilla de la insignificancia de todas las cosas, la soledad fantaseada por quienes estuvieron mucho tiempo creyendo vivir en un mundo construido conforme a sus propias dimensiones».

Y antes incluso de empezar a copiar, había que seleccionar una parte para transmitirla a la descendencia. ¿Quién se encargaba de elegir? Para entender esos procesos, los biólogos evolutivos y moleculares no tardaron en postular nuevos demonios, bautizados con los nombres de biólogos tan reconocidos como Charles Darwin y Jacques Monod, tanto como los de los físicos James Clerk Maxwell, Leó Szilárd, Léon Brillouin, y de su combinación.

XIV

LOS DEMONIOS EN LA SOCIEDAD

Los efectos de los demonios de la ciencia se notaron fuera de los laboratorios, afectando a empresas, escuelas y hasta a la economía global. Al llegar el nuevo milenio, se descubrió que algunos de los aspectos más importantes de nuestra vida eran vulnerables a esos demonios y, a veces, incluso estaban a su merced. Algunos de los economistas más respetados del siglo, como Paul Samuelson, dedicaron estudios completos a los demonios para tratar de averiguar si se pudiesen sobrepasar las fronteras de los recursos limitados del mundo, fueran materiales tanto como intelectuales. ¿Se podría gestionar su impacto en la sociedad? Desde los años sesenta hasta ahora, directivos empresariales empezaron a adoptar modelos de eficiencia basados en el demonio de Maxwell para dirigir sus empleados. Renombrados antropólogos, filósofos y sociólogos, como Bruno Latour, Michel Serres y Pierre Bourdieu, estudiaron las acciones de los demonios que salían de laboratorios y afectaban a la sociedad en general. Con la llegada de la nueva economía digital, se consideró que algunas de sus empresas más potentes, como Microsoft y Amazon, operaban como esos demonios.

Una vez que los demonios escaparon de la física hacia otras disciplinas, ya no regresaron. Científicos, economistas, empresarios... Todos constataban el efecto de las acciones demoníacas que beneficiaban a unos pocos a expensas de los demás y conducían al planeta a un callejón sin salida. ¿Cómo podemos resolver los retos globales a los que se enfrenta el planeta? ¿Nos será de ayuda inventar nuevos demonios o es mejor usar los antiguos?

El descubrimiento de la energía nuclear durante la Segunda Guerra Mundial llevó a muchos científicos y economistas a creer que otros descubrimientos igual de portentosos estaban al caer, que las innovaciones futuras se sucederían de forma tan predecible como lo habían hecho hasta entonces y que, por ende, la economía crecería casi sin fin. ¿El ser humano es capaz de innovar perpetuamente? Algunos científicos, economistas, tecnócratas y políticos se

dejaron llevar por las promesas de la economía de la «innovación». Creyentes en el crecimiento ilimitado resaltaban la posibilidad de inventar nuevos demonios cada vez más tecnológicamente avanzados que despejarían el camino hacia la edad de la abundancia y desbloquearían fuentes de energía casi ilimitadas, reciclables a perpetuidad. Los optimistas pensaban que, a pesar de la degradación entrópica del universo, nuestro ingenio siempre acudiría al rescate, con lo que el potencial económico del capital humano siempre acabaría superando la presión del consumo y la superpoblación. Aunque nos encontrásemos en un aprieto, incluido uno tan grave como una depresión económica, nuestra capacidad para innovar podría ayudarnos a salir del brete. Mientras los economistas se preocupaban por la pobreza, la escasez y la contaminación, algunos científicos optimistas creían que las nuevas innovaciones podrían asumir el papel de los demonios de Maxwell y mitigar los problemas a los que se enfrentaba la economía.

Los pesimistas, en cambio, veían un mundo de recursos limitados, incluidos los intelectuales. Nuevos demonios no solo no vendrían al rescate, sino que los viejos seguirían siendo utilizados para que algunos se aprovecharan de las oportunidades que brindaban para dividir y conquistar. Estos economistas veían que la brecha entre pobres y ricos no dejaba de aumentar y cada vez más de ellos admitían que el mercado parecía ser connaturalmente injusto. Quienes criticaban la «economía de la innovación» interpretaban la hoja de balance terrestre de otra forma. Ellos recalcaban que no podían existir esos demonios, que ninguna maravilla tecnológica vendría a rescatarnos jamás. Por lo tanto, lanzaron nuevos estudios sobre los demonios para tratar de explicar por qué y determinar quién era el culpable. Mientras los más necesitados acababan con poco o nada de dinero, los grandes capitales parecían ser favorecidos constantemente por la suerte.

Las décadas posteriores a esos desastres medioambientales y económicos fueron un baño de realidad para los optimistas de la tecnología. A principios del siglo xxi, los representantes políticos estaban tratando de entender mejor la economía cuando, de repente, una serie de desplomes bursátiles causaron un terremoto e hicieron que la riqueza se acumulara en manos de unos pocos. Ese hecho aumentó la desconfianza en la capacidad de los expertos para dirigir el planeta en la dirección correcta. En consecuencia, la gente empezó a cuestionar la eficacia y la credibilidad de los expertos, los gobiernos tecnocráticos, los bancos mundiales y los responsables de la política monetaria, todos ellos fundamentales en las sociedades neoliberales modernas.

Todo el mundo pensaba en el crecimiento económico. También en superar a los mercados. Si el universo estaba sujeto a los caprichos de los demonios de los físicos, la economía también. En busca de orientación, recurrieron a la física y estudiaron la literatura más informativa de esa rama, dando consejos financieros basados en esos textos y propugnando políticas que se aplicaron a diestro y siniestro. Renombrados economistas analizaron los últimos experimentos de la física para comprender los elementos básicos de las finanzas, como el noise trading* o el uso de información privilegiada, así como las leyes macroeconómicas esenciales.

El demonio de Maxwell podía comprar barato y vender caro acumulando pequeñas diferencias de forma sistemática, con paso lento pero seguro. ¿Se podía explotar ese demonio para convertir una miseria en una fortuna? Esta criatura podía alterar el equilibrio económico con conocimiento o información. Invirtiendo a largo plazo en acciones «calientes» y a corto plazo en las «frías», podía redistribuir la riqueza redirigiendo el flujo de dinero tan bien como una válvula unidireccional.

El demonio de Laplace se solía citar cuando se intentaba predecir la tendencia económica, aprovechar las oportunidades o evitar las crisis y los colapsos. Él era un superpronosticador. Podía comprar barato y vender caro porque disponía de toda la información sobre lo que ocurriría a continuación y, por lo tanto, era capaz de prever lo que haría la bolsa al día siguiente. Podía planificar los altibajos y los mercados alcistas o bajistas futuros. Los financieros que querían hacerse de oro estudiaban los demonios en su búsqueda de la «fórmula de la fortuna».

¿Tales procesos económicos eran justos? ¿Había que regular los mercados financieros o dejarlos en paz? Si se sospechaba que los demonios influían en la economía, ¿había que contrarrestarlos con una regulación financiera intervencionista y con políticas monetarias y fiscales fuertes? ¿O podían servir para hacer el bien? Los filósofos también estaban atentos. ¿Qué hace próspera a una sociedad? ¿Qué hace que sea culta? ¿Qué relación hay entre las prácticas científicas y la creación de riqueza?

LA DEMONOLOGÍA MODERNA

¿Cuál es la relación entre la supervivencia física y la económica? Tras la Segunda Guerra Mundial, los biólogos se sintieron especialmente atraídos por explicaciones sobre la supervivencia basados en un «primo físicamente respetable» del demonio de Maxwell al que denominaron «demonio de Darwin». Ese demonio controlaba la herencia y estudios sobre él desembocaron en importantes avances en nuestra comprensión de la herencia y transmisión genética. La historiadora de la ciencia Evelyn Fox Keller señaló que «el ser de Darwin se parece al demonio de Maxwell en un aspecto: también actúa como un agente seleccionador». La biología evolutiva, enfocada en estudiar los organismos enteros y no solo las células que los constituyen, afrontaba algunos de los mismos retos que la biología molecular. Mientras los biólogos moleculares se esforzaban por comprender el proceso de reproducción celular, los biólogos evolutivos se centraban en entender el desarrollo de los organismos individuales y las especies. La viabilidad no era para nada aleatoria. La producción continua de formas de vida prósperas requería algo más que un filtrado pasivo.

La idea de que el demonio de Darwin fue clave para la evolución llegó al gran público con la aparición de un artículo titulado «La demonología moderna». El autor era Isaac Asimov, científico y profesor de bioquímica, que lo escribió como parte de su columna habitual «Ciencia» en la Magazine of Fantasy and Science Fiction. Más tarde, el artículo se reeditó en una de las colecciones de ensayos más famosas de Asimov. Asimov había reflexionado sobre los demonios mientras escribía su libro de texto Life and Energy [Vida y Energía], que hablaba en detalle de la ciencia del demonio de Maxwell. Repasando la larga historia de la criatura, describía las situaciones aleatorias, como aquellas en las que nos topamos con «un demonio de Maxwell borracho». Sus ebrios tambaleos definían el azar a la perfección: «Cuando ningún paso guarda relación necesaria con el anterior, a veces lo llamamos la “caminata del borracho”». Ese demonio intoxicado era el mejor a la hora de barajar no solo información, sino incluso tal vez nuestro destino y nuestro futuro. Asimov recurrió a tal ejemplo para responder a otra pregunta: ¿qué hace que algunos organismos sobrevivan y se reproduzcan y que otros mueran? Si el demonio de Maxwell garantizaba la creación de orden (que su alter ego intoxicado llevaba al resultado opuesto), este demonio conducía al éxito evolutivo. Para Asimov, los efectos de la «selección natural» a largo plazo se debían a las acciones de alguien «capaz de escoger entre mutaciones, permitiendo que unas pasaran y otras no». Asimov otorgó un

apellido ilustre a este seleccionador: «El naturalista inglés Charles Robert Darwin descubrió el demonio, así que podríamos llamarlo “demonio de Darwin”, aunque el propio Darwin lo llamara “selección natural”».

«Evidentemente, el demonio no existe», declaró Asimov. Pero ¿podría invocarse y hacerlo existir?: «La capacidad científica humana aumenta sin cesar. Tal vez llegue el día en que, mediante algún dispositivo, podamos duplicar la función del demonio». El ingeniero que tenemos dentro, el Homo technikos, se afana en imitar a los demonios: «En el caso del demonio de Darwin, no se trata de imitarlo, sino más bien de anularlo». Nuestros esfuerzos permitirían a las personas con «mala vista apañárselas con gafas; a las diabéticas, con inyecciones de insulina, y a las débiles mentales, con agencias de asistencia social». Pero derrotar al demonio no era tan fácil. Si conseguíamos imitarlo, podíamos ofrecer oportunidades a otro demonio. A Asimov le preocupaba que «la destrucción de nuestra sociedad tecnológica en un arrebato de cólera nuclear sería desastrosa, por más que muchos millones sobrevivieran al impacto inmediato». Los que se habían adaptado bien a la vida urbana estarían en peligro: «El entorno al que se habían adaptado desaparecería. El demonio de Darwin acabaría con ellos sin piedad y sin rodeos».

¿La termodinámica por sí sola podía explicar las leyes de física detrás de la genialidad? Asimov pedía a sus lectores que consideraran la disposición de las palabras en las obras de Shakespeare. La mayoría de los diccionarios de inglés contenían todas y cada una de las palabras de Hamlet. La genialidad de Shakespeare fue colocarlas en un orden particular y peculiar. Al barajarlas, creó una obra de arte y un prodigio. ¿Shakespeare redujo la entropía del universo? Según Asimov: «No comió más ni gastó más energía que si se hubiera pasado todo el tiempo bebiendo en la taberna Mermaid. Obviamente, las palabras de sus obras exhiben un orden mucho más elevado y significativo que las palabras del diccionario». Es innegable que, en su «reparto de veinte actores en el espacio de tres horas», Shakespeare consiguió retratar a la humanidad de un modo que «ningún grupo de veinte personas reales lograría reflejar en el intervalo de tres horas».

¿Cómo lo hizo? La única explicación que encontraba Asimov era que el demonio de Darwin había trabajado en secreto favoreciendo a unos genes sobre otros, y que en algún momento había dejado pasar los correctos. Unos nueve meses después, había nacido Shakespeare. Asimov afirmó: «Que yo sepa, soy el único que lo ha llamado así y ha trazado una analogía con el demonio de

Maxwell». Se equivocaba. El término se extendió enseguida entre físicos y biólogos por igual.

PASEOS ALEATORIOS POR WALL STREET

El viejo demonio del azar seguía enfrentándose a los nuevos demonios, cobrando un aspecto justiciero: como su fuerza residía en propagar lo aleatorio, podía impedir que algún privilegiado obtuviera beneficios por los siglos de los siglos. Se encargaba de pasarle a otra persona similar oportunidad. Tratándose del éxito financiero, el azar desempeña un papel importante, y tal vez el talento de los ricos no sea más que pura suerte.

El término «demonio del azar» llegó a la teoría económica para describir las incertidumbres estadísticas en las fluctuaciones del precio accionario. El economista Maurice Kendall introdujo el vocablo en un artículo pionero en el que detallaba la acción de ese demonio en los mercados financieros. El economista y nobel Paul Samuelson habló del furor que causó la palabra cuando apareció en 1953: «Los economistas que participaron en la discusión del artículo de Kendall estaban indignados. Ese nihilismo parecía dirigirse al corazón mismo de la ciencia económica».

Kendall intentó predecir el patrón futuro de las acciones examinando el camino que ya habían recorrido. De conseguirlo, ganaría mucho dinero. Las investigaciones de Kendall sobre el demonio del azar revolucionaron la concepción común de la distribución de la riqueza y del talento en la sociedad: «La mayoría ya ha aceptado que los cambios en el precio de las acciones ordinarias y los futuros de materias primas fluctúan de forma más o menos aleatoria, casi como los dígitos de una tabla de números aleatorios o los patrones de signos algebraicos, como los resultados de cara y cruz al lanzar una moneda». Muchos no se llenaban los bolsillos porque estuvieran haciendo apuestas inteligentes; simplemente se beneficiaban de las tendencias positivas a largo plazo. Kendall utilizó el primer ordenador programable de Reino Unido, el ACE electrónico del Laboratorio Nacional de Física, para hacer más cálculos sobre el mercado de valores de los que nadie había hecho jamás. Su examen de las fluctuaciones en el precio del trigo en la bolsa de Chicago durante cincuenta

años demostró que el movimiento de las acciones era casi siempre aleatorio.

Kendall llegó a la conclusión de que era imposible obtener beneficios siguiendo solo esas fluctuaciones: «Es imposible predecir el precio de una semana a otra a partir de la propia serie». Insistió en el error total de muchos especuladores, agentes de bolsa y economistas que creían que las fluctuaciones de los precios se debían a resultados anteriores. La mayor parte de los cambios al alza o a la baja parecían aleatorios, sin ton ni son:

La serie parece «errante», casi como si una vez a la semana el demonio del azar extrajera un número aleatorio de una población simétrica de dispersión fija y lo sumara al precio actual para determinar el de la semana siguiente.

Asombrado, el público observó cómo Kendall intentaba desentrañar las tendencias a largo plazo de las fluctuaciones aleatorias a corto plazo. Un profesor que estuvo en la presentación de Kendall en la Royal Statistical Society dijo: «[A los economistas], se les ha dicho que tengan cuidado con un temible demonio —la correlación serial— y que recurran a los estadísticos para que les quiten el diablo de encima». Pero, una vez supieron lo que los estadísticos habían descubierto, se quedaron estupefactos: «Parece que cuanto más trabajan los estadísticos en expulsar demonios, más expulsan todo lo demás, incluido lo que quieren los economistas». Lo que los economistas aprendieron de Kendall acabó sumándose a la «hipótesis del mercado eficiente», que sustentaría las tesis de los economistas sobre los mercados financieros durante el resto del siglo.

PAUL SAMUELSON

Desde que acabó la Segunda Guerra Mundial hasta finales de siglo, el economista Paul A. Samuelson y su influyente camarilla estudiaron sus posibles acciones. Entre la pandilla de Samuelson, el economista Nicholas Georgescu-Roegen destacó por reflexionar sobre el empobrecimiento, la escasez, la desigualdad y la salud del planeta. En los años sesenta, un artículo de Samuelson

sobre el movimiento browniano empezó a circular entre un selecto círculo de economistas. Samuelson había descubierto que, matemáticamente, el reto de predecir los precios de las acciones era parecido al que abordaban los físicos que intentaban determinar la trayectoria de las partículas del movimiento browniano y las trayectorias de los aviones de guerra. Esas trayectorias eran tan difíciles de seguir que solo podían describirse con métodos matemáticos no lineales, desarrollados a finales del siglo xix por Louis Bachelier y otros científicos.

Las investigaciones de Samuelson y otros sobre las fluctuaciones aleatorias de la bolsa se democratizaron con *Un paseo aleatorio por Wall Street*, de Burton Malkiel. Este famoso libro afirmaba que «un mono con los ojos vendados que lanzara dardos al suplemento financiero de un periódico» para elegir qué acciones comprar y vender obtendría mejores resultados que las carteras del grueso de los analistas. Profundizando sobre la investigación de Samuelson, Malkiel señalaba: «La original e ilustrativa analogía del paseo aleatorio evocaba a un hombre borracho que se tambaleaba por un campo vacío». Malkiel reiteraba que la mayoría de las acciones fluctuaban de forma muy parecida a las partículas sin rumbo o a los borrachos, haciendo imposible cualquier predicción matemática de su siguiente paso. Los «analistas con trajes de rayas» no lo harían mejor que los «simios que llevan el culo al aire». El economista Eugene Fama profundizó en estas ideas en su famoso artículo «Paseos aleatorios en los precios accionariales», en el que argumentó que la única manera de los analistas para vencer a los mercados era la que el demonio de Maxwell usaba para vencer a la entropía: con información nueva y todavía no descartada: «Si el analista no tiene ni mejores pistas ni nuevas informaciones, más vale que se olvide del análisis fundamental y elija los valores por algún proceso de selección aleatoria». La ciencia del demonio de Maxwell decía a los economistas que los noise traders podían ser necesarios para la eficiencia del mercado, pero que era imposible que obtuvieran beneficios a largo plazo. Sin embargo, de alguna forma, en algún lugar, alguien vencía todos los pronósticos.

Samuelson, a quien muchos compañeros consideraban una de las personas más listas del mundo, quedó bastante prendado del demonio del azar de Kendall. En los años siguientes lo comparó con el demonio de Maxwell. El economista se dedicó a estudiar cómo se enriquecía la gente y en qué medida su éxito se debía a las circunstancias, al cerebro, al talento, a la suerte o a la información: «No es fácil hacerse rico en Las Vegas, en Churchill Downs o en la sucursal local de Merrill Lynch». ¿Quién vencía los pronósticos? La pregunta le obsesionaba. Para encontrar la respuesta, primero tuvo que «abandonar la autopista principal» de su

disciplina económica y explorar más a fondo «la imagen de James Clerk Maxwell de un demonio que engaña a la segunda ley de la termodinámica».

Samuelson había estudiado suficiente física para saber quién podía gozar de una ventaja consistente en los mercados financieros y por qué: «Cualquier subconjunto del mercado que tenga un mejor conocimiento ex ante del proceso estocástico que seguirán las acciones está, en efecto, poseído por un “demonio de Maxwell” que le dice cómo obtener plusvalías echando una buena ojeada a los informes del suplemento financiero de mañana». Tras estudiar la ciencia sobre la criatura, Samuelson llegó a la conclusión de que ningún demonio de Maxwell podía operar indefinidamente sin disponer de información privilegiada. Pero, por sólida que fuera su conclusión, no significaba que hubiera gente con las mismas cualidades del demonio de Maxwell: «Ni el cielo ni la segunda ley de la termodinámica dictaminan que un pequeño grupo de inversores inteligentes e informados no puedan lograr sistemáticamente que su cartera obtenga mayores ganancias con menores variabilidades». De hecho, Morgan Bank y T. Rowe Price estaban haciendo justo eso. «Cualquier jeque con mil millones de dólares» podía imitar su estrategia. Aunque esos efectos del demonio de Maxwell se disipaban fuera de su recipiente, esas ventajas eran excepcionales cuando se consideraba el mercado en su conjunto.

Desde su despacho en el MIT, Samuelson tenía una vista privilegiada sobre las últimas investigaciones matemáticas y técnicas computacionales: «Érase una vez un mundo de inversión. Ahora hay dos mundos». Los «académicos, con sus procesos matemáticos estocásticos», competían con los vendedores de acciones y bonos de Wall Street. Los dos mundos seguían «estando a años luz: tan lejos como Nueva York de Cambridge o, exagerando un poco, tan lejos como la Harvard Business School de Harvard Yard, separados por el anchísimo río Charles».

Con setenta y cuatro años, Samuelson seguía atento a las últimas investigaciones cuando, de repente, las principales publicaciones anunciaron que una nueva versión del demonio de Maxwell podía extraer trabajo «solo esperando raras fluctuaciones térmicas». Quizá las nuevas investigaciones de la física pudieran explicar esas fuerzas poco conocidas de la economía que él había pasado por alto. En cuanto apareció la noticia del descubrimiento en *Nature*, *New Scientist* y *Scientific American*, Samuelson reaccionó. Escribió una carta al director de *Nature* explicando que el demonio de Maxwell, tanto en esa encarnación como en la anterior, no era más que un «capricho ficticio» fabricado para hacer que la

gente pensara «en clave de mecánica estadística». Cuando le pidieron que valorara si el demonio podía infringir la segunda ley, Samuelson contestó: «La respuesta es no». La física en la que Samuelson basaba su teoría económica seguía viva, aunque pendía de un hilo cada vez más tenue.

A principios del nuevo milenio, la economía seguía mostrando indicios de acciones demoníacas, algunas de las cuales desafiaban las explicaciones. Poco antes de morir, Samuelson retomó el tema de los demonios. Para entonces, había vivido los estragos del martes negro, había estudiado las crisis energéticas del petróleo y había presenciado el lunes negro, el colapso de Long-Term Capital Management y el estallido de la burbuja de las puntocom. La economía había crecido, pero también lo había hecho la brecha entre las élites adineradas y el resto. Había visto más que suficiente para aceptar la noción de que algunos seres de este mundo actuaban igual que el demonio de Maxwell.

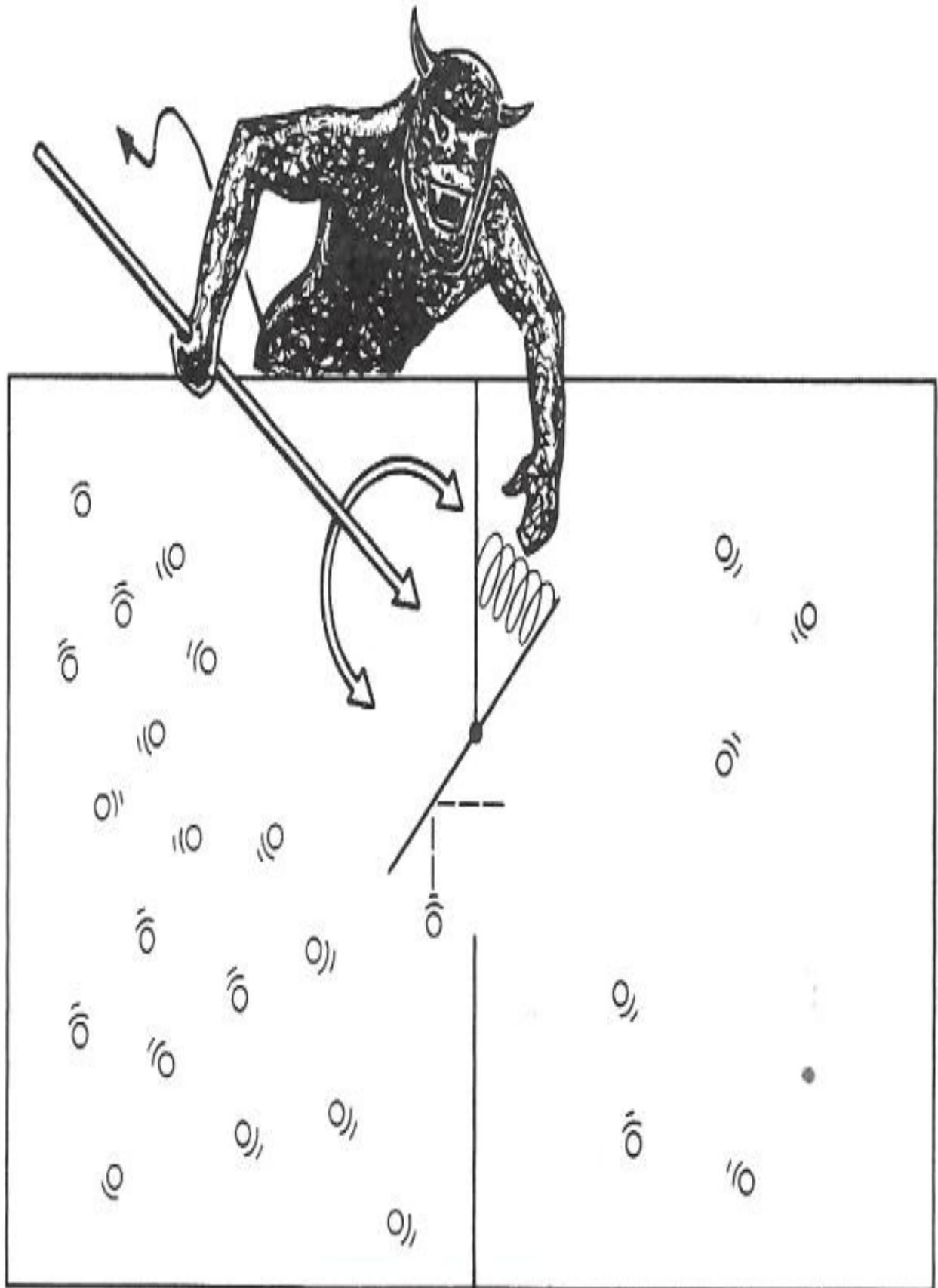


FIGURA 16. Paul A. Samuelson et al., «Scientific Correspondence: The Law Beats Maxwell's Demon,» *Nature* 347, n.o 6288 (6 de septiembre de 1990): 24. Reimpreso con el permiso de Springer Nature.

Según Samuelson, «algunas mentes muy raras sí tienen el talento especial necesario para lograr una buena media de bateo a largo plazo. Aunque no pueda demostrarlo, creo que se debe en gran medida a que el gran capital descubre antes (¡y legalmente!) información más relevante para el futuro». ¿Quiénes eran esos seres privilegiados, esos genios de las finanzas que desafiaban las leyes básicas de la economía y las fuerzas de la naturaleza tendentes al equilibrio? «Las grandes universidades, fundaciones y fortunas familiares millonarias superan [sistemáticamente] a los noise traders y a los tesoreros de las pequeñas universidades». Las personas que elegían valores con una rentabilidad mejor que la media de la bolsa recordaban a los demonios de Maxwell. Esas personas tenían una extraña habilidad para destilar información «relevante para el futuro» escondida entre la ingente baraúnda de datos públicos y no procesados. Su ventaja era completamente legal, ya que no se basaba en información privilegiada u obtenida de forma ilícita. Bromeando, Samuelson los comparaba con demonios: «Los que disponen previamente de información correcta y aún no refutada poseen un demonio de Maxwell capaz de desafiar la segunda ley de la termodinámica». Tal vez Samuelson hablara medio en broma, pero no del todo. Se acercaba al final de su carrera y de su vida sin haber podido dar con una explicación mejor. La existencia de demonios capaces de desafiar la ley de la termodinámica le había parecido una farsa, pero el hecho de que algunos sectores de la población se enriquecieran constantemente mientras otros se empobrecían distaba mucho de ser cómico.

El artículo de Samuelson «Asimetría temporal microscópica del demonio de Maxwell», de 1985, admitía con humildad lo que los economistas aún no acertaban a explicar. Para entonces, Samuelson había estudiado el demonio de Maxwell con tanto detalle que le interesaba incluso su forma y figura; de su aspecto, llegó a observar que «aparentemente el demonio era varón». Describió al demonio como un ser que «podía hacer con bastante rapidez lo que la casualidad solo puede lograr en una infinidad de tiempo». Una forma de entender el demonio de Maxwell era imaginarlo como un dispositivo hipotético

para ver la historia del mundo como si fuera una película: «Por así decirlo, el demonio acelera para que los principiantes vean en una hora de conferencia lo que la naturaleza solo podría mostrar a un estudiante en miles de millones de años». Pero el final parecía cambiar a medida que avanzaba el metraje: «En lugar de acelerar la película de la naturaleza o parafrasear con fidelidad su contenido, el drama del demonio ofrece una historia alternativa».

Samuelson concluyó: «Sea cual sea su género, el demonio de Maxwell resulta una pista falsa». En gran medida, sus efectos en el mundo macroscópico se veían limitados por su dependencia de la información. Para reflejar mejor su talento, Samuelson adaptó un verso archiconocido del soliloquio de Macbeth: «El demonio es un cuento contado por un genio lleno de ruido y furia, pero que no significa gran cosa». En la reformulación de Samuelson, «vida» se sustituía por «demonio» e «idiota», por «genio». Pero, aunque solo fuera un personaje de cuento, no se podía hacer desaparecer al demonio de la literatura científica: «Igual que no se puede recuperar un vaso lleno de agua arrojado al mar, una vez que un diablillo se mete en la literatura científica, nunca se le puede sacar».

EL CRECIMIENTO SIN LÍMITES

Los expertos discrepaban sobre cuestiones fundamentales y sobre la interpretación de los demonios de la física. Los economistas se dividieron en dos bandos. Uno se alimentaba de las promesas de energía limpia, renovable y recursos ilimitados, mientras que el otro se preocupaba por la contaminación, la degradación y la escasez. ¿Qué decían los demonios? ¿Había que ser pesimistas por la devastación u optimistas por la innovación tecnológica?

En 1966, el economista Nicholas Georgescu-Roegen, nacido en Rumanía y formado en Harvard, hizo una audaz afirmación. Declaró que la mayoría de los economistas habían entendido mal «la graciosa fábula» del demonio de Maxwell: «Hemos comprobado mil veces lo nocivo que es importar un evangelio de la física a la economía e interpretarlo de forma más ortodoxa que el consistorio de físicos». A Samuelson le picó la curiosidad. A partir de ese momento, nunca dejó de pensar en los demonios de la física. Samuelson y Georgescu-Roegen habían aprendido de los físicos que el demonio que esquivo

la segunda ley podía crear un beneficio de la nada. También sabían que el demonio solo podía actuar si disponía de información que le indicaba dónde estaban las moléculas. También habían descubierto que esa información era termodinámicamente costosa. Al aplicar esos conocimientos a los mercados y a la economía, llegaron a la conclusión de que la única forma de que un inversor pudiera batir sistemáticamente a la bolsa era contar con información todavía no disponible (o no utilizable) para el resto. Eso sería injusto. Por lo demás, ¿el juego era limpio?

The Entropy Law and the Economic Process [La ley de la entropía y el proceso económico] (1971) de Georgescu-Roegen se publicó pocos años después de Analytical Economics (1966) con prólogo de Samuelson. La obra lanzó a la fama a su autor. El aumento de la desigualdad social urgía a los economistas a entender qué era un mercado justo y una sociedad justa. Las políticas intervencionistas se enfrentaban a las filosofías del laissez-faire, el derrame, la mano invisible y la desregulación.

Georgescu-Roegen fue especialmente crítico con la «manía del crecimiento» predicada por la mayoría de los economistas neoclásicos de la época. Se quejaba de que era insostenible, admitiendo que «la termodinámica también está envuelta en un halo de misterio, pues aún no se ha confirmado si sus leyes son válidas o no para las formas de vida extraterrestres». La cuestión no era irrelevante, ya que «la famosa paradoja del demonio de Maxwell se refiere precisamente a esta cuestión; de ahí que los argumentos que afirman haberla resuelto sean siempre infructuosos». Sin embargo, estas cuestiones sin resolver no justificaban lo que el economista veía como un tecnooptimismo injustificado: «Los avances tecnológicos de nuestra era están sobrevalorados y sobrevendidos, pero no deberían cegarnos» ante la realidad de que los recursos naturales son limitados y nuestro planeta está tensionado. Ese año, la energía solar y la nuclear estaban de moda en los mercados europeos. La mayoría de los economistas seguían soñando con formas cada vez mejores de utilizar y evitar la disipación energética y de desarrollar tecnologías que pudieran hacer lo mismo que el demonio. Georgescu-Roegen seguía sin estar persuadido.

Georgescu-Roegen encontró pruebas de los muchos fallos del demonio «por todas partes»: «en el desgaste», «en el agotamiento de los recursos», «en la contaminación» y «en la oxidación, el desconchado, el estallido y la erosión». La limitación de los recursos era cada vez más difícil de ignorar. Sin la intervención de ese ser, tenía clara una cosa: «Cualquier pieza de armamento o cualquier

coche de dos plazas significa menos comida para los hambrientos de hoy y menos rejas de arado para generaciones futuras como la nuestra, por lejanas que sean». Y concluyó: «Lo que más necesita el mundo es una nueva ética».

El economista Joan Martínez Alier, presidente de la Sociedad Internacional de Economía Ecológica, resumió el debate entre quienes utilizaban el ejemplo del demonio de Maxwell para defender el crecimiento y quienes lo utilizaban para advertir contra la escasez: «La teoría del crecimiento sustentaba —y era sustentada por— la idea de que la situación de los pobres solo podía mejorar si los ricos se volvían más ricos». ¿Por qué había fracasado esa lógica? Martínez Alier elogió a Georgescu-Roegen por haber demostrado que se necesitaban sistemas más radicales de redistribución de la renta «entre ricos y pobres, así como la asignación intergeneracional de recursos escasos y contaminantes. Y, aunque no lo incluyó explícitamente en su análisis, también habló del efecto destructivo de los humanos sobre otras especies». Si se profundizaba en el análisis económico demoníaco inaugurado por esos investigadores, se podría aprender más. Los demonios «antinaturales» podían estar interfiriendo activamente en el flujo de energía, capital, información y humanos en el mundo, creando «restricciones a las migraciones entre América del Sur y del Norte, o entre África del Norte y Europa». «En esas fronteras, se alzan unos demonios de Maxwell “antinaturales”, políticos, que consiguen mantener (a costa de muchas vidas humanas al año) las grandes diferencias en el uso de energía y material per cápita entre territorios adyacentes» sostenía Martínez Alier.

LOS DEMONIOS SOCIALES DE MAXWELL

Otros científicos hablaron sobre la forma en que su trabajo conducía a la innovación y la creación de riqueza. El físico nuclear Alvin Weinberg fue especialmente elocuente al respecto. Señaló que los asesores políticos estaban cada vez más divididos entre «dos puntos de vista opuestos» que dominaban «nuestra percepción del hombre a largo plazo». Por un lado, estaban los «catastrofistas», que creían que los recursos de la Tierra se agotarían pronto y que eso llevaría al colapso de la sociedad, y en el otro bando estaban los «cornucopianos», que confiaban en que la mayoría de las materias primas esenciales eran infinitas: «A medida que la sociedad agote una materia prima,

recurrirá a sustitutos inagotables de menor calidad». Weinberg era un acérrimo miembro del primer grupo. En un ensayo publicado en la *American Economic Review*, admitió que lo que estaba en juego era mucho más que la posibilidad de «reciclar» recursos: «Cuando un ser inteligente clasifica material usado en contenedores separados, disminuye la entropía del material desechado original. Sin embargo, ese demonio macroscópico de Maxwell no cambia apreciablemente la entropía de la mezcla». Para ello habría que impedir que «los materiales útiles se disolvieran como moléculas individuales, que luego podrían dispersarse ampliamente en el terreno o en los océanos». Weinberg creía que las potentes alternativas a los combustibles fósiles estaban a la vuelta de la esquina. Solo había unas pequeñas dificultades prácticas que nos impedían «alcanzar el paraíso tecnológico en la Tierra». El físico nuclear era optimista y creía que no había «ningún escollo técnico insuperable para vivir una vida decente en lugar de una vida terrible».

Weinberg era un experto en energía nuclear del Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Coescribió con Eugene Wigner el primer libro de texto sobre reactores nucleares, presidió la American Nuclear Society, dirigió la Oficina de Investigación y Desarrollo Energéticos y, más tarde, también el Instituto de Análisis Energético de las Universidades Asociadas de Oak Ridge. Sus excelentes credenciales daban credibilidad a sus declaraciones sobre economía. Por no hablar de que fue uno de los primeros científicos en preocuparse por el cambio climático: «¿A qué ritmo de producción energética se derretirán los casquetes polares? ¿El dióxido de carbono o el polvo que arrojamamos a la atmósfera quemando combustibles fósiles amenazarán la estabilidad del sistema meteorológico?», se preguntaba. Las respuestas no eran fáciles. «El problema del efecto global de la producción de energía, como tantos otros problemas medioambientales de largo alcance, es un problema que nos atañe a todos y, por lo tanto, no atañe a nadie».

En una clase magistral que dio en el congreso nacional anual de la Association of Computing Machinery (Nashville, Tennessee, 27 de octubre de 1980), Weinberg dio una presentación subtitulada «Una familia de demonios de Maxwell» en la cual analizó un sinfín de demonios que trabajaban en su mundo. Viniera de donde viniera su energía, ya fuera de reacciones nucleares o de combustibles fósiles, los ordenadores podrían emplearse para usarla de manera más eficiente. Aquel día, se dijo que los microprocesadores eran el mejor ejemplo de «demonios de Maxwell macroscópicos» capaces de conformar un sistema para transformar por completo la sociedad contemporánea. Dirigiéndose

al público, Weinberg afirmó: «No creo que exagere mucho al referirme a estos sistemas de control por microprocesador como demonios de Maxwell macroscópicos». Los «demonios sociales de Maxwell» florecieron cuando las tecnologías del microchip se acoplaron a sistemas eléctricos y mecánicos más antiguos para hacerlos más eficientes y controlar sistemas cada vez más grandes. El físico explicó que «en 1980 se cumplieron ciento nueve años del nacimiento del demonio de Maxwell», subrayando el significado geopolítico del cumpleaños.

General Motors no tardó en embutir microprocesadores en sus coches para ajustar la relación aire-combustible en los carburadores y optimizar la combustión. ¿Qué más se podía hacer? Uno de los ejemplos favoritos de Weinberg era el nuevo ordenador de gestión de vuelos de Trans World Airlines, que consiguió reducir el consumo de combustible en un par de puntos porcentuales simplemente optimizando las rutas y recortando el margen de seguridad entre trayectorias. En la cúspide de esos sistemas demoníacos interrelacionados estaban los demonios sociales de Maxwell, que actuaban directamente sobre la sociedad incitando a la gente a actuar de maneras determinadas. Esos demonios provocaban cambios políticos e incluso podían limitar el consumo de combustible y frenar la contaminación: «Transmiten señales a innumerables usuarios recomendándoles comprar coches que consuman menos combustible». Enviaban señales hasta a Detroit: «Diseñad un coche que consuma poca gasolina». El vocerío de los demonios sociales afectó al diseño y uso de las tecnologías, a la industria del transporte y, en última instancia, a la economía mundial. Weinberg recalcó la importancia de los «diecisiete millones de barriles de petróleo que pasaban a diario por el estrecho de Ormuz antes de la guerra entre Irán e Irak» y las consecuencias de perder ese suministro. Las últimas ideas que Weinberg extrajo de su análisis del demonio social de Maxwell aludían a la necesidad de «sustituir el petróleo por electricidad generada con energía nuclear o carbón».

Al cabo de un año, los fanáticos de la energía nuclear y los economistas del crecimiento tecnooptimistas se quedaron de una pieza cuando «la palabra “Chernóbil” entró por las bravas en el vocabulario mundial». Era difícil sacar en claro lo sucedido en la explosión y el incendio en la central nuclear soviética, pero la gravedad de la tragedia era cada día más patente. Weinberg, un entusiasta de esa tecnología, respondió con un artículo titulado «Reflexión sobre Chernóbil de un defensor de la energía nuclear». Weinberg seguía creyendo que era un «sistema energético esencialmente inagotable que confería autarquía energética a

su usuario porque su necesidad de uranio bruto era minúscula». En muchas publicaciones describió con optimismo el «impacto positivo de la energía nuclear en el medioambiente, al menos en comparación con los combustibles fósiles». Por esa razón creía que los reactores reproductores seguirían «siendo siempre el santo grial de la energía nuclear».

Tras la catástrofe de Chernóbil, Weinberg empezó a ser más consciente de la importancia de la conferencia que había dado ante la AAAS más de una década antes. Aquel día, había dicho a sus oyentes: «Los nucleares hemos hecho un trato fáustico con la sociedad». El intercambio era necesario para obtener una «fuente de energía mágica». ¿Cuáles habían sido las consecuencias? A la luz del desastre, escribió: «Han pasado quince años desde que hablé por primera vez de la energía nuclear como un trato fáustico». Cinco años más tarde, repetiría la misma historia: «Han pasado veinte años desde que, en una reunión de la AAAS en Filadelfia, me referí a la energía nuclear como un “trato fáustico”».

VIDA SOCIAL

Los antropólogos empezaron a sentir curiosidad por los demonios de la ciencia. ¿Servirían para explicar por qué las culturas «científicas» eran diferentes de las «atrasadas»? ¿Tal vez las primeras empleaban mejor los demonios? Bruno Latour, un joven estudiante de teología reconvertido en etnógrafo antes de acabar dedicándose a la filosofía, se dio cuenta de que los científicos actuaban como demonios de Maxwell en sus laboratorios. En *La vida en el laboratorio*, publicado en 1979, Latour sostenía que un laboratorio era un recinto similar al «horno» en el que operaban los demonios. En lugar de acumular moléculas de energía, el científico acumulaba información y conocimientos. Para él, un laboratorio científico bien organizado era una trampa «para cualquier demonio de Maxwell competente que deseara disminuir el desorden».

Cuando el antropólogo francés entró en uno de los mejores y más vanguardistas laboratorios de la época, el Instituto Salk de La Jolla (California), descubrió a científicos trabajando como demonios. El Instituto Salk había acogido a algunos de los científicos más productivos del siglo, como Szilárd y Monod. Entre 1975 y 1977, Latour «siguió a los científicos» del prestigioso laboratorio de Torrey

Pines Mesa para describir de pe a pa lo que hacían durante el día. Latour llegó a la conclusión de que, en esencia, el trabajo real de los científicos consistía en etiquetar y clasificar, clasificar y etiquetar. «La separación de los hechos del ruido de fondo» solía recibir una generosa recompensa, «a menudo anunciada con gran pompa en los premios Nobel». En otra publicación, concluía que las actividades del demonio de Maxwell eran responsables de que se acumularan conocimientos de alta tecnología en ciertos lugares y no en otros. Aseguraba que esos demonios habían fomentado la desigualdad global creando brechas entre los países que tenían culturas científicas prósperas y los que no.

Uno de los pensadores franceses más reputados, Michel Serres, detalló las facultades del demonio de Maxwell a lo largo de la historia en su libro *El parásito*. Serres se remontaba hasta la antigua Grecia para encontrar el origen de la criatura de Maxwell: «Hermes es el dios de la encrucijada y el dios del que Maxwell hizo un demonio». «El demonio de Maxwell controla los permisos y actúa como un aduanero», primero para las moléculas, pero luego afectando al mundo en general creando grandes desequilibrios en todo el universo. Al igual que su predecesor en la mitología griega, esta fuerza del desequilibrio solía situarse en encrucijadas o puertas (incluso dentro de los semiconductores), creando desigualdades de poder de modo que «un puñado de personas consigue esclavizar a la mayoría; casi a toda la humanidad». Tenía las llaves del cielo en la tierra. Serres decía que era importante reflexionar sobre los efectos del demonio de Maxwell a gran escala —ya sea estableciendo flujos unidireccionales, equilibrios asimétricos o puntos de acceso irreversibles— en la posición de todas las cosas y personas, desde el poderoso político hasta la humilde hormiga. Una simple inversión podía convertir al depredador en presa y al rey, en súbdito: «Trabajar es clasificar. El demonio de Maxwell es inevitable». Era un marco curioso para entender bien la sociedad y la civilización.

Para entonces, incluso el eminente sociólogo francés Pierre Bourdieu utilizaba la analogía del demonio de Maxwell para explicar las desigualdades sociales y las injusticias de la sociedad. En su teoría de la acción, la culminación de su obra, empezó explicando la correlación entre el nivel educativo y las diferencias de clase. Por mucho que los profesores intentaran dar a los alumnos desfavorecidos herramientas para ascender socialmente, había fuerzas opuestas que parecían impedirselo: «El sistema educativo actúa como el demonio de Maxwell. Mantiene el orden preexistente, es decir, las diferencias entre alumnos con un volumen desigual de capital cultural». La forma en que operaba el demonio dentro de las instituciones era importante para entender cómo funcionaban las

sociedades: «Para ser concretos, a través de una serie de operaciones de selección, separa a quienes han heredado capital cultural de los que carecen de él. [De este modo], tiende a mantener las diferencias sociales preexistentes». Y había una multitud de esos demonios: «Las acciones de miles de diminutos demonios de Maxwell, orquestadas con más o menos vileza, tienden a reproducir ese orden sin saberlo ni quererlo». Bourdieu advirtió contra los que atribuían voluntad a esos demonios y los consideraban ajenos y apartados de la sociedad. Según él, eso podía llevarnos a creer en conspiraciones.

Según Bourdieu, «la metáfora del demonio es peligrosa porque alimenta el fantasma de la conspiración, un riesgo perenne para el pensamiento crítico. Es la idea de que una voluntad maliciosa es responsable de todo lo que ocurre, para bien o para mal, en el mundo social». Si Bourdieu eligió ese término, fue solo por su deseo de «describir un mecanismo» para esos procesos. Los que caían en el lado malo de los demonios experimentaban la vida como una «máquina infernal». Sus efectos eran «como un trágico conjunto de engranajes que vive al margen y por encima de cualquier agente, pues, en cierto modo, cada uno de los agentes está obligado a participar, a existir, en un juego que le impone inmensos esfuerzos e inmensos sacrificios». Por eso, mucha gente hablaba del «infierno del éxito».

LOS DEMONIOS EN SILICON VALLEY

El uso del demonio de Maxwell para explicar todo tipo de desequilibrios siguió siendo habitual en los círculos especializados de todas las disciplinas. Aumentaron los avistamientos dentro de laboratorios, instituciones de enseñanza superior, ordenadores, cerebros y cuerpos. En todas partes podían encontrarse demonios instalados en fronteras y encrucijadas; a veces interceptaban individuos, materiales, mercancías o mensajes, y otras veces, los dejaban pasar.

Como era habitual en ellos, los demonios ofrecían oportunidades. Entre los nuevos aficionados del demonio de Maxwell, se encontraba Jack Dorsey, que pronto sería conocido como uno de los fundadores de Twitter. Conocido por su nom de plum cibernético «JakDaemon», el joven entrepreneur explicó por qué se tatuó «0daemon!?» en su brazo izquierdo con grandes letras negras:

demonio: un ángel de fondo. en términos informáticos, un proceso en segundo plano. vivo en el fondo. me esfuerzo por estar detrás de la cortina con esa influencia sutil. ahí es donde siempre me he encontrado. me gusta profundizar. descubrir cómo funcionan las cosas debajo de las sábanas y los pensamientos. esto también apunta a la teoría del caos y al efecto mariposa.

Otro de los aficionados de los poderes del demonio de Maxwell en la nueva economía digital fue Jaron Lanier, un investigador interdisciplinar de Microsoft, la empresa de software líder en el mercado de los sistemas operativos. Lanier subrayó el parecido en la estrategia operativa del sector de la banca, de la tecnología y de los seguros: «Las finanzas, igual que las compañías de internet y todo tipo de personas que utilizan ordenadores gigantes, intentan convertirse en los demonios de Maxwell de la red de información». ¿Quién podía culparles? Las compañías de seguros también lo hacían: «Con la gran computación y la capacidad de calcular enormes correlaciones con datos colosales, [la tentación] se vuelve irresistible. Y cuando empiezas a decir: “Voy a...”, eres como el demonio de Maxwell con la puertecita: “Voy a dejar pasar por la puerta a quien sea barato de asegurar. La gente que es cara de asegurar tiene que irse por el otro lado hasta que haya creado este sistema perfecto que estadísticamente garantiza la alta rentabilidad”». Como muchos economistas antes que él, Lanier recurrió a la termodinámica para explicar las consecuencias generales de esa clase de prácticas empresariales: «Has creado para ti un pequeño negocio perfecto, pero, en esencia, has externalizado todo el riesgo a la sociedad». En su libro *Who Owns the Future?* [¿Quién es el dueño del futuro?] Lanier fue explícito. “Hacemos todo lo posible para implementar el demonio de Maxwell cada vez que manipulamos la realidad con nuestras tecnologías, pero nunca podremos hacerlo a la perfección; Ciertamente no podemos adelantarnos al juego ... Todos los aparatos de aire acondicionado de una ciudad emiten calor que hace que la ciudad sea más calurosa en general. Si bien puedes implementar lo que parece ser el demonio de Maxwell si no miras demasiado lejos o demasiado cerca, en el panorama general siempre pierdes más de lo que ganas.” Desde la perspectiva individual, poco importa la general.

Quedar del lado de los ganadores, es lo que más importa en un mundo dividido. Amazon, la multinacional de comercio electrónico más grande del mundo,

también tomó decisiones deliberadas para imitar las magistrales tácticas de la criatura de Maxwell. El fundador y accionista mayoritario de Amazon, Jeffrey Bezos, anunció en su carta a los accionistas de 2017 que la empresa había alcanzado los cien mil millones de dólares en ventas anuales más deprisa que cualquier otra compañía de la historia. Explicó que una de las razones del éxito de Amazon había sido su estrategia en la toma de decisiones: «Algunas decisiones son trascendentales e irreversibles, o casi irreversibles (puertas de un solo sentido), y hay que tomarlas con meticulosidad, esmero y lentitud, tras deliberarlo y consultarlo mucho». Bezos explicó por qué le ayudaba pensar en términos de puertas de un solo sentido: «Si atraviesas esa puerta y no te gusta lo que ves al otro lado, no puedes volver a donde estabas antes». En las sociedades de alta tecnología del siglo xxi, la habilidad de guardar el paso de una realidad a otra seguía antiguamente atribuida a una figura mítica. Pese a que la ciencia ha ido eliminando los vestigios de las fuerzas oscuras de la religión, la superstición y la ideología, los demonios han seguido reproduciéndose, sobreviviendo a la era de la razón y apoltronándose en ella.

CONCLUSIÓN

LA AUDACIA DE NUESTRA IMAGINACIÓN

La tinta de los trabajos científicos sobre los demonios aún no se ha secado. En los laboratorios más avanzados del mundo se sigue utilizando el término «demonio» para intentar comprender algo que todavía no se entiende del todo. Al principio, su función básica es exploratoria, pero eso acaba cambiando. Al estudiar a estas criaturas se crean nuevos experimentos y tecnologías que revelan nuevos aspectos del universo. Si nos atrevemos a mirar directamente a sus ojos y seguir sus hazañas y fechorías, podemos aprender mucho de ellos.

Descripciones de nuestro universo que no incluyen el inframundo están medio vacías. Los personajes siguen activos mucho después de perder su utilidad inicial. A medida que los científicos e ingenieros construyen nuevos demonios y mejoran los existentes, las tecnologías que surgen de su trabajo pueblan nuestro mundo. Hoy no solo tenemos que vivir rodeados de tecnologías modeladas según los demonios de nuestra imaginación —desde la realidad virtual a las bombas, pasando por la inteligencia artificial—, sino que tenemos que convivir con los demonios que se utilizan para entender el funcionamiento de nuestro propio cerebro.

Los profesionales de este arte suelen recibir premios y valiosas patentes. Los científicos legan sus conocimientos sobre los demonios de generación en generación. Los jóvenes asumen el reto de investigar a los demonios de sus mentores, trabajando con más celeridad de quienes plantearon inicialmente esas especulaciones e indagando con avidez en el saber pertinente antes de aventurarse en el reto de añadir un enésimo demonio nuevo a una lista cada vez más larga. Algunos científicos dedican toda su vida en comprender a una sola criatura o a un pequeño grupo, intercambiando información sobre ellos en círculos selectos. Cuando un demonio lleva el apellido de un científico y se crean programas de investigación sobre sus patronímicos, la memoria de ese valioso miembro de la profesión perdura incluso después de su muerte.

En algunos de nuestros instantes más oscuros, temimos a los demonios. Hubo violentos exorcismos motivados por intereses políticos, por la avaricia, la intolerancia, la ignorancia y la superstición, que dieron lugar a ejecuciones y persecuciones sangrientas. Pero también se ha invocado a los demonios en los mejores momentos de nuestra civilización. Al recurrir a ellos, descubrimos que la causalidad no siempre se mantiene a nivel subatómico, que hay límites a la velocidad de transmisión de mensajes, que no podemos tener máquinas de movimiento perpetuo, que los sistemas vivos también gastan energía, y muchas cosas más. Estos seres nos han ayudado a saber cómo combatir la degradación invirtiendo la entropía a nivel local y nos han enseñado a producir trabajo con el mínimo esfuerzo posible. Nos han ayudado a estudiar el explosivo interior del átomo, los lugares más recónditos del universo y los territorios intermedios amenazados por especies invasoras y acosados por catástrofes que pueden golpear cuando uno menos se lo espera. Los demonios nos han permitido controlar nuestro futuro y conocer mejor nuestro pasado. También nos han enseñado a escapar de nuestra realidad y eludir nuestras responsabilidades. Muchos de nuestros complejos sistemas tecnológicos siguen el modelo de criaturas relativamente simples.

Los demonios no son solo seres espurios que viven en la mente débil del supersticioso. Tampoco son meros delirios psicológicos o ficciones heurísticas, ni simples comadronas que ayudan a que nuevos conocimientos salgan a la luz. Su estatus dentro de la naturaleza es similar al de muchas otras herramientas del pensamiento que los filósofos consideran totalmente respetables, como los conceptos, los números, las clases y las categorías. A diferencia de estas entidades abstractas o formales, los demonios son divertidos y concretos. Tienen nombres, propensiones y personalidades. Reflejan nuestros miedos y deseos, y nos tientan a tomar retos y a inventar tecnologías más osadas. A menudo estas resultan inverosímiles porque fueron inspiradas por criaturas inverosímiles.

ÉTICA: LOS LOCOS Y LOS SABIOS

En las sociedades de alta tecnología, frecuentemente actuamos en la vida diaria como los científicos actúan en sus laboratorios. Anotamos la hora, medimos la temperatura, leemos datos, y hacemos cuentas con números e indicaciones que

nos ayudan a vivir socialmente y sobrevivir materialmente. Prácticas tan sencillas y comunes donde interactuamos con un instrumento, como saber cuánto tiempo ha pasado o cuánta distancia se ha recorrido, son comparables a prácticas sociales comunes como saludar con un apretón de manos. Son tan integrales y transparentes que no difieren de muchas de las demás acciones fáticas y automáticas que caracterizan buena parte de nuestra vida cotidiana moderna. Funcionan como un lubricante para que los engranajes de la modernidad tecnocientífica giren. Su éxito reside en que rara vez pensamos en ellas de manera profunda, ya que son simples hábitos que necesitamos para funcionar.

Estas acciones no permiten deliberaciones morales, sino que facilitan nuestras interacciones al liberarnos de la anquilosante tarea de tener que considerarlo todo en términos éticos. No necesitamos distinguir lo justo de lo injusto cuando realizamos la mayoría de las actividades científicas, del mismo modo que no necesitamos hacerlo durante la mayoría de los actos regulares y automáticos de nuestra vida. Así afianzamos la división entre lo verdadero y lo bueno, lo físico de lo moral. Conservar una división entre el mundo material y el moral tiene muchas ventajas, permitiéndonos encontrar soluciones basadas en la verdad o la mentira, y no en el bien o el mal.

Puede ser tentador creer que toda la ciencia funciona así: mides algo y demuestras o refutas un hecho. Puede ser tentador pensar que las preguntas más complicadas de la ciencia tengan respuestas basadas en verdades trascendentales que nos lleven a un sí o no. Pero la tarea es mucho más complicada. Para generar nuevos conocimientos, necesitamos mucho más que respuestas fijas a preguntas preconcebidas. La ciencia no avanza si pensamos en blanco y negro, ni se inmuta con lecciones conocidas. Las verdades indudables no la mueven ni un ápice.

El conocimiento surge del comercio directo con lo irreal. A medio camino entre lo real y lo simbólico, la imaginación y la innovación se encuentran, se saludan e intercambian prendas, la realidad y la ficción se travisten, y la fantasía se solidifica. Durante este proceso se crean nuevos instrumentos que cambian nuestra realidad mensurable.

La separación entre las verdades científicas y las éticas ha tenido otra consecuencia: la ética ha pasado a ser un acólito de la ciencia, y eso en el mejor de los casos. La lista de desafíos éticos aumenta porque nuestra soberanía

respecto a la tecnología es limitada. Su control nos sobrepasa. Las tecnologías benignas pueden volverse peligrosas.

Cuando empiezan los debates sobre su uso, su regulación y su ética, ya es demasiado tarde. El arma ya está cargada. El barco zarpa antes de salir del dique y tocar el agua. Una vez que las ruedas se han puesto en movimiento, lo único que podemos hacer es pisar el freno. Las nuevas tecnologías entran en el mundo y nos afectan de inmediato, para bien y para mal. Aunque cuando se convierten en tecnología las destrezas de los demonios imaginarios no satisfacen del todo nuestros deseos, a menudo superan las expectativas en otros sentidos sorprendentes.

¿Cómo podemos obtener los beneficios de la ciencia y la tecnología sin asumir sus riesgos? ¿Cómo salimos del círculo vicioso de crear tecnologías mejores que a la vez pueden ser nocivas? La política reguladora está limitada por una estrecha noción de control ex post facto que nos deja muy pocas palancas para dirigir nuestro futuro en la dirección deseada. Si aceptamos que la responsabilidad empieza con nuestra imaginación, podemos empezar a rendir cuentas antes de que el reloj marque la medianoche.

A pesar de nuestros mejores instintos morales, el desarrollo de la ciencia y la tecnología lleva la impronta de nuestros sueños, miedos y deseos primarios. La persistencia de los debates sobre los demonios en algunas de las obras más técnicas de nuestro tiempo revela que el proyecto de distinguir entre la verdad y la falsedad sigue apelando de manera profunda y fundamental a la diferenciación entre la locura y la sabiduría. Buscamos el conocimiento para alcanzar la gloria, para obtener provecho y para beneficiar a unos pocos o a todos. Como lo hemos hecho siempre a lo largo de la historia.

CORDÓN SANITARIO

Se han escrito incontables libros sobre el despertar de la razón y el declive de la magia y la superstición, dos factores que forjaron el mundo moderno que hoy conocemos. La mayoría de los relatos sitúan el comienzo de este cambio a mediados del siglo xvii. Desde entonces, los investigadores han seguido trazando una firme línea divisoria —un cordón sanitario— entre la cultura medieval, los

supuestos tiempos oscuros, y el mundo moderno o ilustrado. Los grandes historiadores han demostrado que el «discreto adiós de los demonios de la teología» puso a la ciencia en el camino que hoy conocemos. Es por eso que ahora solemos asignarlos a los ámbitos espiritual, artístico o psicológico.

La explicación de este cambio tan abrupto ha sido un reto para los historiadores, que tienen que ofrecer interpretaciones radicalmente originales de épocas pasadas y tierras extranjeras para justificar creencias que les parecen muy contrarias a la intuición. Los intelectuales siguen escribiendo ríos de tinta para tratar de explicar el supuesto atraso de los pueblos de épocas y territorios remotos. ¿Cómo es posible que tantas culturas del mundo creyeran durante tanto tiempo cosas que ahora consideramos contrarias a los métodos empíricos y científicos racionales?

La persistencia de la categoría del demonio en la ciencia evidencia una anomalía interesante. El término nunca desapareció del vocabulario de las iniciativas que buscaban la verdad, ni siquiera cuando se volvieron seculares y científicas. Más que un cordón sanitario, los demonios modernos revelan que un *liaison pollutant* sigue conectando la cultura moderna con épocas pasadas de un modo que ha fusionado las verdades de antaño con las de hoy. Es imposible trazar una línea divisoria entre la mentalidad moderna y la premoderna porque no existe una línea tan sólida que separe el conocimiento de la imaginación, ni antes ni ahora.

Incluso en sus formas más nuevas y modernas, el conocimiento se basa en grandes y antiguas leyendas. Por eso la ciencia es tan eficaz a la hora de resolver viejos misterios y crear otros nuevos. El mito de la «racionalidad occidental» es muchas cosas, pero es ante todo un mito. Comprender la relación de la ciencia con los mitos puede ayudarnos a ampliar nuestra comprensión de los dos y nos abre la posibilidad de rescatar el mito de la concepción a la que ha sido relegado: como algo perteneciente a «otras» culturas. Los mitos no son «máquinas para suprimir el tiempo» que brindan conocimientos anticuados sobre el mundo, como dijo en una ocasión el destacado antropólogo Claude Lévi-Strauss. Más bien los mitos que subyacen a la ciencia son máquinas para crear el tiempo, tanto para la física como para la vida común.

El deseo de estudiar el mundo y comprender cómo podemos prosperar sobrepasa la ciencia y las sociedades modernas. No puede circunscribirse a ningún periodo histórico ni territorio. La persistencia de herramientas narrativas tradicionales en la cúspide de la ciencia no demuestra nuestro inherente atavismo, ni nuestra

incapacidad para ser modernos. Al contrario, es una prueba de que nuestra lucha por distinguir entre lo verdadero y lo falso ha sido mucho más persistente a través de la historia.

Más vale malo (demonio) conocido que bueno por conocer, dice el refrán. ¿Debemos mantener el rumbo? Unos demonios guían la investigación y la innovación y otros nos dividen. La raíz de la palabra diablo viene de división. Cuando hablamos de problemas relacionados con la economía mundial y la salud de nuestro planeta, muchas veces invocamos a la ciencia para defender soluciones contradictorias. Al intentar dilucidar quién lleva razón en estos debates, estos pueden ser muy productivos. Instigan a los investigadores a crear nuevos experimentos y tecnologías e impulsa a los científicos a pulir sus argumentos. Obligan a mejorar teorías, ajustar planes y revisar y replantear propuestas. El desacuerdo sobre lo que es real y lo que no es una fuente generosa. Si la necesidad es la madre de la invención, el desacuerdo es el padre del descubrimiento.

Y, aunque dividen, si asumimos el papel del *advocatus diaboli* frente a ellos, pueden ayudarnos a aprender más sobre la ciencia, la tecnología, la naturaleza y la cultura y sobre los límites del propio conocimiento moderno. Los homínidos más inteligentes y racionales de entre nosotros — brillantes científicos e ingenieros de los últimos siglos— no ostentan un monopolio absoluto sobre el conocimiento ni sus consecuencias. El *Homo faber* no puede dominar totalmente sus herramientas, ni el *Homo sapiens* controlar por completo su propia mente. El *Homo imaginor* puede hacer mucho más. A medida que los científicos descubren nuevas leyes y partículas, imaginan otras. Y a medida que imaginan aspectos nuevos de la naturaleza, consiguen ver aún más. ¿Hasta dónde podrá llegar nuestra imaginación? Con nuestra imaginación podemos ponernos en la piel de la naturaleza para entenderla como algo más que un problema por resolver, un territorio que conquistar, o una fuente de la que extraer poder. Los grandes investigadores conquistan lo desconocido rompiendo las fronteras de lo inimaginable. Sus logros requieren toda nuestra atención.

Si la introducción de ciertos seres inexistentes en el proceso de descubrimiento ha sido especialmente fructífera, ¿por qué extirparla de nuestro entendimiento sobre el progreso científico? La ciencia no pierde su envidiable condición como una forma de conocimiento valiosa y única cuando reconocemos sus aspectos místicos y misteriosos. Más bien al contrario, se fortalece al demostrarnos cómo podemos ampliar los límites de la realidad.

EPÍLOGO

CONSIDERACIONES FILOSÓFICAS

Es hora de rendirse, de dejar las cartas sobre la mesa y de aceptar que mi «as» bajo la manga no existe. En cierto sentido, la partida está perdida, pero en otro sentido la he ganado. Casi nada nos importa más que lo imposible, lo desaparecido, o lo que todavía está por aparecer. Lo inexistente atrae a nuestra imaginación como nada más.

En cuanto empezamos a reflexionar sobre la «existencia», es fácil darse cuenta de lo rápido que pasamos de lo existente a reflexionar sobre lo inexistente, y de lo difícil que es trazar una línea divisoria entre ambas. Los objetos realmente existentes desempeñan un pequeño papel en nuestro discurso cotidiano. Las sociedades se organizan en torno a conceptos legales y jurídicos que nunca pueden vincularse a un objeto o referente concreto. También ocupan un papel testimonial en la ciencia. ¿En qué sentido podemos afirmar que existen los números, los colores, las formas, las categorías organizativas y otros útiles del pensamiento? Al recordar y prefigurar, nuestra mente casi nunca considera el mundo como el pequeño círculo de lo estrictamente real. Nuestras emociones, del dolor a la esperanza, van más allá de nuestra realidad inmediata. Lo existente y lo inexistente son opuestos que se parecen. Inestables y ambiguos, dan saltos mortales entre dos polos. Su poder estriba en su variabilidad e inestabilidad.

La transformación de lo imaginario en lo real no es un proceso sencillo, pero tiene una historia que se presta a la narración. Numerosos filósofos se han dedicado a establecer las diferencias exactas entre lo existente, lo inexistente, lo imaginario, lo posible y lo real. Ejemplos típicos de la literatura académica incluyen el mentiroso que dice «ahora miento», los cuadrados redondos, las montañas doradas o la barba de Platón. Para distinguir variedades de la existencia, algunos de los académicos han abogado por introducir en su disciplina a un «cuantificador existencial» para designar los diversos grados de realidad atribuida a cualquier cosa. Los ejemplos usados por los filósofos de la ciencia tienen muy poco que ver con los que preocupan a los científicos. Estos

ejercicios teóricos nos encierran en laberintos sin salida que nos alejan aún más del problema clave.

Lo inexistente no equivale a todo lo que no existe. Solo un puñado de cosas inexistentes han sido de gran utilidad en la historia de la ciencia y la tecnología. La búsqueda de estas, algunas de ellas nombradas «demonios», han caracterizado el desarrollo de la ciencia y tecnología durante siglos.

Para las personas pragmáticas y sensatas, las incursiones en lo irreal pueden parecer ejercicios filosóficos estériles y absurdos, tan disparatados como escuchar el silencio. Al fin y al cabo, ya es bastante difícil trabajar con elementos cuya existencia es indiscutible, como los que afectan a nuestra seguridad, nuestros ingresos y nuestra salud. Pero debería preocuparnos el proceso de priorización que pone a determinadas personas, objetos, preocupaciones e ideas bajo la competencia del gobierno y la sociedad.

¿Qué es, en esencia, la ciencia? ¿Cuál es el secreto del éxito del método científico? Aunque la mayoría de los estudiosos ya no cree que una sola característica pueda definir todo el método científico, suelen subrayar una cualidad muy trillada de este: la idea de que en la ciencia las decisiones sobre la verdad y la realidad se toman tras la verificación o falsación experimental. Tradicionalmente conceptualizamos a la ciencia como un proceso de creación de hipótesis seguido de comprobación. Hay mucho de cierto en esa conceptualización. Es necesaria para entender cómo funciona, pero no nos dice nada sobre la dirección en la que la brújula de la ciencia apunta. Esta conceptualización nos despista cuando intentamos entender hacia dónde se dirigen las investigaciones futuras y cómo lo imposible se convierte en lo real.

EL MITO

Frecuentemente entendemos el descubrimiento científico como algo que irrumpe por arte de magia en el mundo, con la proverbial exclamación «¡eureka!». Esta caricatura, demasiado opaca y simplista, oculta la rica tradición inventiva tras estos momentos culminantes. El influyente filósofo de la ciencia Hans Reichenbach sostenía que «los descubrimientos necesitan una especie de mitología». Pero, después de subrayar la relación entre los descubrimientos

científicos y la mitología, Reichenbach la descartó. En vez de que él y los filósofos que se adherían a su escuela aprovecharan la oportunidad para estudiar su conexión, su objetivo se volvió justo lo contrario. Reichenbach planteó el vínculo para deshacerlo. En una serie de textos sumamente influyentes, argumentó con vigor contra el estudio de las mitologías que han sido necesarias para lograr nuevos descubrimientos. Se esmeró por excluir dichas mitologías de nuestra comprensión de la ciencia.

Las opiniones de Reichenbach sobre la ciencia monopolizaron los debates filosóficos sobre el tema durante casi medio siglo y, de hecho, siguen alimentando la mayoría de las discusiones eruditas y populares sobre la ciencia y sus virtudes, que en un principio fueron moldeadas por el movimiento filosófico que él ayudó a fundar: el positivismo lógico. Su aversión contra los aspectos mitológicos del descubrimiento científico era tal que prefería considerar la ciencia mediante un «constructo ficticio» en el que no desempeñaban ningún papel. También optó por ignorar cómo se practicaba la ciencia realmente. A Reichenbach no le importaba que los propios científicos actuaran de otra manera en sus laboratorios o que sus escritos introdujeran a menudo criaturas y temas míticos o mágicos. Para él, una versión filosófica y ficticia de la ciencia, depurada y reinventada para emerger como lógica y racional, era un digno sustituto. Bajo su influencia, se desecharon todos los aspectos de la ciencia que no encajaran con un modelo empírico y analítico estricto. Se consideraron detritus que había que esconder bajo la alfombra y apartar de la vista.

La filosofía de la ciencia todavía no se ha recuperado del todo de la visión distorsionada que Reichenbach y otros positivistas lógicos promulgaron. Aunque algunos críticos del positivismo lógico han presentado varios correctivos, la mayoría de los debates sobre la ciencia siguen enfocándola como una disciplina apartada de lo imaginario y lo mítico. El constructo ficticio de la ciencia propuesto por los positivistas lógicos reemplazó las prácticas científicas reales y se usó para trazar una línea entre el conocimiento técnico elevado y elitista y las formas de conocimiento mundanas, prácticas y humildes. Esa misma fabricación dividió a los modernos de los premodernos, una disyuntiva asociada a las dicotomías razón e insensatez, civilización y barbarie, Occidente y el resto, etc. En consecuencia, la idea de que se podía aprender algo entendiendo a los demonios pasó a la historia.

LA REALIDAD «SIN HOGAR»

Las interpretaciones psicológicas y religiosas de las creencias en los demonios y otras entidades sobrenaturales resultaron de la culminación de un proyecto que nació siglos atrás y que consiguió eliminar muchas supersticiones del mundo natural. Incluso los progresistas de la Iglesia católica, antiguo bastión de la demonología, empezaron a reinterpretar los casos de acción demoníaca como inferencias psicológicas subconscientes, igual que Sigmund Freud. Estos actos de reinterpretación patologizaron a casi todos los miembros pasados de la humanidad, exceptuando a unos pocos modernizadores. No obstante, demostraron ser ampliamente populares. Así se extirpó de nuestro repertorio de conocimientos avanzados la sabiduría de los antiguos, del barroco y del gótico.

Pero cuantos más filósofos y científicos intentaban comprender el mundo reduciéndolo a sus elementos materiales esenciales, más acababan recurriendo a criaturas, categorías y conceptos imaginarios. Durante los siglos xix y xx, otros demonios compitieron con el de Laplace y pusieron de relieve la fragilidad de las concepciones causales del universo y de la historia basadas en la causalidad unidireccional y cronológica. En cuanto los demonios que doblegaban el tiempo entraron en la ciencia, los historiadores y filósofos, al igual que los científicos, tuvieron que afrontar la posibilidad de que hubiera interacciones históricas en bucle más complejas. La contradicción es cada vez más difícil de ignorar.

A principios del siglo xx, el aristocrático filósofo austríaco Alexius Meinong llegó a la conclusión de que los intelectuales de su entorno eran esclavos de un «prejuicio en favor de lo real». Para combatir ese prejuicio, Meinong intentó crear un área de conocimiento totalmente nueva que contravenía la tendencia general en la mayoría de las investigaciones intelectuales de la época. Su proyecto filosófico consistía en buscar un lugar para los objetos «sin hogar» (Heimatlos) que no encajaban en el ámbito de lo «real» (Wirklich). Él argumentaba que también existían en alguna extraña capacidad. De lo contrario, ni siquiera podríamos hablar de ellos.

Tras pronunciar esas palabras, la comunidad filosófica se alzó contra él en un ferviente grito unánime: «¡Yo no soy meinonguiano!». Algunos entre ellos, como el matemático Bertrand Russell, acusó a Meinong de introducir en la filosofía un «reino del ser excesivamente poblado», como solían hacer los

primitivos. Russell y sus acólitos se embarcaron en el proyecto de tratar de despoblar la ciencia de sus objetos inexistentes. Influenciados por ellos, la mayoría de los filósofos actuales siguen conviniendo en que no hay que modificar la lista generalmente aceptada de lo que hay en el universo y la filosofía acabará subyugada por una escuela de pensamiento llamada filosofía analítica, cuyo objetivo implícito ha sido vigilar los límites de lo real. A la vista de esas dificultades y de los desagradables debates que suscitaron, pocos estudiosos han intentado profundizar mucho más en estas investigaciones. Tal vez sea prudente no aventurarse más allá. Tal vez no. La «bête noire de la filosofía analítica», despertada por los pioneros como Meinong y los pocos adeptos que se pusieron de su lado, motiva gran parte de mi propia argumentación.

EL BIEN, EL MAL Y LA TECNOLOGÍA

Una de las consecuencias preocupantes del mundo moderno está atada al entendimiento común que tenemos de la ciencia como una actividad distinta del ámbito de lo moral. Reichenbach lo reconoció: «Una filosofía científica no puede proporcionar orientación moral; esa es una de sus consecuencias y no se le puede echar en cara». Al centrarse en distinguir entre lo verdadero y lo falso, nos evitaba pensar en el bien y el mal: «¿Quieres la verdad y nada más que la verdad? Entonces no pidas directrices morales». Reichenbach defendía una visión lógica y positivista de la ciencia precisamente porque ayudaba a diferenciar la ciencia de áreas más turbias de la cultura que se veían empañadas por juicios de valor y dilemas discutibles. Estas ventajas traen problemas y retos.

La separación de la ciencia y de la moralidad es espuria. Desaparece en cuanto incluimos en nuestro entendimiento de su desarrollo los sueños, deseos, motivaciones, especulaciones y «demonios» que la dirigen y que llevan a los científicos a crear descubrimientos que cambian radicalmente nuestra realidad.

Aunque el desarrollo de la tecnología moderna no se suele asociar con lo sobrenatural, el sinfín de cosas y sistemas que solemos tachar de «tecnología» se han comparado en un momento u otro a lo demoníaco, lo mágico o lo fantástico. ¿Qué pueden tener en común un telescopio y una calculadora? ¿Existe alguna

característica esencial que nos permita describir lo que comparten, por ejemplo, las máquinas de vapor y las líneas de código? De las cosas que entran dentro de la categoría «tecnología», unas tienen engranajes y pistones metálicos, otras son orgánicas o químicas, vivas o inertes, inmensas o diminutas, locales o no se pueden contener en un lugar específico. El término es tan elástico que no existe una cualidad única que pueda contener todo lo que habitualmente designamos con tal vocablo. Si pensamos en las tecnologías de mañana, el reto es mayor. ¿En qué se distingue la tecnología de un objeto, alguna cosa, o herramienta? ¿Cuál es entonces su esencia?

El filósofo alemán Martin Heidegger se hizo esa pregunta, viéndose obligado a recordar a sus lectores que «la tecnología no es demoniaca, pero su esencia es misteriosa». Dentro de las tecnologías que marcan una época y cambian el mundo, es difícil encontrar ejemplos que no hayan sido calificados de demoníacos en algún sentido, o en algún otro momento. La máquina de vapor es solo uno de miles de ejemplos. Los peligros de la economía mecanizada de la Revolución Industrial frecuentemente encajaban dentro de esta categoría. En el Manifiesto comunista (1848), el economista político Karl Marx y su colaborador Friedrich Engels comparaban al capitalista a cargo de estas nuevas máquinas industriales con un «hechicero [Hexenmeister] que ya no era capaz de controlar los poderes del inframundo invocados con sus hechizos». Más tarde, en *El capital*, Marx dijo que las nuevas máquinas industriales que alteraban las antiguas relaciones laborales eran impulsadas por un «poder demoníaco [dämonische Kraft]». Es lógico tachar de demoniacos los gases venenosos y las bombas atómicas, también los trenes, automóviles, telégrafos, y teléfonos fueron descritos así. El patrón continúa hasta la inteligencia artificial de hoy. En 2014, durante su intervención en el Centennial Symposium del Departamento de Aeronáutica y Astronáutica del MIT, el empresario e inventor Elon Musk describió la inteligencia artificial como un poderoso medio para «invocar al demonio». ¿Acaso estamos obligados a concebir la tecnología de esa manera hasta el final de nuestra historia? Según Heidegger, si logramos entender mejor la esencia de su misterio, «podremos luchar contra la compulsión embrutecida de avanzar ciegamente con la tecnología o, lo que es lo mismo, rebelarse impotentemente contra ella y maldecirla como obra del diablo».

Entender la relación entre lo imaginario y lo real a lo largo de la historia nos permite entender el desarrollo de la ciencia y la tecnología como una actividad tanto humanística como científica, a la vez mítica y racional. La historia de la ciencia deja al pensador en suspenso por futuros descubrimientos. También deja

al científico enfocado en el futuro a merced del historiador. Científicos e historiadores son participantes y observadores de un drama cósmico mucho mayor que ellos. Esta dificultad brinda la oportunidad de estudiar juntas las ciencias y las humanidades, incluso cuando parecen oponerse. Para sobreponernos a los errores del pasado y construir un mañana mejor, debemos entender que somos el pasado de quienes vendrán y el futuro de los que nos precedieron. El futuro está erigido sobre los sueños de antaño que nos permiten ver más allá del universo presente y redirigirlo hacia un destino deseado.

BIBLIOGRAFÍA

Adams, Henry, *The Education of Henry Adams: An Autobiography*, Boston, Riverside Press, 1918.

—, *A Letter to American Teachers of History*, Washington, DC, J. H. Furst, 1910.

—, *Letters of Henry Adams (1892-1918)*, editado por Worthington Chauncey Ford, Boston, Houghton Mifflin Co., 1938.

—, «The Rule of Phase Applied to History», en *The Degradation of the Democratic Dogma*, Nueva York, Macmillan Co., 1920, pp. 267-311.

«The Anatomy of Science by G. N. Lewis», *Mathematical Gazette* 13, n.º 190, 1927, p. 430.

Angrist, Stanley W. y Loren G. Hepler, *Del orden al caos*, Buenos Aires, Troquel, 1972.

Arago, François, «Notice scientifique sur la tonnerre», *Annuaire du bureau des longitudes*, 1838, pp. 221-618.

Arnauld, Antoine y Pierre Nicole, *Logique de Port-Royal (1662)*, París, Hachette, 1874.

Arrhenius, Svante, «Award Ceremony Speech», en *Nobel Lectures, Physics, 1901-1921*, Ámsterdam, Elsevier, 1967, pp. 479-81.

Ashby, W. Ross, «Communication, Organization, and Science. By Jerome Rothstein; with a Foreword by C. A. Muses», *Journal of Mental Science* 105, n.º 438, 1959, p. 267.

Asimov, Isaac, *Life and Energy: An Exploration of the Physical and Chemical Basis of Modern Biology*. Garden City (Nueva York), Doubleday, 1962.

—, «Science: The Modern Demonology», *The Magazine of Fantasy and Science*

Fiction, enero de 1962, pp. 73-83.

—, *View from a Height*, Garden City (Nueva York), Doubleday, 1963.

Aspden, Harold, «Scientific Correspondence: The Law Beats Maxwell's Demon», *Nature* 347, n.º 6288, 6 de septiembre de 1990, p. 25.

Ayer, A. J., «Editor's Introduction», en *Logical Positivism*, Glencoe (Illinois), Free Press, 1959, pp. 3-28.

Ayres, Robert U. e Indira Nair, «Thermodynamics and Economics», *Physics Today* 37, noviembre de 1984, pp. 62-71.

Babbage, Charles, *The Ninth Bridgewater Treatise: A Fragment*, 1.ª ed., Londres, John Murray, 1837.

—, *The Ninth Bridgewater Treatise: A Fragment*, 2.ª ed. Londres, John Murray, 1838.

Baeyer, Hans Christian von, *Maxwell's Demon: Why Warmth Disperses and Time Passes*, Nueva York, Random House, 1998.

Barnes, E. W., *Scientific Theory and Religion*, Cambridge, Cambridge University Press, 1933.

Bastin, Ted, ed., *Quantum Theory and Beyond: Essays and Discussions Arising from a Colloquium*, Cambridge, Cambridge University Press, 1971.

Baudelaire, Charles, «Le Joueur généreux», en *Petits poèmes en prose: Oeuvres complètes*, París, Calmann Levy, 1892, pp. 87-91.

Bekenstein, Jacob D., «Baryon Number, Entropy, and Black Hole Physics», tesis doctoral, Departamento de Física, Universidad de Princeton, 1972.

—, «Black-Hole Thermodynamics», *Physics Today*, enero de 1980, pp. 24-30.

Bell, John S., «On the Einstein Podolsky Rosen Paradox», *Physics* 1, n.º 3, 1964, pp. 195-290.

Bennett, Charles, «The Thermodynamics of Computation: A Review»,

International Journal of Theoretical Physics 21, n.º 12, 8 de mayo de 1982, pp. 905-40.

—, «Demons, Engines, and the Second Law», Scientific American 257, n.º 5, 1987, pp. 108-16.

—, «Logical Reversibility of Computation», IBM Journal of Research and Development 17, n.º 6, 1973, pp. 525-32.

Bentham, Jeremy, Deontology; Or, The Science of Morality, editado por John Bowring, 2 vols., Londres, Longman, Rees, Orme, Browne, Green, and Longman, 1834.

—, Panóptico, Madrid, Círculo de Bellas Artes, 2011.

—, Panopticon: Or, The Inspection-House, Dublín, Thomas Byrne, 1791.

Bergson, Henri, La evolución creadora, traducido por María Luisa Pérez Torres, Barcelona, Planeta-Agostini, 1985.

—, Creative Evolution, traducido por Arthur Mitchell, Mineola (Nueva York), Dover Publications, 1998.

—, Duración y simultaneidad, traducido por Jorge Martín, Buenos Aires, Ediciones del Signo, 2009.

—, Durée et simultanéité: À propos de la théorie d'Einstein, editado por Frédéric Worms y Élie During, 4.ª ed., París, Quadrige/Presses Universitaires de France, 2009.

Bernstein, Aaron, Aus dem reiche der naturwissenschaft, 3.ª ed., Nueva York, Charles Schmidt, 1869.

—, Naturwissenschaftliche Volksbücher, vol. 11, Berlín, Franz Duncker, 1856.

—, Naturwissenschaftliche Volksbücher, vol. 4, Berlín, Franz Duncker, 1855.

—, Naturwissenschaftliche Volksbücher, volumen suplementario, Berlín, Franz Duncker, 1873.

Bernstein, Jeremy, «John Stewart Bell: Quantum Engineer», en *Quantum Profiles*, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1991, pp. 3-89.

Beyler, Richard, «The Demon of Technology, Mass Society, and Atomic Physics in West Germany, 1945-1957», *History and Technology* 19, n.º 3, 2003, pp. 227-39.

Bezos, Jeffrey P., «2016 Letter to Shareholders», *The Amazon Blog Day One*, 17 de abril de 2017, <https://blog.aboutamazon.com/company-news/2016-letter-to-shareholders>.

Bhushan, Abhay, «A File Transfer Protocol», RFC 114, 16 de abril de 1971.

Bloch, Ernst, *El principio Esperanza*, edición de Francisco Serra, vol. 1. Madrid, Trotta, agosto de 2007.

—, *The Principle of Hope*, traducido por Neville Plaice, Stephen Plaice y Paul Knight, vol. 1, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1986.

Blumenberg, Hans, *Lebenszeit und Weltzeit*, Fráncfort del Meno, Suhrkamp, 1986.

Boden, Margaret, «The Mind of a Very Special Machine?», *New Scientist*, n.º 1804, 18 de enero de 1992.

Bohm, David, *Quantum Theory*, Mineola (Nueva York), Dover Publications, 1989. Originalmente publicada en 1951.

—, «A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of Hidden Variables: I», *Physical Review* 85, n.º 2, 1952, pp. 166-79.

Bohr, Niels, «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, editado por Paul Arthur Schilpp, La Salle (Illinois), Open Court, 1949.

Bohr, Niels et al., «Faust: Eine Histoire», en *Niels Bohr 1885-1962: Der Kopenhagener Geist in der Physik*, editado por K. Stolzenburg, K. V. Meyenn y R. U. Sexl, Brunswick, F. Vieweg, 1985, pp. 314-42.

Bois-Reymond, Emil du, *Über die Grenzen des Naturerkennens*, Leipzig, Veit &

Comp, 1872.

—, «The Limits of Our Knowledge of Nature», *Popular Science Monthly* 5, 1874, pp. 17-32.

Boltzmann, Ludwig, *Vorlesungen über Gastheorie*, vol. 2, Leipzig, Johann Ambrosius Barth, 1898.

—, «Zur Erinnerung an Josef Loschmidt», en *Populare Schriften*, pp. 228-52, Leipzig, Johann Ambrosius Barth, 1905.

Born, Max, «Einstein's Statistical Theories», en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, editado por Paul Arthur Schilpp. La Salle (Illinois), Open Court, 1949.

—, «Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858-1947», *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society* 6, n.º 17, 1948, pp. 161-88.

—, *My Life and My Views*, Nueva York, Scribner, 1968.

—, *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford, Clarendon Press, 1949.

—, «Physics in the Last Fifty Years», *Nature* 168, 1951, pp. 625-30.

—, *Physics in My Generation*, 2.ª ed. rev., Berlín, Springer, 1969.

—, «Quantenmechanik der Stoßvorgänge», *Zeitschrift für Physik* 38, 1926, pp. 803-27.

—, *Von der Verantwortung des Naturwissenschaftlers: Gesammelte Vorträge*, Múnich, Nymphenburger Verlagshandlung, 1965.

Bourdieu, Pierre, *Raisons pratiques: Sur la théorie de l'action*, París, Seuil, 1994.

—, *Razones prácticas: Sobre la teoría de la acción*, Barcelona, Anagrama, 2006.

Bown, William, «Science: A Demon Blow to the Second Law of Thermodynamics?», *New Scientist*, n.º 1725, 14 de julio de 1990.

—, «Science: Sacred Law of Physics Is Safe After All», *New Scientist*, n.º 1734, 15 de septiembre de 1990.

Brillouin, Léon, «Information Theory and Its Applications to Fundamental Problems in Physics», *Nature* 183, n.º 4660, 21 de febrero de 1959, pp. 501-2.

—, «Life, Thermodynamics, and Cybernetics», *American Scientist* 37, n.º 4, octubre de 1949, pp. 554-68.

—, «Maxwell's Demon Cannot Operate: Information and Entropy: I», *Journal of Applied Physics* 2, 1951, pp. 334-37.

—, *Science and Information Theory*, Nueva York, Academic Press, 1956.

—, *Science and Information Theory*, 2.ª ed., Mineola, Dover Publications, 2013.

—, «Thermodynamics, Statistics, and Information», *American Journal of Science* 29, 1961, pp. 318-27.

Broad, C. D., *The Mind and Its Place in Nature*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1925.

Brown, James R., *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*, 2.ª ed., Londres, Routledge, 2010.

Buchwald, Diana Kormos, ed., *The Collected Papers of Albert Einstein*, 14 vols., Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1987.

Buller, A. H. Reginald, «Letters to the Editor: Relativity Limerick», *The Observer*, 14 de noviembre de 1937, p. 12.

Butler, Samuel, *Life and Habit*, Londres, Trübner, 1878.

—, *Vida y hábito*, Buenos Aires, Cactus, 2013.

Campbell-Swinton, Alan Archibald, «Scientific Progress and Prospects», *Nature* 88, n.º 2197, 1911, pp. 191-95.

Canales, Jimena, *The Matter of Fact: Exhibition Catalog*, Cambridge (Massachusetts), Harvard University Collection of Historical Scientific Instruments, 2008.

Canales, Jimena y Markus Krajewski, «Little Helpers: About Demons, Angels,

and Other Servants», *Interdisciplinary Science Reviews* 37, n.º 4, 2012, pp. 314-31.

Carlyle, Thomas, *Sartor Resartus*, traducido por Miguel Temprano García, Barcelona, Alba, 2013.

Carnap, Rudolf, *Two Essays on Entropy*, editado por Abner Shimony, Berkeley, University of California Press, 1977.

Carnap, Rudolf y Bar-Hillel Yehoshua, *An Outline of a Theory of Semantic Information*, vol. 247, Cambridge (Massachusetts), Research Laboratory of Electronics, 27 de octubre de 1952.

Carr, Wildon, «Life and Logic», *Mind* 22, n.º 88, 1913, pp. 484-92.

Carroll, Sean B., *Desde la eternidad hasta hoy*, Barcelona, Debate, 2015.

—, *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Nueva York, Penguin, 2010.

Carus, Paul, *History of the Devil and the Idea of Evil: From the Earliest Times to the Present Day*, Chicago, Open Court, 1900.

Cassirer, Ernst, *Determinismus und Indeterminismus in der Modernen Physik*, en *Göteborgs Högskolas Arsskrift* 42, Gotemburgo, Elanders Boktryckeri Aktiebolag, 1937.

Cater, Harold Dean, ed., *Henry Adams and His Friends*, Boston, Houghton Mifflin Co., 1947.

Caves, Carlton M., «Maxwell's Demon: From Physics Outlaw to Potent Teachers», *Physics World* 4, n.º 3, 1991, p. 51.

—, «Quantitative Limits on the Ability of a Maxwell Demon to Extract Work from Heat», *Physical Review Letters* 64, n.º 18, 30 de abril de 1990, pp. 2111-14.

Caves, Carlton M., William G. Unruh y Wojciech H. Zurek, «Comment on "Quantitative Limits on the Ability of a Maxwell Demon to Extract Work from Heat"», *Physical Review Letters* 65, n.º 11, 10 de septiembre de 1990.

Caws, Peter, *The Philosophy of Science*, Princeton (Nueva Jersey), D. Van Nostrand, 1965.

Cervantes Saavedra, Miguel de, *El ingenioso hidalgo Don Quixote de la Mancha*, Madrid, Juan de la Cuesta, 1605.

Charniak, Eugene, *Artificial Intelligence Programming*, 2.^a ed., Hillsdale (Nueva Jersey), Lawrence Erlbaum Associates, 1987.

—, «Toward a Model of Children's Story Comprehension», tesis doctoral, MIT, 1972.

Cherry, Steven, «Jaron Lanier: We're Being Enslaved by Free Information», *IEEE Spectrum*, 16 de julio de 2013, <https://spectrum.ieee.org/podcast/computing/networks/jaron-lanier-were-being-enslaved-by-free-information>.

Clark, Stuart, *Thinking with Demons: The Idea of Witchcraft in Early Modern Europe*, Oxford, Clarendon Press, 1997.

Clausius, Rudolf, «Abschnitt XI: Discussionen über die mechanische Behandlung der Wärme und Elektrizität», en *Die Mechanische Wärmetheorie*, pp. 306-52, Brunswick, Friedrich Vieweg und Sohn, 1879. Cohen, George N. y Jacques Monod, «Bacterial Permeases», *Bacterio-*

logical Reviews 21, 1957, pp. 169-94.

Compton, Arthur H., *The Freedom of Man*, New Haven (Connecticut), Yale University Press, 1935.

—, *The Human Meaning of Science*, Chapel Hill, University of North Carolina Press, 1940.

—, «The Scattering of X-ray Photons», *American Journal of Physics* 14, n.º 2, marzo/abril de 1946.

—, «The Uncertainty Principle and Free Will», *Science* 74, n.º 1911, 14 de agosto de 1931, p. 172.

Compton, Karl T., «Science and Prosperity», *Science* 80, n.º 2079, 1934, pp.

387-94.

Compton, Karl T., J. L. Costa y Henry DeWolf Smyth, «A Mechanical Maxwell Demon», *Physical Review* 30, septiembre de 1927, pp. 349-53.

Cootner, Paul H., «Stock Prices: Random vs. Systematic Changes», *Industrial Management Review* 3, n.º 2, 1962, pp. 24-45.

Crick, Francis, «Obituary: Jacques Lucien Monod», *Nature* 262, n.º 5567, 29 de julio de 1976, pp. 429-30.

Crull, Elise y Guido Bacciagaluppi, eds., *Grete Hermann: Between Physics and Philosophy*, Dordrecht, Springer, 2016.

Curie, Pierre, Marie Curie y G. Bemont, «Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende», *Comptes rendus des séances de l'académie des sciences* 127, 1898, pp. 1215-17.

Daly, Herman E., «Entropy, Growth, and the Political Economy», en *Scarcity and Growth Reconsidered*, editado por V. Kerry Smith, pp. 67-94, Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1979.

Dannen, Gene, «The Einstein-Szilárd Refrigerators: Two Visionary Theoretical Physicists Joined Forces in the 1920s to Reinvent the Household Refrigerator», *Scientific American*, enero de 1997, pp. 90-95.

Danto, Arthur C., *Analytical Philosophy of History*, Cambridge, Cambridge University Press, 1965.

Darling, L. y E. O. Hulburt, «On Maxwell's Demon», *American Journal of Physics* 23, n.º 7, octubre de 1955.

Darwin, Charles, «Essay of 1842», en *The Foundations of the Origin of Species: Two Essays Written in 1842 and 1844*, editado por Francis Darwin, Cambridge, Cambridge University Press, 1909, pp. 1-55.

—, «Essay of 1844», en *The Foundations of the Origin of Species: Two Essays Written in 1842 and 1844*, editado por Francis Darwin, Cambridge, Cambridge University Press, 1909, pp. 56-255.

Daston, Lorraine, «Intelligences: Angelic, Animal, Human», en *Thinking with Animals: New Perspectives on Anthropomorphism*, editado por Lorraine Daston y Gregg Mitman, Chicago, University of Chicago Press, 2005, pp. 37-58.

—, «Marvelous Facts and Miraculous Evidence in Early Modern Europe», en *Wonders, Marvels, and Monsters in Early Modern Culture*, pp. 76-105, Newark (Delaware), University of Delaware Press, 1999.

Daston, Lorraine y Katharine Park, *Wonders and the Order of Nature, 1150-1750*, Nueva York, Zone Books, 1998.

Davies, Paul, «Universe from Bit», en *Information and the Nature of Reality: From Physics to Metaphysics*, editado por Paul Davies y Niels Henrik Gregersen, Cambridge, Cambridge University Press, 2014, pp. 83-117.

—, *The Demon in the Machine: How Hidden Webs of Information Are Solving the Mystery of Life*, Chicago, University of Chicago Press, 2019.

Dawkins, Richard, «Reply to Lucy Sullivan», *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences* 349, n.º 1328, 29 de agosto de 1995, pp. 219-24.

De Broglie, Louis, *Le Dualisme des ondes et des corpuscules dans l'oeuvre de Albert Einstein: Lecture faite en la séance annuelle des prix du 5 Décembre 1955*, París, Institut de France, 1955.

Descartes, René, *Discurso del método*, Madrid, Alianza Editorial, 2011.

—, *Los principios de la filosofía*, Madrid, Alianza Editorial, 1995.

—, *Meditaciones metafísicas*, Madrid, Alianza Editorial, 2011.

Dillenschneider, Raoul y Eric Lutz, «Memory Erasure in Small Systems», *Physical Review Letters* 102, n.º 21, 2009, 210601.

«Discussion du rapport de M. Planck», en *La Théorie du rayonnement et les quanta*, editado por Paul Langevin y Louis de Broglie, París, Gauthier-Villars, 1912, pp. 115-32.

«Discussion on the Paper by O. G. Selfridge», en *Mechanisation of Thought*

Processes: Proceedings of a Symposium Held at the National Physical Laboratory on 24th, 25th, 26th, and 27th November 1958, 527-31, Londres, Her Majesty's Stationery Office, 1961.

Dixon, Henry Horatio y John Joly, «On the Ascent of Sap», Philosophical Transaction of the Royal Society of London 186, 1895, pp. 563-76.

Dotzler, Bernhard J., «Demons-Magic-Cybernetics: On the Introduction to Natural Magic as Told by Heinz von Foerster», Systems Research 13, n.º 3, 1996, pp. 245-50.

Driesch, Hans, Philosophie Des Organischen, 2 vols., Leipzig, Von Wilhelm Engelmann, 1909.

—, The Science and Philosophy of the Organism, 2 vols., Londres, Adam and Charles Black, 1908.

Dyson, George, «The Usefulness of Useless Knowledge: The Physical Realization of an Electronic Computing Instrument at the Institute for Advanced Study, Princeton, 1930-1958», en Exceptional Creativity in Science and Technology: Individuals, Institutions, and Innovations, editado por Andrew Robinson, Radnor (Pensilvania), Templeton Press, 2013, pp. 83-98.

[Ebert, Felix], The Stars and the Earth, or Thoughts upon Space, Time and Eternity (1846), Boston, Lee and Shepard, 1882.

Eddington, Arthur Stanley, The Nature of the Physical World (1928), editado por Ernest Rhys, Everyman's Library: Science, Londres, J. M. Dent & Sons Ltd., 1935.

—, New Pathways in Science, Nueva York, Macmillan Co., 1935.

—, «The Theory of Relativity and Its Influence on Scientific Thought», Scientific Monthly, 1923, pp. 34-53.

—, The Theory of Relativity and Its Influence on Scientific Thought, Oxford, Clarendon Press, 1922.

Eddy, Henry T., «Radiant Heat and Exception to the Second Law of Thermodynamics», Proceedings of the American Philosophical Society 20, n.º

112, 1882, pp. 334-43.

Edgeworth, F. Y., «On the Use of the Theory of Probabilities in Statistics Relating to Society», *Journal of the Royal Statistical Society* 76, n.º 2, 1913, pp. 165-93.

Ehrenberg, Werner, *Dice of the Gods: Causality, Necessity, and Chance*, Londres, Birkbeck College, 1977.

—, «Maxwell's Demon», *Scientific American* 217, n.º 5, noviembre de 1967, pp. 103-10.

—, «A Note on Entropy and Irreversible Processes», *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 34, n.º 233, 1943, pp. 396-409.

Eigen, Manfred, «Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules», *Naturwissenschaften* 10, octubre de 1971, pp. 465-523.

Eigen, Manfred y Ruthild Winkler, *Das Spiel: Naturgesetze steuern den Zufall*, Múnich, R. Piper & Co., 1975.

—, *Steps towards Life*, Oxford, Oxford University Press, 1992.

Einstein, Albert, «Autobiographical Notes», en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, editado por Paul Arthur Schilpp, pp. 3-94, La Salle (Illinois), Open Court, 1949.

—, *Notas autobiográficas*, traducido por Miguel Paredes Larrucea, Madrid, Alianza Editorial, 2016.

—, «Die hauptsächlichen Gedanken der Relativitätstheorie», manuscrito inédito escrito después de diciembre de 1916.

—, «Geleitwort», en *Die Gestirne und die Weltgeschichte: Gedanken über Raum, Zeit und Ewigkeit*, editado por Gregory Itelson, Berlín, Gregor Rogoff Verlag, 1924.

—, «Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?», *Annalen der Physik* 18, n.º 13, 1905, pp. 639-41.

- , «Marian v. Smoluchowski», *Naturwissenschaften* 5, 1917, pp. 107-8.
- , «Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality», en *James Clerk Maxwell: A Commemoration Volume 1831-1931*, Cambridge, Cambridge University Press, 1931, pp. 66-73.
- , «On the Electrodynamics of Moving Bodies», en *The Collected Papers of Albert Einstein*, traducido por Anna Beck, pp. 140-71, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1989.
- , «On the Movement of Small Particles Suspended in Stationary Liquids Required by the Molecular-Kinetic Theory of Heat (1905)», en *The Swiss Years: Writings, 1900-1909*, vol. 2 de *The Collected Papers of Albert Einstein*, traducido por Anna Beck, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1989, pp. 123-34.
- , *Sobre la teoría de la relatividad especial y general (1917)*, traducido por Miguel Paredes Larrucea, Madrid, Alianza Editorial, 2012.
- , «Sur le problème de la relativité», *Scientia* 15 (suplemento), n.º 353, 1914, pp. 139-50.
- , *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*, Brunswick, Vieweg, 1917.
- , «Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Tielchen», *Annalen der Physik* 17, 1905, pp. 549-60.
- , «Zum Relativitätsproblem», *Scientia* 15, 1914, p. 337.
- , «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik* 17, 1905, pp. 891-921.
- Elmer, L. J., «Demon (Theology of)», en *The New Catholic Encyclopedia*, Nueva York, McGraw-Hill, 1967, pp. 754-56.
- Ericson, Richard F., «The Impact of Cybernetic Information Technology on Management Value Systems», *Management Science* 16, n.º 2, 1969, pp. B40-60.

Fiódorov, Nikolái Fiódorovich, *What Was Man Created For? The Philosophy of the Common Task: Selected Works*, traducido por Elisabeth Koutaissoff y Marilyn Minto, Londres, Honeyglen, 1990.

Fellmann, Ferdinand, «Das Ende des Laplaceschen Dämons», en *Geschichte-Ereignis un Erzählung*, editado por Reinhart Koselleck y Wolf-Dieter Stempel, Múnich, Wilhelm Fink, 1973.

—, «Wissenschaft als Beschreibung», *Archiv für Begriffsgeschichte* 18, 1974, pp. 227-61.

Feyerabend, Paul K., «On the Possibility of a Perpetuum Mobile of the Second Kind», en *Mind, Matter, and Method: Essays in Philosophy and Science in Honor of Herbert Feigl*, editado por Paul K. Feyerabend y Grover Maxwell, pp. 409-12, Mineápolis, University of Minnesota Press, 1966.

—, *Realism, Rationalism, and Scientific Method*, Cambridge, Cambridge University Press, 1981.

Feynman, Richard P., «Cargo Cult Science», *Engineering and Science* 37, n.º 7, junio de 1974, pp. 10-13.

—, *Feynman Lectures on Computation*, editado por Anthony J. G. Hey y Robin W. Allen, Reading (Massachusetts), Perseus, 1996.

Feynman, Richard P., Robert B. Leighton y Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vols. 1 y 2, Reading (Massachusetts), Addison-Wesley, 1963 y 1964.

—, *Lecciones de física de Feynman*, vol. I y II, México, Fondo de Cultura Económica, 2000.

Fine, Arthur, «Fictionalism», en *Fictions in Science: Philosophical Essays on Modeling and Idealization*, editado por Suarez Mauricio, *Routledge Studies in the Philosophy of Science*, pp. 19-36, Nueva York, Routledge, 2008.

—, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*, 2.^a ed., *Science and Its Conceptual Foundations*, Chicago, University of Chicago Press, 1996.

Flammarion, Camille, *Lumen: Historias de un alma, un cometa y el infinito*, traducido por Alberto López Llacera, Valencia, Gaspar y Rimbau, 2021.

Flint, H. T., «Letter to the Editor: A Limit to the Quantum Theory and the Avoidance of Negative Energy Transitions», *Nature*, 22 de febrero de 1936, pp. 313-14.

Foerster, Heinz von, «Disorder/Order: Discovery or Invention?», en *Disorder and Order: Proceedings of the Stanford International Symposium (September 14-16, 1981)*, editado por Paisley Livingston, Saratoga (California), Anma Libri, 1984, pp. 177-89.

—, «On Self-Organizing Systems and Their Environments», en *Self-Organizing Systems: Proceedings of an Interdisciplinary Conference 5 and 6 May, 1959*, editado por Marshall C. Yovits y Scott Cameron, Nueva York, Pergamon Press, 1960, pp. 31-50.

—, «Responsibilities of Competence», *Journal of Cybernetics* 2, n.º 2, 1972, pp. 1-6.

Fourier, Jean-Baptiste-Joseph, *Théorie analytique de la chaleur*, París, F. Didot père et fils, 1822.

Freud, Sigmund, «A Seventeenth-Century Demonological Neurosis (1923)», en *The Standard Edition of the Complete Psychological Works*, vol. 19, traducido por James Strachley, Londres, Hogarth Press and Institute of Psychoanalysis, 1953-1974.

Frisch, Otto Robert, *What Little I Remember*, Cambridge, Cambridge University Press, 1979.

Gabor, Dennis, «IV: Light and Information», *Progress in Optics* 1, 1961, pp. 109-53.

—, *Lectures on Communication Theory*, Cambridge (Massachusetts), Research Laboratory of Electronics, 3 de abril de 1952.

Galison, Peter, *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps: Empires of Time*, Nueva York, W. W. Norton and Co., 2003.

Gamow, George, *Mr. Tompkins Explores the Atom*, Nueva York, Macmillan, 1944.

Garnett, William, «Energy», en *Encyclopædia Britannica*, Edimburgo, Adam and Charles Black, 1878, pp. 205-11.

Georgescu-Roegen, Nicholas, *Analytical Economics: Issues and Problems*, Cambridge (Massachusetts), Harvard University Press, 1966.

—, «Energy Analysis and Economic Valuation», *Southern Economic Journal* 45, 1979, pp. 1023-58.

—, «Energy and Economic Myths», *Southern Economic Journal* 41, n.º 3, enero de 1974, pp. 347-81.

—, *The Entropy Law and the Economic Process*, Cambridge (Massachusetts), Harvard University Press, 1971.

—, «The Steady State and Ecological Salvation: A Thermodynamic Analysis», *BioScience* 27, n.º 4, abril de 1977, pp. 266-70.

Ghirardi, Giancarlo, «Properties and Events in a Relativistic Context: Revisiting the Dynamical Reduction Program», *Foundations of Physics Letters* 9, n.º 4, 1 de agosto de 1996, pp. 313-55.

—, *Sneaking a Look at God's Cards: Unraveling the Mysteries of Quantum Mechanics*, traducido por Gerald Malsbary, ed. rev., Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 2005. Publicado inicialmente en italiano con el título *Un'occhiata alle carte di Dio* (1997).

Gibbs, Josiah Willard, *Elementary Principles of Statistical Mechanics*, Nueva York, Scribner, 1902.

Gillispie, Charles Couston, *Pierre-Simon Laplace, 1749-1827: A Life in Exact Science*, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1997.

Gistau, Alberto Fragio, *Paradigms for a Metaphorology of the Cosmos: Hans Blumenberg and the Contemporary Metaphors of the Universe*, Ariccia (Italia), Aracne, 2015.

Gleick, James, *Genius: The Life and Science of Richard Feynman*, Nueva York, Vintage Books, 1992.

Goeller, H. E. y Alvin M. Weinberg, «The Age of Substitutability», *American Economic Review* 68, n.º 6, diciembre de 1978, pp. 1-11.

Goldstein, Martin e Inge F. Goldstein, *The Refrigerator and the Universe: Understanding the Laws of Energy*, Cambridge (Massachusetts), Harvard University Press, 1993.

Gooday, Graeme, «Sunspots, Weather, and the Unseen Universe: Balfour Stewart's Anti-Materialist Representations of "Energy" in British Periodicals», en *Science Serialized: Representations of the Sciences in Nineteenth-Century Periodicals*, editado por Geoffrey Cantor y Sally Shuttleworth, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 2004.

Gouy, Louis Georges, «Note sur le mouvement brownien», *Journal de physique, théorique, et appliquée* 7, 1888, pp. 561-64.

Grafton, Anthony, «The Devil as Automaton: Giovanni Fontana and the Meanings of a Fifteenth-Century Machine», en *Genesis Redux: Essays in the History and Philosophy of Artificial Life*, editado por Jessica Riskin, Chicago, University of Chicago Press, 2007, pp. 46-62.

Griffin, Nicholas y Dale Jacquette, *Russell vs. Meinong: The Legacy of «On Denoting»*, Nueva York, Routledge, 2009.

Grimm, Jacob y Wilhelm, *Deutsche Mythologie*, Gotinga, 1835.

Haldane, J. B. S., *Fact and Faith*, The Thinker's Library, Londres, Watts & Co., 1934.

Harman, P. M., *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, Cambridge, Cambridge University Press, 1998.

Harrison, Brown et al., «Chernobyl in Context», *Bulletin of the Atomic Scientists* 43, n.º 1, agosto/septiembre de 1986, p. 2.

Hawking, Stephen W., *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*, Nueva York, Bantam Dell, 1988.

—, «Black Holes and Unpredictability», *Physics Bulletin* 29, n.º 1, enero de 1978, pp. 23-24.

—, «Chronology Protection Conjecture», *Physical Review D* 46, n.º 2, 15 de julio de 1992, pp. 603-11.

—, *Historia del tiempo: Del big bang a los agujeros negros*, Nueva York, Bantam Dell, 1988.

—, «Particle Creation by Black Holes», *Communications in Mathematical Physics* 43, 1975, pp. 199-220.

Hawking, Stephen W. y Roger Penrose, *La naturaleza del espacio y el tiempo*, Barcelona, Debolsillo, 2012.

—, «The Nature of Space and Time», *Scientific American* 275, n.º 1, 1996, pp. 60-65.

—, *The Nature of Space and Time*, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1996.

Heidegger, Martin, *Einführung in die Metaphysik*, Tübinga, Max Niemeyer, 1953.

—, *Introducción a la metafísica*, Barcelona, Gedisa, 2012.

—, *Introduction to Metaphysics*, editado por Gregory Fried y Richard Polt, New Haven (Connecticut), Yale University Press, 2000.

—, «The Question Concerning Technology», en *The Question Concerning Technology and Other Essays (1954)*, Nueva York, Harper & Row, 1977, pp. 3-35.

Heisenberg, Werner, *Das Naturbild der heutigen Physik*, Hamburgo, Rowohlt, 1955.

—, *La imagen de la naturaleza en la física actual*, Barcelona, Planeta, 1992.

—, *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*, Nueva York, Harper & Row, 1971.

—, *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*, Nueva York, Harper & Row, 1958.

Helmholtz, Hermann von, «Wirbelstürme und Gewitter» (conferencia dada en Hamburgo, 1875), *Deutsche Rundschau* 6, 1876, pp. 363-80. Reimpreso en *Vorträge und Reden*, Brunswick, Friedrich Vieweg und Sohn, 1896, pp. 137-63.

Henry-Hermann, Grete, «Die Kausalität in Der Physik», *Studium Generale* 1, n.º 6, 1948, pp. 375-83.

Hermann, Grete, «Die Naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik», *Naturwissenschaften* 42, 1935, pp. 718-21.

—, «Die Naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik», *Abhandlungen der Fries'schen Schule* 6, n.º 2, 1935, pp. 69-152.

—, «Natural-Philosophical Foundations of Quantum Mechanics», en Grete Hermann: *Between Physics and Philosophy*, editado por Elise Crull y Guido Bacciagaluppi, Dordrecht, Springer, 2016, pp. 239-78.

Herschel, John, *A Treatise on Astronomy*, 3.ª ed., Filadelfia, Carey, Lea and Blanchard, 1834.

Hesse, Mary B., *Models and Analogies in Science*, Londres, Sheed & Ward, 1963.

Hill, Thomas, «Recommendatory Letters», en [Felix Eberly], *The Stars and the Earth, or Thoughts upon Space, Time and Eternity* (1846), Boston, Lee and Shepard, 1882.

Hofstadter, Douglas R., «Reflections», en *The Mind's I: Fantasies and Reflections on Self and Soul*, editado por Douglas R. Hofstadter y Daniel C. Dennett, Nueva York, Basic Books, 1981, pp. 373-82.

«Holds Roosevelt, Turns Back Chaos: Karl Compton Says That His “Intelligent Planning” Is Staying Nature’s Trend», *The New York Times*, 23 de junio de 1934, p. 2.

Holmes, Samuel Jackson, «The Beginnings of Intelligence», *Science* 33, n.º 848, 1911, pp. 473-80.

Holton, Gerald, «On the Art of Scientific Imagination», *Daedalus* 125, n.º 2, primavera de 1996, pp. 183-208.

Hopfield, John J., «Kinetic Proofreading: A New Mechanism for Reducing Errors in Biosynthetic Processes Requiring High Specificity», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 71, n.º 10, octubre de 1974, pp. 4135-39.

«How Will the New “Golem” Help Israel?», *The Sentinel: Voice of Chicago Jewry*, 22 de abril de 1965, p. 1.

Hoyningen-Huene, Paul, «Two Letters of Paul Feyerabend to Thomas Kuhn», *Studies in the History and Philosophy of Science* 26, n.º 3, 1995, pp. 353-87.

Hugo, Victor, *Les Misérables*, Bruselas, A. Lacroix, Verboeckhoven & Co., 1862.

—, *Los miserables*, Barcelona, Austral, 2018.

Hume, David, *Diálogos sobre la religión natural*, Madrid, Tecnos, 2004.

—, *Dialogues Concerning Natural Religion*, Londres, sin editor, 1779.

—, *Philosophical Essays Concerning Human Understanding*, Londres, A. Millar, 1748.

Huxley, Thomas H., «The Genealogy of Animals» (1869), en *Darwiniana: Essays*, Nueva York, D. Appleton, 1896, pp. 107-19.

«Information, Fluctuations, and Energy Control in Small Systems», *CORDIS*, 21 de abril de 2017, <https://cordis.europa.eu/project/id/308850>.

«Ilya Prigogine», en *Glimpsing Reality: Ideas in Physics and the Link to Biology*, editado por Paul Buckley y F. David Peat, Toronto, University of Toronto Press, 1996, pp. 98-110.

Janet, Paul, «The Materialism of the Present Day», *Reader*, 30 de junio de 1866.

Jasanoff, Sheila, «Future Imperfect: Science, Technology, and the Imaginations of Modernity», en *Dreamscapes of Modernity: Sociotechnical Imaginaries and the Fabrication of Power*, editado por Jasanoff Sheila y Kim Sang-Hyun, pp. 1-

33, Chicago, University of Chicago Press, 2015.

Jauch, J. M. y J. G. Baron, «Entropy, Information and Szilárd's Paradox», *Helvetica Physica Acta* 45, 1972, pp. 220-32.

Jevons, W. Stanley, «On the Movement of Microscopic Particles Suspended in Liquids», *Quarterly Journal of Science*, abril de 1878, pp. 167-86.

Johnson, George, «Rolf Landauer, Pioneer in Computer Theory, Dies at 72», *The New York Times*, 30 de abril de 1999.

Johnson, Paul, *Modern Times: The World from the Twenties to the Nineties*, Nueva York, HarperCollins, 1991.

Johnstone, James, *The Philosophy of Biology*, Cambridge, Cambridge University Press, 1914.

Jukes, Thomas H., «DDT: Maxwell's Demon», *Science* 166, n.º 3901, 3 de octubre de 1969, p. 44.

Keller, Evelyn Fox, *Refiguring Life: Metaphors of Twentieth-Century Biology*, Nueva York, Columbia University Press, 1995.

Kendall, Maurice G., «The Analysis of Economic Time-Series: Part I: Prices», *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)* 116, n.º 1, 1953, pp. 11-34.

Kiukas, Jukka y Reinhard F. Werner, «Maximal Violation of Bell Inequalities by Position Measurements», *Journal of Mathematical Physics* 51, n.º 7, 2010.

Kohler, Eckehart, «Why von Neumann Rejected Carnap's Dualism of Information Concepts», en *John von Neumann and the Foundations of Quantum Physics*, editado por Miklos Redei y Michael Stoltzner, Dordrecht, Kluwer, 2001, pp. 97-134.

Kornacker, Karl, «Towards a Physical Theory of Self-Organization», en *Towards a Theoretical Biology*, editado por Conrad Hal Waddington, Chicago, Aldine Publishing Co., 1968, pp. 94-95.

Kornman, Brent D., «Pattern Matching and Pattern-Directed Invocation in

Systems Programming Languages», *Journal of Systems and Software* 3, 1983, pp. 95-102.

Krugman, Paul, «The Incomparable Economist», *The New York Times*, 15 de diciembre de 2009.

Kuhn, Thomas S., «A Function for Thought Experiments», en *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago, University of Chicago Press, 1964, pp. 240-65. Originalmente publicado en *L'Aventure de la science: Mélanges Alexandre Koyre* (1964).

—, *La estructura de las revoluciones científicas*, traducido por Carlos Solis, Madrid, Fondo de Cultura Económica, 2006.

—, «Postscript—1969», en *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, University of Chicago Press, 1970, pp. 174-210.

—, *The Structure of Scientific Revolutions*, 2.^a ed., Chicago, University of Chicago Press, 1970.

Laing, Richard, «Maxwell's Demon and Computation», *Philosophy of Science* 41, n.º 2, 1973, pp. 171-78.

Laird, John E. y Paul S. Rosenbloom, «The Research of Allen Newell», *AI Magazine* 13, n.º 4, 1992, pp. 17-45.

Landauer, Rolf, «Computation: A Fundamental Physical View», *Physica Scripta* 35, n.º 1, 1987, pp. 88-95.

—, «Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process», *IBM Journal of Research and Development* 5, 1961, pp.183-91.

Langevin, Paul, «L'Évolution de l'espace et du temps», *Scientia* 10, 1911, pp. 31-54.

Lanouette, William, *Genius in the Shadows: A Biography of Leó Szilárd, the Man Behind the Bomb*, Nueva York, Skyhorse Publishing, 2013.

Laplace, Pierre-Simon, *Essai philosophique sur les probabilités*, París, Courcier, 1814.

—, «Un Mémoire sur l'équation séculaire de la lune», 2 de abril de 1788, en *Oeuvres complètes*, París, Gauthier-Villars, 1895, pp. 241-71.

—, «Recherches, sur l'intégration des équations différentielles aux différences finies, et sur leur usage dans la théorie des hasards», *Mémoires de l'academie royale des sciences de Paris (Savants étrangers)* 7, 1776, pp. 37-163. Reimpreso en *Oeuvres Complètes*, París, Gauthier-Villars, 1891, pp. 69-197.

Latour, Bruno, «Drawing Things Together», en *Representation in Scientific Practice*, editado por Michael E. Lynch y Steve Woolgar, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1990, pp. 19-68.

Latour, Bruno y Steve Woolgar, *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts* (1979), Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1986.

—, *La vida en el laboratorio: La construcción de los hechos científicos*, Madrid, Alianza Editorial, 1995.

Laurence, William, «New "Gun" Speeds Break-up of Atom», *The New York Times*, 20 de junio de 1933.

Law, Richard, «Optimal Life Histories under Age-Specific Predation», *American Naturalist* 114, n.º 3, septiembre de 1979, pp. 399-417.

Leff, Harvey S. y Andrew F. Rex, eds., *Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing*, Princeton Series in Physics, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1990, pp. 1-32.

—, eds., *Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing*, Filadelfia, CRC Press, 2002.

Leffler, Samuel J., *The Design and Implementation of the 4.3bsd Unix Operating System*, Reading (Massachusetts), Addison-Wesley, 1989.

Leijonhufvud, Axel, «Keynes and the Keynesians: A Suggested Interpretation», *American Economic Review* 57, n.º 2, 1967, pp. 401-10.

Leonard, Andrew, *Bots: The Origin of New Species*, San Francisco, Penguin, 1997.

Lerner, A. Y., *Fundamentals of Cybernetics*, Nueva York, Plenum, 1975.
Levallois, Clement, «Can De-Growth Be Considered a Policy Option? A Historical Note on Nicholas Georgescu-Roegen and the Club of Rome», *Ecological Economics* 69, 2010, pp. 2271-78.

Lévi-Strauss, Claude, *Mitológicas I: Lo crudo y lo cocido*, México, Fondo de Cultura Economica, 1968.

—, *Mythologiques: Le Cru et le cuit*, París, Librairie Plon, 1964. Lewis, Gilbert Newton, *The Anatomy of Science*, New Haven (Connecticut), Yale University Press, 1926.

—, «The Conservation of Photons», *Nature* 118, 1926, pp. 874-75.

—, «The Symmetry of Time in Physics», *Science* 71, n.º 1849, 1930, pp. 569-77.

Lewontin, Richard C., «Is Nature Probable or Capricious?», *BioScience* 16, n.º 1, enero de 1966, pp. 25-27.

Lichtenstein, Leon y André Metz, «La Philosophie des mathématiques selon M. Émile Meyerson», *Revue Philosophique de la France et de l'étranger* 113, 1932, pp. 169-206.

Lillie, Ralph S., «The Directive Influence in Living Organisms», *Journal of Philosophy* 29, n.º 18, 1 de septiembre de 1932, pp. 477-91.

—, «The Philosophy of Biology: Vitalism versus Mechanism», *Science* 40, n.º 1041, 11 de diciembre de 1914, pp. 840-46.

—, «Physical Indeterminism and Vital Action», *Science* 66, n.º 1702, 12 de agosto de 1927, pp. 139-43.

Lindsay, Peter H. y Donald A. Norman, *Human Information Processing: An Introduction to Psychology*, Nueva York, Academic Press, 1972.

Livingston, Paisley, «Introduction», en *Disorder and Order: Proceedings of the Stanford International Symposium*, 14-16 de septiembre de 1981, editado por Paisley Livingston, pp. 3-33, Saratoga (California), Anma Libri, 1984.

Lloyd, Seth, «Quantum-Mechanical Maxwell's Demon», *Physical Review* 56,

n.º 5, noviembre de 1997, pp. 3374-82.

Locke, John, «A Discourse of Miracles», en *Posthumous Works of Mr. John Locke*, Londres, Black Swan, 1706.

—, «Of the Conduct of the Understanding», en *Posthumous Works of Mr. John Locke*, Londres, Black Swan, 1706.

Loewenstein, Werner R., *The Touchstone of Life: Molecular Information, Cell Communication, and the Foundations of Life*, Oxford, Oxford University Press, 1999.

Lorentz, Hendrik A., «Discourse d'ouverture», en *La Théorie du rayonnement et les quanta*, París, Gauthier-Villars, 1912, pp. 6-9.

Loschmidt, Josef, «Der Zweite Satz der Mechanischen Wärmetheorie», *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften* 59, n.º 2, 1877, pp. 395-418.

—, «Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft», *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften* 73, n.º 2, 1876, pp. 128-42, 366-72.

—, «Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft», *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften* 75, 1877, pp. 287-98.

—, «Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft», *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften* 76, 1878, pp. 209-25.

Lovelace, Ada, «Notes by the Translator», en *Scientific Memoires, Selected from the Transactions of Foreign Academies of Science and Learned Societies* 3, 1843, pp. 691-731.

Macduffie, Allen, «Irreversible Transformations: Robert Louis Stevenson's "Dr. Jekyll and Mr. Hyde" and Scottish Energy Science», *Representations* 96, n.º 1, 2006, pp. 1-20.

Macrae, Norman, *John von Neumann: The Scientific Genius Who Pioneered the*

Modern Computer, Game Theory, Nuclear Deterrence, and Much More, Nueva York, Pantheon, 1992.

Maddox, John, «Maxwell's Demon Flourishes», *Nature* 345, n.º 6271, 1990, p. 109.

Mahon, Basil, *The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk Maxwell*, Nueva York, John Wiley & Sons, 2004.

Margenau, Henry, «Causality and Modern Physics», *The Monist* 41, n.º 1, 1931, pp. 1-36.

—, «Meaning and Scientific Status of Causality», *Philosophy of Science* 1, n.º 2, 1934, pp. 133-48.

—, *The Nature of Physical Reality: A Philosophy of Modern Physics*, Nueva York, McGraw-Hill, 1950.

Martínez Alier, Joan, «In Memory of Georgescu-Roengen», en *Varieties of Environmentalism: Essays North and South*, editado por Ramachandra Guha y Joan Martínez Alier, Londres, Earthscan Publications, 1997, pp. 169-84.

Marx, Karl y Friedrich Engels, *Das Kapital: Kritik Der Politischen Oekonomie*, vol. 1 de 3, Hamburgo, Otto Meissner, 1867.

—, *El capital: Crítica de la economía política*, Madrid, Alianza Editorial, 2010.

—, *Manifiesto comunista (1848)*, Madrid, Alianza Editorial, 2011.

—, *The Communist Manifesto (1848)*, editado por McLellan David, Oxford, Oxford University Press, 1992.

Maxwell, James Clerk, «Molecules», *Nature*, septiembre de 1873, pp. 437-41.

—, *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, editado por P. M. Harman, vol. 2, Cambridge, Cambridge University Press, 1990.

—, *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*, editado por P. M. Harman, vol. 3, Cambridge, Cambridge University Press, 1990.

—, *Theory of Heat*, Londres, Longmans, Green and Co., 1871.

McCarthy, John, «Ascribing Mental Qualities to Machines», en *Formalizing Common Sense: Papers by John McCarthy*, editado por Vladimir Lifschitz, Exeter, Intellect, 1998, pp. 93-118.

—, «Programs with Common Sense», en *Mechanisation of Thought Processes: Proceedings of a Symposium Held at the National Physical Laboratory on 24th, 25th, 26th, and 27th November 1958*, Londres, Her Majesty's Stationery Office, 1961, pp. 75-84.

McClare, C. W. F., «Chemical Machines, Maxwell's Demon, and Living Organisms», *Journal of Theoretical Biology* 30, 1971, pp. 1-34.

McFarland, Matt, «Elon Musk: “With Artificial Intelligence We Are Summoning the Demon”», *The Washington Post*, 24 de octubre de 2014.

McKelvey, Fenwick, *Internet Daemons: Digital Communications Possessed*, vol. 56 de *Electronic Mediations*, Mineápolis, University of Minnesota Press, 2018.

Meinong, Alexius, «Über Gegenstandstheorie», en *Untersuchungen zur Gegenstandstheorie und Psychologie*, editado por Alexius Meinong, Leipzig, Johann Ambrosius Barth, 1904, pp. 1-50.

Menabrea, Luigi Federico, «Notions sur la machine analytique de M. Charles Babbage», *Bibliothèque universelle de Genève* 41, n.º 82, octubre de 1842, pp. 352-76.

—, «Sketch on the Analytical Engine Invented by Charles Babbage», en *Scientific Memoires, Selected from the Transactions of Foreign Academies of Science and Learned Societies* 3, 1843, pp. 666-90. Meyenn, K. V., K. Stolzenburg y R. U. Sxl, eds., *Niels Bohr 1885-1962: Der Kopenhagener Geist in der Physik*, Brunswick, F. Vieweg, 1985.

Meyer, Garry S., «Infants in Children's Stories: Toward a Model of Natural Language Comprehension», trabajo final de máster, MIT, agosto de 1972, informe 265.

Millikan, Robert Andrews, *Time, Matter, and Values*, Chapel Hill, University of North Carolina Press, 1923.

Minsky, Marvin L., *The Society of Mind* (1986), Nueva York, Simon & Schuster, 1988.

—, «Steps towards Artificial Intelligence», *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 49, enero de 1961, pp. 8-30.

Mirowski, Philip, *Machine Dreams: Economics Becomes a Cyborg Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 2002.

Mises, Richard von, «Über kausale und statistische Gesetzmäßigkeit in der Physik», *Naturwissenschaften* 18, 1930, pp. 145-53. Reimpreso en *Erkenntnis* 1, pp. 189-210.

—, *Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit*, vol. 3 en *Schriften zur Wissenschaftlichen Weltauffassung*, editado por Philipp Frank y Moritz Schlick, Viena, Julius Springer, 1928.

Monk, Ray, *Robert Oppenheimer: A Life inside the Center*, Nueva York, Doubleday, 2012.

Monod, Jacques, *Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology*, 1970, Nueva York, Vintage Books, 1972.

—, *El azar y la necesidad*, traducido por Francisco Ferrer Lerín, Barcelona, Tusquets Editores, 2016.

Mooney, Vincent John, III, «Searle's Chinese Room and Its Aftermath», *CSLI, Stanford (California), Stanford University, Center for the Study of Language and Information* (junio de 1997), pp. 97-202.

Moore, Kate, *Las chicas del radio*, traducido por Amelia Pérez de Villar, Madrid, Capitan Swing, 2018.

—, *The Radium Girls: The Dark Story of America's Shining Women*, Naperville (Illinois), Sourcebooks, 2017.

Morowitz, Harold J., *Entropía para biólogos*, Madrid, H. Blume Ediciones, 1978.

Morton, Jack A., «The Manager as Maxwell's Demon», *Innovation* 1, mayo de 1969, pp. 38-45.

—, «The Manager's Changing Role in Technological Innovation», *Bell Telephone Journal* 47, n.º 1, enero/febrero de 1968, pp. 8-15.

—, *Organizing for Innovation: A Systems Approach to Technical Management*, Nueva York, McGraw-Hill, 1971.

Muses, C. A., «Foreword», en *Communication, Organization, and Science de Jerome Rothstein*, Indian Hills (Colorado), Falcon's Wing Press, 1958, pp. vii-lxxxv.

Nadler, Steven, «Descartes's Demon and the Madness of Don Quixote», *Journal of the History of Ideas* 58, n.º 1, 1997, pp. 41-55.

Napoleón I, «Consuls Provisoires», en *Correspondance de Napoléon 1er*, editado por Henri Plon, París, 1870, pp. 324-47.

Neesen, Friedrich, «W. Thomson: Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», *Fortschritte der Physik Im Jahre 1874*, n.º 30, 1879, pp. 673-74.

Nemeth, Evi et al., *Unix System Administration Handbook*, Nueva York, Prentice-Hall, 1989.

Nernst, Walther, *Zum Gültigkeitsbereich der Naturgesetze*, Berlín, Norddeutsche Buchdruckerei und Verlagsanstalt, 1921.

Neumann, John von, *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica*, Madrid, Editorial CSIC, 2018.

—, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, traducido por Robert T. Beyer, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1955.

Neurath, Otto, «Protokollsätze», *Erkenntnis* 3, 1932/1933, pp. 204-14.

—, «Protocol Sentences», en *Logical Positivism*, editado por A. J. Ayer, Nueva York, Free Press, 1959, pp. 199-208.

Newell, Allen, «Some Problems of Basic Organization in Problem-Solving Programs», en *Self-Organizing Systems*, editado por Marshall C. Yovits, G. Jacobi y Gordon D. Goldstein, Washington, DC, Spartan, 1962, pp. 393-423.

Newell, Allen, John Laird y Paul Rosenbloom, «Proposal for Research on SOAR: An Architecture for General Intelligence and Learning», caja 32, vol. 22, serie 1986-052, colección especial de la Biblioteca de la Universidad de Stanford.

Nietzsche, Friedrich Wilhelm, *Die fröhliche Wissenschaft*, Chemnitz, Ernst Schmeitzner, 1882

«Notes», *Nature* 61, n.º 1567, 9 de noviembre de 1899, pp. 37-40.

Odum, Howard T., *Systems Ecology: An Introduction*, Nueva York, John Wiley and Sons, 1983.

Ogden, C. K., *Bentham's Theory of Fictions*, Paterson (Nueva Jersey), Littlefield, Adams & Co., 1959.

«Open Peer Commentary to “Minds, Brains, and Programs”», *Behavioral and Brain Sciences* 3, 1980, pp. 424-50.

Oseen, C. W., «Award Ceremony Speech», en *Nobel Lectures, Physics 1922-1941*, Ámsterdam, Elsevier Publishing Co., 1965, pp. 135-37. Pais, Abraham, «Subtle Is the Lord ...»: *The Science and the Life of Al-*

bert Einstein, Oxford, Clarendon Press, 1982.

Pascal, Blaise, *Éloge et Pensées de Pascal*, Nouvelle Édition, Commentée, corrigée & augmentée, por De***, París, 1778.

Pearson, Karl, *The Grammar of Science*, Londres, Walter Scott, 1892.

—, *The Grammar of Science*, 2.ª ed., Londres, Adam and Charles Black, 1900.

—, «The Problem of the Random Walk», *Nature* 72, n.º 1865, 27 de julio de 1905, p. 294.

Penrose, Oliver, *Foundations of Statistical Mechanics*, Oxford, Pergamon Press, 1970.

Perrin, Jean, *Atoms* (1913), Woodbridge (Connecticut), Ox Bow Press, 1990.

—, «Mécanisme de l'électrisation de contact et solutions colloïdiales», *Journal de chimie physique* 2, 1904-1905, pp. 601-51.

—, «Mécanisme de l'électrisation de contact et solutions colloïdiales», *Journal de chimie physique* 3, 1904-1905, pp. 50-110.

—, «Mouvement brownien et réalité moléculaire», *Annales de chimie et de physique* 8, n.º 18, 1909, pp. 1-114.

Pierce, John R., «The Exorcism», *Galaxy*, abril de 1971, pp. 81-91.

—, *Symbols, Signals, and Noise: The Nature and Process of Communication*, Harper Modern Science Series, Nueva York, Harper & Row, 1961.

Pinker, Steven, *Cómo funciona la mente*, Barcelona, Destino, 2008.

—, *How the Mind Works*, Nueva York, W. W. Norton and Co., 1997.

Pittendrigh, Colin S., «Adaptation, Natural Selection, and Behavior», en *Behavior and Evolution*, editado por Anne Roe y George Gaylord Simpson, New Haven (Connecticut), Yale University Press, 1958, pp. 390-416.

—, «On Temporal Organization in Living Systems», *Harvey Lectures* 56, 1960, pp. 93-125.

—, «Temporal Organization: Reflections of a Darwinian Clock-Watcher», *Annual Review of Physiology* 55, 1993, pp. 17-54.

Planck, Max, «The Concept of Causality in Physics», en *Scientific Autobiography and Other Papers*, Nueva York, Philosophical Library, 1949, pp. 121-50.

—, «Verdampfen, Schmelzen, und Sublimieren», *Annalen der Physik* 15, 1882, pp. 446-75.

—, *Wege zur physikalischen Erkenntnis: Reden und Vorträge*, Leipzig, S. Hirzel, 1933.

Platt, John R., «Books That Make a Year's Reading and a Lifetime's Enrichment: A Year's Reading», *The New York Times*, 2 de febrero de 1964.

Pohle, Joseph, *Die Sternenwelten und ihre Bewohner* (1885), Colonia, J. P. Bachem, 1906.

—, *God: The Author of Nature and the Supernatural (De Deo Creante et Elevante)*, traducido por Arthur Preuss, 2.^a ed., St. Louis (Misuri), B. Herder, 1916.

Poincaré, Henri, *Ciencia e hipótesis* (1902), Barcelona, Austral, 2010.

—, *Ciencia y método* (1908), Barcelona, Austral, 1963.

—, *El valor de la ciencia*, Oviedo, KRK Ediciones, 2008.

—, *La Valeur de la science*, Bibliothèque de philosophie scientifique, París, E. Flammarion, 1905.

—, *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques professées à la Sorbonne*, París, A. Hermann et fils, 1911.

—, «Le mécanisme et l'expérience», *Revue de métaphysique et de morale* 1, 1893, pp. 534-37.

—, «Le Hasard», *Revue du mois* 3, 1907, pp. 257-76. Republicado en Poincaré, *Ciencia y método*.

—, «Poincare's "Thermodynamics"», *Nature* 45, n.º 1169, 24 de marzo de 1892, p. 485.

—, «Relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique», en *Rapports présentés au Congrès international de physique*, editado por Charles Edouard Guillaume y Lucien Poincare, París, Gauthier-Villars, 1900, pp. 1-29.

—, *Science and Hypothesis* (1902), Nueva York, Dover, 1952.

—, *Science and Method* (1908), Nueva York, Dover, 1952.

—, «Sur les équations de la dynamique et le problème des trois corps», *Acta Mathematica* 13, 1890, pp. 1-270.

—, «The Principles of Mathematical Physics», *The Monist* 15, n.º 1, 1 de enero

de 1905, pp. 1-24.

—, «The Principles of Mathematical Physics», en Congress of Arts and Science, Universal Exposition, St. Louis, 1904, Boston, Houghton Mifflin, 1905, pp. 604-22.

Popper, Karl R., Conocimiento objetivo, Madrid, Tecnos, 2007.

—, El mundo de Parménides, traducido por Carlos Solis, Barcelona, Paidós, 1999.

—, El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo. Post Scriptum a La Lógica de la investigación científica, Madrid, Tecnos, 2010.

—, «Irreversibility; Or, Entropy since 1905», British Journal for the Philosophy of Science 8, n.º 30, 1957, pp. 151-55.

—, Objective Knowledge: An Evolutionary Approach, Oxford, Clarendon Press, 1973.

—, Quantum Theory and the Schism in Physics, editado por William Warren Bartley, Totowa (Nueva Jersey), Rowman and Littlefield, 1982.

—, Teoría cuántica y el cisma en Física: Post Scriptum a La lógica de la investigación científica, Madrid, Tecnos, 2011.

—, The Open Universe: An Argument for Indeterminism from the Postscript to The Logic of Scientific Discovery, Totowa (Nueva Jersey), Rowman and Littlefield, 1982.

—, The World of Parmenides: Essays on the Presocratic Enlightenment, Londres, Routledge, 1998.

Price, Derek J., «The Cavendish Laboratory Archives», Notes and Records of the Royal Society of London 10, 1953, pp. 139-47.

Prigogine, Ilya, «Time, Irreversibility, and Structure», en The Physicist's Conception of Nature, editado por Jagdish Mehra, pp. 561-91, Dordrecht, Springer Netherlands, 1973.

Prigogine, Ilya y Isabelle Stengers, *La Nouvelle alliance: Métamorphose de la science*, 2.^a ed., París, Gallimard, 1986.

Proctor, Richard A., *Other Worlds than Ours*, Nueva York, D. Appleton and Co., 1896.

Proyecto MAC, *Informe de progreso VI*, Cambridge (Massachusetts), MIT, 1969.

Raizen, Mark G. et al., «Demons, Entropy, and the Quest for Absolute Zero», *Scientific American*, marzo de 2011.

Raymond, Eric S., *The New Hacker's Dictionary*, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1991.

Reichenbach, Hans, *Elements of Symbolic Logic*, Nueva York, Macmillan Co., 1947.

—, *Experience and Prediction: An Analysis of the Foundations and Structure of Knowledge*, 4.^a impresión (1952), Chicago, University of Chicago Press, 1938.

—, *La filosofía científica*, México, Fondo de Cultura Económica, 1953.

—, *The Rise of Scientific Philosophy*, Berkeley, University of California Press, 1951.

Reisch, George A., *How the Cold War Transformed Philosophy of Science: To the Icy Slopes of Logic*, Cambridge, Cambridge University Press, 2005.

«Relativity», *Punch* 165, 19 de diciembre de 1923, p. 591.

Reuell, Peter, «Hawking at Harvard», *Harvard Gazette*, 18 de abril de 2016.

Rhim, Won-Kyu, Alexander Pines y Justin S. Waugh, «Time-Reversal Experiments in Dipolar-Coupled Spin Systems», *Physics Review B*-3, n.º 3, 1 de febrero de 1971, pp. 684-96.

Rieger III, Charles J., «Conceptual Memory: A Theory and Computer Program for Processing the Meaning of Content of Natural Language Utterances», AIM-233, Stanford (California), Departamento de Ciencia Informática, Stanford

Artificial Intelligence Laboratory, julio de 1974.

—, «Spontaneous Computation in Cognitive Models», *Cognitive Science* 1, 1977, pp. 315-54.

Riskin, Jessica, *The Restless Clock: A History of the Centuries-Long Argument over What Makes Living Things Tick*, Chicago, University of Chicago Press, 2018.

«Rolf Landauer, a Unique Physicist, Dies», *Physics World*, 30 de abril de 1999.

Rosenblatt, Frank, «Two Theorems of Statistical Separability in the Perceptron», en *Mechanisation of Thought Processes: Proceedings of a Symposium Held at the National Physical Laboratory on 24th, 25th, 26th, and 27th November 1958*, Londres, Her Majesty's Stationery Office, 1961, pp. 419-50.

Rothstein, Jerome, *Communication, Organization, and Science*, Indian Hills (Colorado), Falcon's Wing Press, 1958.

—, «Informational Generalization of Entropy in Physics», en *Quantum Theory and Beyond: Essays and Discussions Arising from a Colloquium*, editado por Ted Bastin, Cambridge, Cambridge University Press, 1971, pp. 291-305.

—, «Information, Measurement, and Quantum Mechanics», *Science* 114, 1951, pp. 171-75.

—, «Loschmidt's and Zermelo's Paradoxes Do Not Exist», *Foundations of Physics* 4, n.º 1, marzo de 1974, pp. 83-89.

—, «Physical Demonology», *Methodos: Linguaggio e cibernetica* 11, n.º 42, 1959, pp. 99-121.

—, «Thermodynamics and Some Undecidable Physical Questions», *Philosophy of Science* 31, n.º 1, 1964, pp. 40-48.

Rule, Sheila, «Reagan Gets a Red Carpet from British», *The New York Times*, 14 de junio de 1989.

Rumelhart, David E. y James L. McClelland, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, 2 vols., Cambridge

(Massachusetts), MIT Press, 1986.

Russell, Bertrand, «My Mental Development», en *The Philosophy of Bertrand Russell*, editado por Paul Arthur Schilpp, Evanston (Illinois), Northwestern University, 1944, pp. 1-20.

Rutherford, Ernest y Frederick Soddy, «LX. Radioactive Change», London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 5, n.º 29, 1903, pp. 576-91.

Ryle, Gilbert, «Intentionality-Theory and the Nature of Thinking», *Revue Internationale de Philosophie* 27, 1973, pp. 104-5.

Sagan, Carl, *El mundo y sus demonios*, Barcelona, Planeta, 1997.

Samuelson, Paul A., «Challenge to Judgement», *Journal of Portfolio Management* 1, n.º 1, 1974, pp. 17-19.

—, *Collected Economic Papers*, vol. 5, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1986.

—, «Economics in My Time», en *Lives of Laureates*, editado por William Breit y Roger W. Spencer, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1986, pp. 56-76.

—, «Foreword», en *Louis Bachelier's Theory of Speculation: The Origins of Modern Finance*, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 2006, pp. vii-xi.

—, «Interview», en *Roads to Wisdom: Conversations with Ten Nobel Laureates in Economics*, editado por Karen Ilse Horn, Cheltenham (Reino Unido), Edward Elgar, 2009, pp. 43-56.

—, *Macroscopic Time Asymmetry of Maxwell's Demon*, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1985.

—, «Mathematics of Speculative Price», *SIAM Review* 15, n.º 1, 1973, pp. 1-42.

—, «Scientific Correspondence: The Law Beats Maxwell's Demon», *Nature* 347, n.º 6288, 6 de septiembre de 1990, pp. 24-25.

Scarre, Geoffrey, «Demons, Demonologists, and Descartes», *Heythrop Journal* 31, n.º 1, 1990, pp. 3-22.

Schmeck, Harold M., Jr., «A Scientist Gives Demons Their Due: “Aladdin’s Demon” Added to List», *The New York Times*, 1 de febrero de 1959.

Schmitz, David F., *Henry L. Stimson: The First Wise Man*, Wilmington (Delaware), Scholarly Resources, 2001.

Scholem, Gershom, «The Golem of Prague and the Golem of Rehovot», *Commentary* 41, n.º 1, enero de 1966, pp. 62-65. Reimpreso en *The Messianic Idea in Judaism and Other Essays on Jewish Spirituality*, Nueva York, Schocken Books, 1995, pp. 335-40.

Schrödinger, Erwin, «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», *Naturwissenschaften* 48, n.º 23, 29 de noviembre de 1935, pp. 807-12, 23-28, 44-49.

—, *¿Qué es la vida?*, Barcelona, Tusquets Editores, 2015.

—, *What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell* (1944), Cambridge, Cambridge University Press, 1955.

«Science on Road to Revolutionize All Existence», *The New York Times*, 28 de septiembre de 1913.

Seaborg, Glenn T., *Adventures in the Atomic Age: From Watts to Washington*, editado por Eric Seaborg, Nueva York, Farrar, Straus and Giroux, 2001.

Searle, John R., «Author’s Response», *Behavioral and Brain Sciences* 3, septiembre de 1980, pp. 450-57.

—, «Minds, Brains, and Programs», *Behavioral and Brain Sciences* 3, 1980, pp. 417-24.

—, «The Myth of the Computer», *New York Review of Books* 29, n.º 7, 29 de abril de 1982, pp. 3-6.

Selfridge, Oliver G., «Pandemonium: A Paradigm for Learning», en *Mechanisation of Thought Processes: Proceedings of a Symposium Held at the*

National Physical Laboratory on 24th, 25th, 26th, and 27th November 1958, Londres, Her Majesty's Stationery Office, 1961, pp. 511-26.

Selfridge, Oliver G. y Ulric Neisser, «Pattern Recognition by Machine», *Scientific American* 203, n.º 2, agosto de 1960, pp. 60-68.

Seow, Choong Huei, «Of Frames, Scripts, and Stories», tesis presentada al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencia Informática, cumpliendo parcialmente con los requisitos para licenciarse en Ingeniería informática por el MIT, mayo de 1990.

Serres, Michel, *The Parasite*, traducido por Lawrence R. Schehr, Mineápolis, University of Minnesota Press, 2007.

Serviss, Garrett P., *The Einstein Theory of Relativity*, Nueva York, Edwin Miles Fadman, 1923.

Shakespeare, William, *La tempestad*, Madrid, Cátedra, 2005.

—, *Macbeth*, Madrid, Cátedra, 2003.

—, *Hamlet*, Madrid, Cátedra, 2006.

Shannon, Claude E., «Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine, by Norbert Wiener», *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 37, n.º 11, noviembre de 1949, p. 1305.

—, «A Mathematical Theory of Communication», *Bell Systems Technical Journal* 27, julio y octubre de 1948, pp. 379-423, 623-56.

Shenker, Orly R., «Maxwell's Demon and Baron Munchausen: Free Will as a Perpetuum Mobile», *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 30, n.º 3, 1999, pp. 347-72.

Shleifer, Andrei y Lawrence H. Summers, «The Noise Trader Approach to Finance», *Journal of Economic Perspectives* 4, n.º 2, primavera de 1990, pp. 19-33.

Simberloff, Daniel, «A Succession of Paradigms in Ecology: Essentialism to Materialism and Probabilism», *Synthese* 43, n.º 1, enero de 1980, pp. 3-39.

«Small Wonder», Los Angeles Times, 30 de julio de 1986.

Smocovitis, Vassiliki Betty, «The 1959 Darwin Centennial Celebration in America», *Osiris* 14, 1999, pp. 274-323.

Smolin, Lee, *Einstein's Unfinished Revolution: The Search for What Lies beyond the Quantum*, Nueva York, Penguin Press, 2019.

Smoluchowski, Marian von, «Essai d'une théorie cinétique du mouvement brownien et des milieux troubles», *Bulletin international de l'académie des sciences de Cracovie: Classe des sciences mathématiques et naturelles* 7, 1906, pp. 577-602.

—, «Experimentell nachweisbare, der üblichen Thermodynamik widersprechende Molekularphänomene», *Physikalische Zeitschrift* 13, 1912, pp. 1069-80.

—, «Gültigkeitsgrenzen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie», en *Vorträge über die Kinetische Theorie der Materie und Elektrizität*, Leipzig, B.G. Teubner, 1914, pp. 89-121.

—, «Vorträge über die Kinetische Theorie der Materie and Elektrizität», en *Oeuvres de Marie Smoluchowski*, Cracovia, Jagellonian University Press, 1927, pp. 360-98.

Smyth, Henry DeWolf, *Atomic Energy for Military Purposes: The Official Report on the Development of the Atomic Bomb under the Auspices of the United States Government, 1940-1945*, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1945.

Smyth, Samuel Phillips Newman, *Through Science to Faith*, Nueva York, Charles Scribner, 1902.

Soddy, Frederick, *The Interpretation of Radium*, 4.^a ed, Nueva York, G. P. Putnam's Sons, 1922.

Solow, Robert M., «The Economics of Resources or the Resources of Economics», *American Economic Review* 64, n.º 2, 1974, pp. 1-14. Somerville, Mary, *Personal Recollections*, Londres, John Murray, 1873.

Spengler, Oswald, *Der Untergang des Abendlandes: Umriss einer Morphologie der Weltgeschichte*, Viena y Leipzig, Wilhelm Braumuller, 1918.

Steinberg, R. U., «Mr. Smarty Pants Knows», *Austin Chronicle*, 8 de febrero de 2002.

Suárez, Mauricio, *Fictions in Science: Philosophical Essays on Modeling and Idealization*, Routledge Studies in the Philosophy of Science, Nueva York, Routledge, 2008.

Sullivan, Lucy G., «Myth, Metaphor, and Hypothesis: How Anthropomorphism Defeats Science», *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences* 349, n.º 1348, 29 de agosto de 1995, pp. 215-18.

Sutherland, G. B. B. M., «Opening Address», en *Mechanisation of Thought Processes: Proceedings of a Symposium Held at the National Physical Laboratory on 24th, 25th, 26th, and 27th November 1958*, Londres, Her Majesty's Stationery Office, 1961, pp. ix-x.

Szilárd, Leó, «Creative Intelligence and Society: The Case of Atomic Research, the Background in Fundamental Science», manuscrito inédito, 31 de julio de 1946.

—, «Part II: Leó Szilárd: His Version of the Facts», *Bulletin of the Atomic Scientists* 35, n.º 3, marzo de 1979, pp. 55-59.

—, «Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen», *Zeitschrift für Physik* 53, 1929, pp. 840-56.

Tait, Peter Guthrie, *Lectures on Some Recent Advances in Physical Science with a Special Lecture on Force*, Londres, MacMillan and Co., 1976.

—, «Preface», en *Sketch of Thermodynamics*, 2.^a ed., Edimburgo, David Douglas, 1877.

—, «Zöllner's Scientific Papers», *Nature* 17, 1878, pp. 420-22.

Thiele, Just Mathias, *Danske Folkesagn*, Copenhagen, A. Seidelin, 1819-1823.

Thomson, James, *Collected Papers in Physics and Engineering*, Cambridge,

Cambridge University Press, 1912.

—, «On Public Parks in Connexion with Large Towns, with Suggestion for the Formation of a Park in Belfast», en *Collected Papers in Physics and Engineering*, Cambridge, Cambridge University Press, 1912, pp. 464-72.

—, «Theoretical Considerations on the Effect of Pressure in Lowering the Freezing Point of Water», *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 16, n.º 5, 1849, pp. 575-80.

Thomson, William, «The Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* 8, 1875, pp. 325-34.

—, «Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», *Nature* 9, 1874, pp. 441-44.

—, «On the Age of the Sun's Heat», en *Popular Lectures and Addresses*, vol. 1, Londres, MacMillan and Co., 1891, pp. 356-75. Originalmente publicado en *Macmillan's Magazine* 5, 5 de marzo de 1862, pp. 388-93.

—, «The Sorting Demon of Maxwell», *Popular Lectures and Addresses*, vol. 1, pp. 144-48, Londres, MacMillan and Co., 1891.

Thurston, John B., «Devaluing the Human Brain», *Saturday Review of Literature*, 23 de abril de 1949, pp. 24-25.

Tillman, Frank y Bertrand Russell, «Language, Information, and Entropy», *Logique et Analyse* 30, 1965, pp. 126-40.

Trotsky, León, *Soviet Economy in Danger*, Nueva York, Pioneer Publishers, 1933.

Tu, Yuhai, «The Nonequilibrium Mechanism for Ultrasensitivity in a Biological Switch: Sensing by Maxwell's Demons», *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, n.º 33, 19 de agosto de 2008, pp. 11737-41.

Turing, Alan M., «Computing Machinery and Intelligence», *Mind* 59, n.º 236, octubre de 1950, pp. 433-60.

Tyson, Donald, *The Demonology of King James: Includes the Original Text of Daemonologie and News from Scotland*, Woodbury (Minnesota), Llewellyn,

2011.

Vaihinger, Hans, *Die Philosophie des Als Ob: System der theoretischen, praktischen, und religiösen Fiktionen der Menschheit auf Grund eines idealistischen positivismus*, Berlín, Von Reuther & Reichard, 1911.

Voltaire, *El siglo de Luis XIV*, Madrid, Editorial Verbum, 2020.

—, *Le Siècle de Louis XIV*, Berlín, C.-F. Henning, 1751.

Waddington, Conrad Hal, «The Basic Ideas of Biology», en *Towards a Theoretical Biology*, editado por Conrad Hal Waddington, Chicago, Aldine Publishing Co., 1968, pp. 1-32.

—, «Evolutionary Adaptation», *Perspectives in Biology and Medicine* 2, n.º 4, 1959, pp. 379-401.

Waldrop, M. Mitchell, «Soar: A Unified Theory of Cognition?», *Science* 241, 15 de julio de 1988, pp. 296-98.

—, «Toward a Unified Theory of Cognition», *Science* 241, n.º 4861, 1 de julio de 1988, pp. 27-29.

Wallace, Alfred Russel, *The Action of Natural Selection on Man*, New Haven (Connecticut), C. Chatfield & Co., 1871.

—, *Contributions to the Theory of Natural Selection: A Series of Essays*, 2.^a ed., Londres, Macmillan and Co., 1871.

Watson, David Lindsay, *Scientists Are Human*, Londres, Watts, 1938.

Watt, Ian, «Order and Disorder in the Arts and Sciences: A Historical Retrospect», en *Disorder and Order: Proceedings of the Stanford International Symposium*, 14-16 de septiembre de 1981, editado por Paisley Livingston, Saratoga (California), Anma Libri, 1984, pp. 34-40.

Weinberg, Alvin M., «Are Breeders Still Necessary?», *Proceedings of the American Philosophical Society* 130, n.º 3, septiembre de 1986, pp. 343-53.

—, «Global Effects of Man's Production of Energy», *Science* 186, n.º 4160, 18

de octubre de 1974, p. 205.

—, «A Nuclear Power Advocate Reflects on Chernobyl», *Bulletin of the Atomic Scientists* 43, n.º 1, agosto/septiembre de 1986, pp. 57-60.

—, «On the Relation between Information and Energy Systems: A Family of Maxwell's Demons», *Interdisciplinary Science Reviews* 7, 1982, pp. 47-52. Reimpreso con el título «A Family of Maxwell's Demons», *Nuclear Reactions: Science and Trans-Science*, 1992.

—, «Social Institutions and Nuclear Energy», *Science* 177, n.º 4043, 7 de julio de 1972, pp. 27-34.

—, «Social Institutions and Nuclear Energy: II», *Journal of Nuclear Science and Technology* 32, n.º 11, noviembre de 1995, pp. 1071-80.

Weinert, Friedel, *Demons of Science: What They Can and Cannot Tell Us about Our World*, Suiza, Springer, 2018.

Weizenbaum, Joseph, *Computer Power and Human Reason: From Judgment to Calculation*, San Francisco, W. H. Freeman, 1976.

Wells, H. G., «The Time Machine», *New Review* 12, enero-junio de 1895, pp. 98-112, 207-21, 329-43, 453-22, 577-88.

Wiener, Norbert, *Collected Works with Commentaries*, editado por P. Masani, vol. 4, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1985.

—, «Cybernetics», *Scientia* 87, 1952, pp. 233-5.

—, *Cibernética: o El control y comunicación en animales y máquinas*, Barcelona, Tusquets Editores, 1998.

—, *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Nueva York, John Wiley & Sons, 1948; 2.^a ed., Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1961.

—, «Entropy and Information», *Proceedings of the Symposia of Applied Mathematics of the American Mathematical Society* 2, 1950. Publicado también en *Mathematical Review* 11, 1950. Reimpreso en Norbert Wiener, *Collected*

Works with Commentaries, editado por P. Masani, vol. 4, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 1985.

—, *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*, Londres, Free Association, 1989.

—, «Men, Machines, and the World About», en *Medicine and Science*, editado por Iago Galdston, Nueva York, International Universities Press, 1954.

—, «Time, Communication, and the Nervous System», *Annals of the New York Academy of Science* 50, 1948, pp. 197-220.

Wigner, Eugene Paul, «Remarks on the Mind-Body Question», en *The Scientist Speculates*, editado por I. J. Good, 1961; reimpresso en *Symmetries and Reflections: Scientific Essays of Eugene P. Wigner*, Bloomington, Indiana University Press, 1967, pp. 171-84.

Williams, George C., *Adaptation and Natural Selection: A Critique of Some Current Evolutionary Thought*, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 1966.

Yourgrau, Palle, *Death and Nonexistence*, Oxford, Oxford University Press, 2019.

Zermelo, Ernst, «Ueber einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie», *Annalen der Physik* 293, n.º 3, 1896, pp. 485-94.

Zöllner, Friedrich, «VI. On Space of Four Dimensions», *Quarterly Journal of Science* 8, abril de 1878, pp. 227-37.

—, «Thomson's Daemonen und die Schatten Plato's», en *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Leipzig, L. Staakmann, 1878, pp. 710-32.

—, *Transcendental Physics: An Account of the Experimental Investigation from the Scientific Treatises of Johann Carl Friedrich Zöllner*, Boston, Banner of Light Publishing, 1901.

Zurek, Wojciech H., «Algorithmic Randomness, Physical Entropy, Measurements, and the Demon of Choice», en *Feynman and Computation*, editado por A.J.G. Hey, Reading, Perseus Books, 1999, pp. 393-410.

—, «Thermodynamic Cost of Computation, Algorithmic Complexity, and the Information Metric», *Nature* 341, 1989, p. 119.

Zyga, Lisa, «Maxwell's Demons May Drive Some Biological Systems», *PhysOrg*, 10 de septiembre de 2008, <https://phys.org/news/2008-09-maxwell-demons-biological.html>.

NOTAS

Todas las traducciones de material previamente no traducido son mías. Algunas citas se han abreviado sin puntos suspensivos y algunas mayúsculas se han cambiado. Las citas de las primeras ediciones se identifican por parte, apartado, escena o acto.

PRÓLOGO

1Born, *My Life and My Views* , pp. 202-3.

INTRODUCCIÓN

1Génesis 3, 6.

2Según la edición de 2014 del Oxford English Dictionary , «demon, n. y adj. (“demonio”) parece provenir de Descartes, que habló de un demonio maligno poderoso u omnipotente que intentaba confundirle respecto a la naturaleza de la realidad y la existencia: véase Descartes, *Meditationes* (1641), i. §xii».

3Leff y Rex, «Overview», en *Maxwell’s Demon* , p. 12; Leff y Rex, *Maxwell’s Demon* , p. 2. El físico Friedel Weinert reconoce la utilidad de los demonios como «modelos conceptuales» en Weinert, *Demons of Science*, pp. 3, 5. Para una descripción popular de los demonios en la física y la biología, véase Davies, *The Demon in the Machine*.

4Sagan, *El mundo y sus demonios* , p. 194.

5Ibid ., p. 66.

6Ayer, «Editor's Introduction», p. 14.

7Este dicho suele atribuirse a Louis Pasteur, en una conferencia en la Universidad de Lille del 7 de diciembre de 1854: «Dans les champs de l'observation le hasard ne favorise que les esprits préparés».

8Holton, «On the Art of Scientific Imagination». En el furor por entender la ciencia como una actividad que trasciende las artimañas de la ficción, la seducción de la poesía, las vicisitudes de la política, la imprecisión de los sentimientos y la intolerancia de la religión, la mayoría de los académicos han dejado de estudiar el papel de la imaginación. En los raros casos en que se toma en consideración, se suele considerar que pertenece al «contexto del descubrimiento», limitado a esos oscuros (y mayormente míticos) momentos eureka de inspiración puntual, cuando a las mentes preparadas se les presenta de repente la idea correcta, como de la nada. Para el «contexto de descubrimiento» comparado con el «contexto de justificación», véase Reichenbach, *Experience and Prediction*.

9La mayoría de las explicaciones académicas sobre ciencia y tecnología continúan concibiendo la imaginación como una actividad que precede al trabajo científico y que es más evidente en las disciplinas externas a la ciencia, como son la ciencia ficción y la literatura, desde donde se nota su impacto. Un ejemplo de esta postura se halla en el argumento de que «a menudo la innovación tecnológica sigue los pasos de la ciencia ficción, retrasando la imaginación del autor durante décadas». Mis tesis contrastan con ese método, pues estudian el uso de la imaginación en la ciencia durante su realización, no es previa ni externa a ella, sino simultánea e inherente. Véase Jasanoff, «Future Imperfect», p. 1.

10 El demonio de Morton lleva el nombre del geofísico y excreacionista Glenn Morton.

11 Mateo 25, 31-46.

12 Valórese el genio Marid.

13 Véase Grimm, *Deutsche Mythologie* ; Thiele, *Dänische Volkssagen* ; y Carus, *History of the Devil and the Idea of Evil* , p. 251.

14 En el cuento de los hermanos Grimm, al pobre zapatero lo ayudan los elfos, no los demonios. Los tapices de los gobelinos recibían ese nombre porque se sospechaba que los goblins (duendes) ayudaban con ese trabajo tan complejo.

15 Las asombrosas habilidades de los genios para desplazarse figuran en *Las mil y una noches*, texto en el que aparecen alfombras mágicas, y en el poema iraní *Shāhnāmé*, en el que los genios llevan al rey Jamshid en su trono.

16 El Evangelio de Lucas relata que el diablo llevó a Jesús a un monte elevado y «le mostró en un momento todos los reinos de la tierra». En el Evangelio de Mateo, Satanás transporta a Jesús sin esfuerzo, «lo coloca en el pináculo del templo» y «lo lleva a un monte muy alto». Después de reflexionar sobre «si el movimiento del ángel es temporal o instantáneo», santo Tomás de Aquino se decantó por la primera opción. Aquino, *Summa Theologiae*, parte 1, cuestión 53, artículo 3.

17 Para conocer la historia de cómo los míticos gigantes teutónicos del norte se transformaron en demonios cristianos, véase Carus, *History of the Devil and the Idea of Evil*, p. 250. Para el enorme tamaño del diablo, véase el comentario de Tomás de Aquino sobre Job, cap. 40.

18 Véase Caesarius von Heisterbach, *Dialogus Miraculorum*, hacia 1245.

19 Un ejemplo es Paulus Wann, *Quadragesimale siue tractatulus magistri*, hacia 1512.

20 «Son los más astutos, como veremos; sus habilidades para hacer malabarismos con la información son tan superlativas que aturden la mente». Loewenstein, *The Touchstone of Life*, p. 5.

1. EL GENIO MALIGNO DE DESCARTES

1Descartes, *Discurso del método*, 1637, parte 1.

2Descartes, *Meditaciones metafísicas*, 1641, primera meditación.

3Descartes, Los principios de la filosofía , parte IV, sección 203.

4Descartes, Meditaciones metafísicas , segunda meditación.

5Descartes a los Illustris Academiae Lugduno-Batavae, 4 de mayo de 1647, colección especial de la Biblioteca de la Universidad de Leiden, Países Bajos.

6Ibid .

7Ibid .

8Descartes, Meditaciones metafísicas , segunda meditación.

9Ibid .

10 Ibid .

11 Descartes, Meditaciones metafísicas , primera meditación.

12 Nadler, «Descartes's Demon and the Madness of Don Quixote».

13 Descartes, Discurso del método , parte 1.

14 Cervantes Saavedra, El ingenioso hidalgo Don Quixote de la Mancha , cap. XLVII, sin editor.

15 Ibid , p. 284.

16 Ibid , cap. XLVII, sin editor.

17 Shakespeare, Hamlet , acto III, escena 2. Shakespeare, sus personajes y su público tenían buenas razones para dudar del testimonio de los sentidos, incluido el propio, sobre todo en lo tocante a aquellos que presentaban criaturas de leyenda. Torturado por no saber si debe confiar en la horrible aparición que acaba de presenciar, Hamlet, que se acaba de quedar huérfano, idea una forma imaginativa de probar su veracidad. Encarga una representación teatral para el disfrute de la corte, El asesinato de Gonzago . Tiene muchas esperanzas depositadas para la noche. Es una obra de teatro sobre un asesinato con veneno. Según su reflexión: «La obra de teatro es el cebo con el que atraparé la conciencia del rey». Mediante el uso de la ficción, espera poder llegar a la

verdad real sobre el fantasma y, por deducción, aprender más detalles sobre la prematura muerte de su padre: «Es un fantasma honesto, si me permitís decirlo». Para Shakespeare, la obra dentro de la obra sirve como un experimento que transforma el teatro de la corte en una especie de laboratorio, aunque más humanista que científico. Se usa no solo para poner a prueba al fantasma de Hamlet y atrapar una conciencia culpable, sino para explorar cómo se forman las creencias en general.

18 Grafton, «The Devil as Automaton»,

19 Shakespeare, Macbeth , acto V, escena 5.

20 Shakespeare, La tempestad , acto I, escena 2.

II. LA INTELIGENCIA DE LAPLACE

1Gillispie, Pierre-Simon Laplace, 1749-1827 , p. 271.

2Caws, The Philosophy of Science , p. 300.

3Ehrenberg, Dice of the Gods , p. 26.

4Georgescu-Roegen, «Energy and Economic Myths», p. 347.

5Margenau, «Meaning and Scientific Status of Causality», p. 136.

6Laplace, «Recherches, sur l'intégration des équations différentielles aux différences finies...», sección XXV (repimpreso en Laplace, Oeuvres complètes , pp. 144-45).

7Laplace, Essai philosophique sur les probabilités , 1814, p. 2.

8Livingston, «Introduction», en Disorder and Order , p. 26.

9Laplace, Essai philosophique sur les probabilités , p. 4.

10 Locke, «Of the Conduct of the Understanding», p. 9.

- 11 Locke, «A Discourse of Miracles», p. 231.
- 12 Napoléon I, «Consuls provisoires», p. 330.
- 13 Gillispie, Pierre-Simon Laplace, 1749-1827 , p. 177.
- 14 Arago, «Notice scientifique sur la tonnerre», p. 475.
- 15 Laplace, «Un mémoire sur l'équation séculaire de la lune», pp. 248-49.
- 16 Laplace fechaba el comienzo de la historia cinco mil años antes, pues trabajaba con una escala bíblica ligeramente revisada. Él situaba el origen de la Tierra unos 1.826.213 días antes de su tiempo y calculaba la probabilidad de que el sol no saliera el día siguiente como de 1 contra 4.560 millones.
- 17 Laplace, Essai philosophique sur les probabilités , p. 6.
- 18 Arnauld y Nicole, Logique de Port-Royal , p. 389.
- 19 Fourier, Théorie analytique de la chaleur , p. iv.
- 20 Ibid ., pp. 9, xiv-xv.
- 21 Citado en Menabrea, «Sketch on the Analytical Engine Invented by Charles Babbage», p. 667.
- 22 Babbage, The Ninth Bridgewater Treatise: A Fragment , 1.^a ed., p. 112.
- 23 Ibid ., pp. 173-174.
- 24 Ibid ., p. 111.
- 25 Ibid ., pp. 114-115.
- 26 Ibid ., p. 113.
- 27 Babbage, The Ninth Bridgewater Treatise: A Fragment , 2.^a ed., p. 111.
- 28 Babbage, The Ninth Bridgewater Treatise: A Fragment , 1.^a ed., p. 118.
- 29 Ibid ., p. 116.

30 Mary Somerville, *Personal Recollections* , Londres, Murray, 1873, p. 140.

31 Ada Lovelace a Charles Babbage, 10 de julio de 1843, British Library, Add MS 37192.

32 Menabrea, «Notions sur la machine analytique de M. Charles Babbage», pp. 353, 373, 375.

33 Menabrea, «Sketch on the Analytical Engine Invented by Charles Babbage», pp. 670, 675, 89.

34 Ibid ., p. 675.

35 Lovelace, «Notes by the Translator», p. 697.

36 Wells, «The Time Machine», p. 100.

37 Ibid .

III. EL DEMONIO DE DARWIN

1Charles Robert Darwin a Charles Babbage, [1838], British Library, Add 37191: 81, carta n.º DCPLETT-351.

2Darwin a Babbage, 19 [de febrero de 1839-agosto de 1842], British Library, Add 37191: 299, carta n.º DCP-LETT-479.

3Darwin, «Essay of 1842», sección ii, p. 6.

4Darwin, «Essay of 1844», sección ii, p. 85.

5Darwin a Asa Gray, desde Down Bromley (Kent), 5 de septiembre [de 1857], Archives of the Gray Herbarium, Universidad Harvard, carta n.º DCP-LETT-2136 (8 pp.).

6Riskin, *The Restless Clock* , p. 224.

7 Darwin, «Essay of 1844», sección ii, p. 85, n.º 1.

8 Darwin a Charles Lyell, desde Ilkley (Yorkshire), 11 de octubre [de 1859], American Philosophical Society, carta n.º DCP-LETT-2503 (22 pp.).

9 Huxley, «The Genealogy of Animals», p. 110.

10 Ibid .

11 Según él, «el mundo es de los organismos en general. Igual que cada organismo es de las moléculas que lo componen». Huxley, «The Genealogy of Animals», p. 115.

12 Ibid .

13 Alfred Russel Wallace a Darwin, desde Hurstpierpoint, 2 de julio de 1866, Biblioteca de la Universidad de Cambridge, DAR 106: B33-8, carta n.º DCP-LETT-5140 (12 pp.).

14 Wallace contestó a las críticas del artículo de Paul Janet de 1866, «The Materialism of the Present Day», pp. 618-19.

15 Wallace a Darwin, 2 de julio de 1866.

16 Wallace, The Action of Natural Selection on Man , p. 43.

17 Ibid ., p. 53.

18 Karl Pearson cogió prestada esta frase en The Grammar of Science .

19 Wallace, Contributions to the Theory of Natural Selection , p. 372.

IV. EL DEMONIO DE MAXWELL

1 Mahon, The Man Who Changed Everything .

2 Einstein, «Maxwell's Influence on the Development of the Conception of

Physical Reality», p. 66.

3Feynman, Leighton y Sands, *The Feynman Lectures on Physics* , 2, p. 11.

4Peter Guthrie Tait a James Clerk Maxwell, 6 de diciembre de 1867, Add. MSS 7655, I, a/4, Biblioteca de la Universidad de Cambridge; reimpresso en Harman, ed., *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell* , vol. 2, p. 328.

5Maxwell a Tait, 11 de diciembre de 1867, reimpresso en Maxwell, *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell* , vol. 2, p. 332.

6Maxwell, *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell* , vol. 3, pp. 185-86.

7Maxwell a John William Strutt, 6 de diciembre de 1870, reimpresso en Maxwell, *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell* , vol. 2, p. 583.

8Maxwell, *Theory of Heat* , pp. 308-9.

9Ibid ., p. 238.

10 William Thomson, «The Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* 8, 1875; William Thomson, «Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», *Nature* 9, 1874.

11 Thomson, «Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», pp. 442-43; Thomson, «The Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», p. 329.

12 Citado en Gooday, «Sunspots, Weather, and the Unseen Universe».

13 Thomson, «Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», p. 442.

14 Ibid .

15 Ibid .

16 Thomson, «The Sorting Demon of Maxwell», p. 145.

17 Thomson, «The Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», p. 330; Thomson, «Kinetic Theory of the Dissipation of Energy», p. 443.

18 Thomson, «The Sorting Demon of Maxwell», pp. 144, 148.

19 Maxwell, Theory of Heat , p. 308.

20 Maxwell, «Molecules», p. 438.

21 Thomson, «The Sorting Demon of Maxwell», p. 145.

22 Thomson, «Theoretical Considerations on the Effect of Pressure in Lowering the Freezing Point of Water», p. 575. Véanse también las observaciones de James Thomson en Cambridge and Dublin Mathematical Journal , noviembre de 1850.

23 John R. McClean a James Thomson, Walsall, 15 de noviembre de 1841, reimpresso en Thomson, Collected Papers in Physics and Engineering, pp. xx-xxi.

24 Texto leído ante la Belfast Social Inquiry Society el 2 de marzo de 1852, reimpresso en Thomson, «On Public Parks in Connexion with Large Towns», p. 469.

25 Thomson, «On the Age of the Sun's Heat», p. 375.

26 «Entre otras razones podemos aducir que, por cada pie cuadrado de superficie, el sol irradia unos escuetos 7.000 caballos de potencia de calor. Un trozo de carbón que ardiera a un ritmo de unos 200 gramos por segundo generaría la misma cantidad. También se estima (Rankine, Prime Movers, p. 285, ed. 1852) que, en los hornos de las locomotoras, el carbón se quema a unos 600-800 gramos por minuto y pie cuadrado de rejilla. Por lo tanto, por cada área de superficie igual, el sol irradia calor a una tasa apenas 15-45 veces mayor que la que genera calor en el horno de una locomotora». Thomson, «On the Age of the Sun's Heat», pp. 368-69.

27 Tait, Lectures on Some Recent Advances in Physical Science with a Special Lecture on Force , p. 118.

28 Ibid ., p. 119.

29 Ibid .

30 Ibid ., p. 120.

31 Garnett, «Energy», en Encyclopædia Britannica , p. 210. La descripción también aparece en la edición de la enciclopedia de 1902.

V. EL DEMONIO DEL AZAR

1Bois-Reymond, Über die Grenzen des Naturerkennens , 1872. Una segunda edición apareció ese mismo año, una tercera en 1873 y una cuarta en 1876. En 1882 salió la quinta edición de la obra junto con el «Sieben Welträthseln» en Monatsberichte der Berliner Akademie , 1880, en Deutschen Rundschau 28, 1881. Se volvió a publicar en 1886 en un volumen sobre las conferencias de Bois-Reymond. Una traducción al francés apareció en Revue scientifique de la France et de l'étranger 14, 1874, y otra en 1882. El término Geist se tradujo como «experto vidente» en inglés en Popular Science Monthly 5, 1874, donde volvió a aparecer en 1882. La obra de Bois-Reymond se publicó en italiano en Giornale internazionale delle Scienze Mediche 5, 1883.

2Nernst, Zum Gültigkeitsbereich der Naturgesetze , p. 15.

3Cassirer, Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik , p. 14.

4Bois-Reymond, «The Limits of Our Knowledge of Nature», p. 18.

5Ibid ., p. 18.

6Ibid ., pp. 18, 20.

7Ibid ., pp. 18, 23 y 29.

8Es regnet, wenn es regnen will,

Und regnet seinen Lauf;

Und wenn's genug geregnet hat,

So hört es wieder auf.

9Helmholtz, «Wirbelstürme und Gewitter», p. 139.

10 Ibid .

11 Ibid ., p. 140.

12 Ibid ., p. 163.

13 Neesen, «W. Thomson. Kinetic theory of the dissipation of energy», pp. 673-4. «Wessen (Maxwell's Dämonen) die Fähigkeit haben, jedes einzelne Molecül in jedem Augenblick zu fassen».

14 Tait, Lectures on Some Recent Advances in Physical Science with a Special Lecture on Force , pp. 118-119.

15 Clausius, «Abschnitt XI: Discussionen über die mechanische Behandlung der Wärme und Elektrizität», p. 316, en una cita de Tait, «Preface», p. xviii.

16 Zöllner, «Thomson's Daemonen und die Schatten Plato's». Zöllner sostenía que Thomson y los entusiastas de los demonios a su alrededor estaban haciendo deducciones similares a las de los prisioneros de Platón, que solo podían ver el mundo exterior a través de las sombras reflejadas. Según Zöllner, sus teorías eran esbozos simplificados de un mundo ulterior mucho más complejo y menos entendido. ¿Cómo de profundo era ese mundo más allá de nuestros sentidos y apenas abarcable por las teorías científicas contemporáneas? Para Zöllner, a quien siempre le interesaron los experimentos psíquicos y el espiritismo, su profundidad no podía ceñirse a las tres dimensiones del espacio. En «Thomson's Daemonen und die Schatten Plato's», se refiere a la criatura en cuestión con el nombre de quien realmente la bautizó: Thomson.

17 Tait, «Zöllner's Scientific Papers», p. 421. Tait comentó la posible existencia de «seres (evidentemente, ni los Dämonen de Thomson ni die Schatten Plato's , pues esos son acientíficos y, por ende, imposibles) en un espacio de cuatro dimensiones.

18 Zöllner, «VI. On Space of Four Dimensions», p. 231. Republicado como primer capítulo en Zöllner, Transcendental Physics , pp. 31-45.

19 Planck, «Verdampfen, Schmelzen, und Sublimieren», p. 475, n.º 1. Planck citaba la página 321 de la traducción alemana de Theory of Heat de Maxwell, a cargo de Felix Auerbach en 1877, así como la página 373 de la traducción de Friedrich Neesen en 1878.

20 Loschmidt, «Über den Zustand des Wärmegleichgewichts eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft», 1876, p. 139; seguido de Loschmidt, «Über den Zustand des Wärmegleichgewichts eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft», 1877, y Loschmidt, «Über den Zustand des Wärmegleichgewichts eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft», 1878.

21 Loschmidt, «Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft», 1876, p. 135. Véase también Loschmidt, «Der zweite Satz der mechanischen Wärmetheorie».

22 Gibbs analizó la «duda trascendental que surge respecto a cualquier caso de movimiento dinámico» de la recurrencia eterna: «Si el sistema considerado volverá al cabo de un tiempo a su fase inicial o, en caso de no volver exactamente a esa fase, si lo hará en el grado necesario de aproximación en el transcurso de un tiempo suficientemente largo». Sin aludir a los demonios, Gibbs concluyó que era posible, aunque extremadamente improbable. Aun así, estudiar esa mera posibilidad resultó ser muy atractivo. Véase Gibbs, *Elementary Principles of Statistical Mechanics* , p. 164.

23 Aforismo 341, en Nietzsche, *Die fröhliche Wissenschaft* , p. 254. Estos temas también se exploran en *Der Wille zur Macht* .

24 Aforismo 125, en Nietzsche, *Die fröhliche Wissenschaft* , pp. 153-55.

25 Ibid .

26 Particularmente relevantes por esos años fueron los experimentos y cálculos de Albert A. Michelson, autor del famoso experimento de Michelson y Morley.

27 Dixon y Joly, «On the Ascent of Sap».

28 Pearson, *The Grammar of Science* , p. 100, n.º 2.

29 Adams dedicó el capítulo 31 de su autobiografía a *The Grammar of Science* de Pearson, donde escribió: «La teoría cinética del gas es una afirmación del caos final. Dicho llanamente, el caos era la ley de la naturaleza; el orden era el sueño del hombre». Adams, *The Education of Henry Adams* , pp. 451, 57.

30 «The rule of Phase Applied to History», original de alrededor de 1909,

publicado en Adams, «The Rule of Phase Applied to History», p. 279.

31 Henry Adams a Cecil Spring Rice, 11 de noviembre de 1897, en Adams, *Letters of Henry Adams (1892-1918)* , pp. 135-36.

32 Henry Adams a Brooks Adams, 2 de mayo de 1903, en Cater, *Henry Adams and His Friends* , pp. 545-46, 45. Más tarde, las restricciones de la termodinámica sobre la democracia y el gobierno dispararon el pesimismo de Henry Adams: «Como energía, [el hombre] tiene una sola función dominante: acelerar la operación de la segunda ley de la termodinámica. En la medida en que su razón actúa como una energía, es una invención milagrosa para este propósito que inspira asombro y casi adoración. Pero si nos atenemos al rigor y a la razón, no funciona. Es solo un mecanismo, la energía de la naturaleza que hemos acordado llamar Voluntad, que se encuentra detrás de la razón, hace el trabajo, ¡y degrada la energía al hacerlo!». Adams, *A Letter to American Teachers of History*, p. 155.

33 He traducido fingierte como «inventar». Véase Boltzmann, «Zur Erinnerung an Josef Loschmidt», p. 231.

34 Boltzmann, *Vorlesungen über Gastheorie* , p. 254.

35 Einstein a Mileva Marić, [¿13? de septiembre de 1900], Milán. Salvo que se especifique lo contrario, las cartas escritas por o para Einstein se citan de *The Collected Papers of Albert Einstein* .

VI. LOS DEMONIOS EN EL MOVIMIENTO ALEATORIO

1Arrhenius, «Award Ceremony Speech», p. 479.

2Born, «Einstein's Statistical Theories», p. 166.

3Einstein leyó *Ciencia e hipótesis de Poincaré*, publicado originalmente en 1902, el cual incluía una versión del texto de Poincaré para el Congreso de 1900 con un grupo de amigos que se hacían llamar «los atletas olímpicos». La traducción al inglés se refiere al «demonio de Maxwell» en lugar de «el demonio

imaginario de Maxwell». Poincaré, *Science and Hypothesis* , p. 179.

4Gouy, «Note sur le mouvement brownien», 561.

5Ibid ., p. 564.

6Jevons, «On the Movement of Microscopic Particles Suspended in Liquids», p. 174.

7Ibid ., p. 174.

8Ibid ., p. 175.

9Se trata del microscopista británico John B. Dancer. Ibid ., p. 171.

10 Ibid ., p. 180.

11 Ibid ., p. 171.

12 Ibid ., p. 176.

13 Poincaré, «Le Mécanisme et l'expérience», p. 534. Cuando Poincaré publicó sus conferencias sobre termodinámica, optó por evitar por completo el incipiente programa molecular de Maxwell y compañía, dejando «completamente de lado la explicación mecánica del principio de Clausius que el señor Tait llama “la verdadera (es decir, la estadística) base de la segunda ley de la termodinámica”». Poincaré se defendió en las páginas de *Nature*, hablando sin tapujos: «Deseo alejarme por completo de todas las hipótesis moleculares, por ingeniosas que sean». Poincaré, «Poincaré's “Thermodynamics”».

14 Poincaré, «Le Mécanisme et l'expérience», pp. 536-37.

15 Poincaré comenzó a investigar estas cuestiones en «Sur les équations de la dynamique et le problème des trois corps».

16 Poincaré, «Le Mécanisme et l'expérience», p. 536.

17 Ibid .

18 El trabajo de Zermelo sobre este tema se describe en Zermelo, «Ueber einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie». Para investigaciones

posteriores sobre el demonio de Loschmidt y el demonio de Zermelo, véase Rothstein, «Loschmidt's and Zermelo's Paradoxes Do Not Exist», y Rhim, Pines y Waugh, «Time-Reversal Experiments in Dipolar-Coupled Spin Systems».

19 «On croirait voir à la oeuvre le demon de Maxwell». Poincaré, «Relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique», p. 27; Poincaré, *Science and Hypothesis* , p. 179.

20 Poincaré, «Relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique», p. 27.

21 Ibid . Poincaré, *Science and Hypothesis* , p. 179.

22 Conferencia pronunciada en la Exposición Universal de San Luis, San Luis (Misuri), 24 de septiembre de 1904. Reimpreso como Poincaré, «The Principles of Mathematical Physics», en *Congress of Arts and Science, Universal Exposition, St. Louis, 1904 (1905)*; Poincaré, «The Principles of Mathematical Physics», *The Monist* (1905); Poincaré, *La Valeur de la science* (1905) y, más tarde, *La Valeur de la science* , 1958, pp. 97-98.

23 Poincaré, *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques professées à la Sorbonne* , pp. 252-253.

24 Campbell-Swinton, «Scientific Progress and Prospects», p. 193.

25 Carr, «Life and Logic», pp. 490-91.

26 Ibid ., p. 486.

27 Einstein, «Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geförderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Tielchen», p. 549; Einstein, «On the Movement of Small Particles Suspended in Stationary Liquids Required by the Molecular-Kinetic Theory of Heat», p. 123.

28 Desde que Pearson planteó su pregunta, los investigadores estuvieron más de una década trabajando a destajo para tratar de comprender casos adicionales y particulares (incluidos casos con pequeños valores n y dimensiones adicionales) con el fin de comprender más los procesos estocásticos. Pearson, «The Problem of the Random Walk».

29 Edgeworth, «On the Use of the Theory of Probabilities in Statistics Relating to Society».

30 Perrin, «Mécanisme de l'électrisation de contact et solutions colloïdiales», Journal de chimie physique 2 y 3.

31 Oseen, «Award Ceremony Speech», pp. 135-36.

32 Perrin, «Mouvement brownien et réalité moléculaire», pp. 11-12.

33 Perrin, Atoms , p. 85.

34 Ibid ., p. 87.

35 Ibid ., p. 87, n.º 1.

36 Pais, «Subtle Is the Lord ...»: The Science and the Life of Albert Einstein , p. 100.

37 Smoluchowski, «Essai d'une théorie cinétique du mouvement Brownien et des milieux troubles», p. 600.

38 Smoluchowski, «Gültigkeitsgrenzen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie», p. 396.

39 Ibid ., p. 390, n.º 1.

40 Smoluchowski, «Experimentell nachweisbare, der üblichen Thermodynamik widersprechende Molekularphänomene», p. 250.

41 Ibid ., p. 247.

42 Ibid ., p. 248.

43 Smoluchowski, «Gültigkeitsgrenzen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie», p. 396.

44 Ibid ., pp. 396-97.

45 Ibid ., p. 362. Véase también Smoluchowski, «Vorträge über die Kinetische Theorie der Materie and Elektrizität».

VII. LOS FANTASMAS DE EINSTEIN

1Einstein, «Autobiographical Notes», pp. 15, 53.

2Ibid ., p. 5.

3Ibid ., p. 53.

4Pearson, *The Grammar of Science* , 2.^a ed., p. 540.

5Bernstein, *Aus dem reiche der naturwissenschaft* , pp. 151-52; Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher* , volumen suplementario, p. 100.

6[Eberty], *The Stars and the Earth* , pp. 48-49.

7Ibid ., pp. 36-37, 50.

8Ibid ., pp. 35, 49.

9Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher* , vol. 11, p. 1.

10 Ibid .; Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher* , vol. 4, p. 106.

11 Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher* , volumen suplementario, p. 101. Para otros ejemplos históricos como el de Moisés, Abraham, Mahoma, Colón, Lutero y la revolución de marzo de 1848, véase Bernstein, *Aus dem reiche der naturwissenschaft* , p. 153.

12 Bernstein, *Aus dem reiche der naturwissenschaft* , p. 151.

13 Ibid ., pp. 25-26.

14 Ibid ., p. 32.

15 Hill, «Recommendatory Letters», p. 8.

16 Poincaré, «Le hasard», reimpresso en Poincaré, *Science and Method* , p. 71.

17 Poincaré, *Science and Method* , p. 71.

18 Ibid .

19 Poincaré, «The Principles of Mathematical Physics», p. 612; reimpresso en Poincaré, *The Value of Science* , p. 100.

20 Einstein, «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik* 17, 1905, p. 912; reimpresso en Einstein, «On the Electrodynamics of Moving Bodies», p. 162.

21 Einstein, «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», p. 892; reimpresso en Einstein, «On the Electrodynamics of Moving Bodies», p. 141.

22 Einstein, «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», p. 903; reimpresso en Einstein, «On the Electrodynamics of Moving Bodies», p. 152.

23 Flammarion, *Stories of Infinity* , pp. 15, 47.

24 Ibid ., p. 253 («un pájaro de las regiones superiores»); ibid ., p. 240 («hojas muertas»).

25 Ibid ., p. 252.

26 Ibid ., p. 160.

27 Ibid ., p. 33.

28 Ibid ., p. 41.

29 Ibid ., p. 43.

30 Ibid ., p. 98.

31 Ibid ., p. 76.

32 Proctor, *Other Worlds than Ours* , p. 312.

33 Ibid ., pp. 317-8.

34 Ibid ., p. 318.

35 Ibid ., p. 313.

36 Ibid ., p. 314.

37 Pohle, Die Sternenwelten und ihre Bewohner , pp. 187-88.

38 Ibid ., p. 188.

39 Einstein, «Zum Relativitätsproblem», p. 345.

40 «Mais de même qu'on n'a jamais pu me faire croire à revenants, de même je ne crois pas à cette chose gigantesque dont tu me parles et que tu appelle l'espace». Einstein, «Sur le problème de la relativité», p. 147.

41 Einstein a Arnold Sommerfeld, Berlín, 28 de noviembre [de 1915], y Einstein a Michele Besso [10 de diciembre de 1915].

42 Einstein, Relativity (traducción de Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie), p. 30.

43 Einstein, Relativity: The Special and the General Theory , p. 61 (traducción modificada para reflejar el alemán original: «Ein mystischer Schauer ergreift den Nichtmathematiker, enn er von "vierdimensional" hört, ein Gefühl, das dem von Theatergespent erzeugten nicht unähnlich ist».)

44 Ibid ., p. 75.

45 Einstein, «Die hauptsächlichen Gedanken der Relativitätstheorie».

46 Albert Einstein a Gustav Mie, 8 de febrero de 1918, Berlín («spukt das Gespenst des absoluten Raumes»).

47 Einstein, «Marian v. Smoluchowski», p. 108.

48 Eddington, The Nature of the Physical World , p. 121.

49 Johnson, Modern Times , p. 1.

50 Eddington, The Theory of Relativity and Its Influence on Scientific Thought , p. 28; reimpresso en Eddington, «The Theory of Relativity and its Influence on Scientific Thought»; Eddington, The Nature of the Physical World , p. 122.

51 Eddington, *The Nature of the Physical World* , p. 121.

52 Eddington, *The Theory of Relativity and Its Influence on Scientific Thought* , p. 26; Eddington, *The Nature of the Physical World* , p. 119.

53 Isaac Newton a Richard Bentley, 25 de febrero de 1692.

54 Eddington, *The Theory of Relativity and its Influence on Scientific Thought* , p. 27.

55 Ibid ., p. 26.

56 Eddington, *The Nature of the Physical World* , p. 141.

57 Herschel, *A Treatise on Astronomy* , p. 222.

58 Ibid ., pp. 26-27.

59 Ibid .

60 Eddington, *The Nature of the Physical World* , p. 297.

61 Ibid ., pp. 121, 122.

62 Ibid ., pp. 121-122.

63 Ibid ., p. 122.

64 Ibid ., p. 118.

65 Ibid ., pp. 296-97.

66 Ibid ., pp. 297.

67 Langevin, «L'Évolution de l'espace et du temps».

68 Serviss, *The Einstein Theory of Relativity* , p. 74.

69 Einstein, «Geleitwort».

VIII. LOS DEMONIOS CUÁNTICOS

1Smolin, *Einstein's Unfinished Revolution* , 210.

2Curie, Curie y Bémont, «Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende», p. 1217.

3Einstein, «Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?».

4Flint, «Letter to the Editor: A Limit to the Quantum Theory and the Avoidance of Negative Energy Transitions», p. 313. El autor de la carta aludía a conferencias del físico William Wilson.

5Lorentz, «Discourse d'ouverture», pp. 6-7.

6Albert Einstein a Michele Besso, Praga, 21 de octubre de 1911.

7Born, «Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858-1947», p. 167.

8«Discussion du rapport de M. Planck», en Langevin y De Broglie, *La Théorie du rayonnement et les quanta* , p. 128.

9«Science on Road to Revolutionize All Existence», *The New York Times* , 1913, M-6.

10 Soddy, *The Interpretation of Radium* , pp. 10, 28.

11 Ibid ., pp. 21, 27.

12 Rutherford y Soddy, «LX. Radioactive Change».

13 ¿Podría «predecir el comportamiento de la plata o del cloro o las propiedades del cloruro de plata sin haber observado muestras de esas sustancias debido a su incapacidad actual»? Broad reprendió con dureza al determinismo mecánico aludiendo a las habilidades y limitaciones de los seres de otro mundo. Para Broad, era cuestionable que la naturaleza decidiera actuar exclusivamente de forma mecánica y predecible en todas sus escalas. Dudando, escribió: «No veo el menor rastro de evidencia en las teorías mecanicistas, ni en la teoría del

mecanismo puro, que es el ideal que persiguen». Broad, *The Mind and Its Place in Nature* , pp. 72-73.

14 Ibid .

15 Einstein a Born, 27 de enero de 1920.

16 Einstein a Max y Hedwig Born, [Berlín], 29 de abril de 1924.

17 Born, «Quantenmechanik der Stoßvorgänge», p. 804.

18 Born a Einstein, 30 de noviembre de 1926.

19 Traducido como «On the Intuitive Content of Quantum-Theoretical Kinematics and Mechanics».

20 Einstein hizo un comentario similar a Max Born en una carta de diciembre de 1926.

21 Bohr, «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», p. 218.

22 Born, *Physics in My Generation* , p. 55.

23 Ibid ., p. 206.

24 Mises, *Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit* , pp. 188, 140.

25 Ibid ., p. 176.

26 Mises, «Über kausale und statistische Gesetzmäßigkeit in der Physik», p. 147.

27 Cassirer, *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik* , p. 7.

28 Eddington, *The Nature of the Physical World* , p. 297.

29 Cirujano general de Estados Unidos Hugh S. Cummings, transcripción del Congreso Nacional del Radio, 20 de diciembre de 1928, citado en Moore, *The Radium Girls* , p. 17.

30 Popper, *The World of Parmenides* , p. 196.

31 Szilárd, «Part II: Leó Szilárd: His Version of the Facts», p. 55.

32 Muchas veces se atribuía al artículo de Szilárd el mérito de haber resuelto el misterio del demonio de Maxwell aludiendo a la información: «Por lo tanto, se puede alabar o culpar a Szilárd por haber abierto el camino que conduce a la teoría de la información y sus misterios». Ehrenberg, «Maxwell's Demon», p. 109. «Szilárd publicó en 1929 un artículo muy notable sobre el problema del demonio de Maxwell y descubrió la conexión entre información y entropía», recordó el físico Léon Brillouin: «Fue ese un trabajo pionero, si bien la importancia del documento se ignoró hasta que los avances recientes de la teoría lo han colocado en primer plano». Brillouin, *Science and Information Theory*, p. 176.

33 Szilárd, «Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen», p. 841.

34 Ibid ., p. 851.

35 Ibid ., p. 855.

36 Ibid ., p. 573.

37 Lewis, «The Symmetry of Time in Physics», p. 573.

38 Ibid ., p. 572.

39 Ibid .

40 Ibid ., p. 571.

41 Dannen, «The Einstein-Szilárd Refrigerators», p. 92.

42 Compton, «The Uncertainty Principle and Free Will».

43 Lillie, «The Directive Influence in Living Organisms».

44 Ibid . Compton estaba citando a Lillie, «Physical Indeterminism and Vital Action».

45 Einstein a Born, 3 de diciembre de 1947, citado en Born, *Natural Philosophy of Cause and Chance* , p. 122.

46 Compton, *The Freedom of Man* , p. 45.

47 Ibid ., p. 46.

48 Ibid ., p. 7.

49 Ibid ., pp. 32-36.

50 Ibid ., p. 60.

51 Ibid ., p. 31.

52 Ibid ., pp. 38-39.

53 Ibid ., pp. 39-40.

54 Ibid ., p. 46.

55 Ibid ., p. 39.

56 Ibid ., p. 61, n.º 11.

57 Ibid ., p. 62.

58 Ibid ., p. 6, en el que se cita un pasaje de Barnes, *Scientific Theory and Religion* , p. 578.

59 Compton, *The Freedom of Man* , p. 6.

60 Ibid ., p. 50.

61 «Cuando observamos las acciones de los hombres a la luz de la ciencia, hallamos una nueva esperanza. La lealtad a nuestro Creador, que nos ha dado la capacidad, la oportunidad y la responsabilidad de moldear nuestras vidas y nuestro mundo con un patrón más perfecto, no puede sino aspirarnos a trabajar con él en corazón y alma en pos de ese gran fin», concluyó Compton. Ibid ., p. 119.

62 «Verachte nur Vernunft und Wissenschaft, Des Menschen allerhöchste Kraft!, Du lässest doch von Blend- und Zauberwerken, Dich in dem Quantengeist bestärken!, Pass auf, wie jetzt die Schwierigkeiten schwinden, Und wunderbar wirst du das Neutron finden!», Bohr et. al. , «Faust: Eine Histoire», p. 323.

63 Planck, «Die Kausalität in der Natur», en Planck, Wege zur physikalischen Erkenntnis , p. 237. La conferencia se reimprimió en Planck, Vorträge und Erinnerungen , 1970, pero no se incluyó en su traducción inglesa Where Is Science Going? , para la cual Einstein escribió el prefacio. Se tradujo como «El concepto de la causalidad en la física» en las obras de Planck The Philosophy of Physics y Scientific Autobiography and Other Papers , p. 148.

64 Ibid .

65 Neumann, Mathematical Foundations of Quantum Mechanics , p. 400.

66 Ibid ., p. 370.

67 Ibid ., p. 359.

68 Ibid ., p. 401.

69 Ibid ., p. 369.

70 Neumann, Mathematical Foundations of Quantum Mechanics , p. 328.

71 Ibid ., p. 369.

72 Ibid ., p. 402.

73 Margenau, «Meaning and Scientific Status of Causality», p. 138, donde se cita la obra del filósofo Philipp Frank, The Law of Causality and Its Limits , 1931.

74 Margenau revisó el trabajo de científicos, filósofos y matemáticos, incluido Richard von Mises, quien había utilizado el término «demonio de Laplace» en su libro de 1928 sobre mecánica cuántica y estadística. Margenau, «Causality and Modern Physics», p. 3.

75 Margenau, «Meaning and Scientific Status of Causality», p. 137.

76 Ibid ., p. 138.

77 Margenau, p. 397.

78 Millikan, Time, Matter, and Values , p. 30.

79 Lichtenstein y Metz, «La Philosophie des mathématiques selon M. Émile Meyerson», p. 201.

80 Otto Neurath, «Protokollsätze», p. 204. Reimpreso como Neurath, «Protocol Sentences», p. 199.

81 Una década después de estas primeras advertencias, Neurath se seguía quejando con su colega Rudolph Carnap de que Carnap y algunos de los suyos querían reemplazar el ideal de Laplace con una alternativa defectuosa. Le instó a negar la opinión de que, «en principio, el demonio de Laplace es la imagen del científico en acción». Carnap aceptó que la ciencia actual ya no podía definirse mediante ese ideal, pero tampoco perdió la esperanza de encontrar otro fundamento empírico y antimetafísico igual de sólido. Neurath a Carnap, 1 de abril de 1944, citado en Reisch, How the Cold War Transformed Philosophy of Science , p. 196; la carta original figura en la Colección Rudolf Carnap, Archivo de Filosofía Científica, Biblioteca Hillman, Universidad de Pittsburgh, Pittsburgh (Pensilvania).

82 Trotsky, Soviet Economy in Danger , pp. 29-30.

83 Fiódorov, What Was Man Created For? , p. 102.

84 Trotsky, Soviet Economy in Danger , pp. 29-30.

IX. LOS DEMONIOS Y LA BOMBA ATÓMICA

1Seaborg, Adventures in the Atomic Age: From Watts to Washington , p. 33.

2Laurence, «New “Gun” Speeds Break-up of Atom».

3«Cuando hago un experimento, doy por sentado que ningún dios, ángel o demonio va a interferir en su curso. Y esa suposición ha quedado justificada por el éxito logrado en mi carrera profesional». Haldane, *Fact and Faith* , p. vi.

4Eddington, *New Pathways in Science* , p. 64.

5Ibid ., p. 62.

6Ibid .

7Ibid ., p. 69.

8Ibid ., p. 70.

9«Holds Roosevelt, Turns Back Chaos: Karl Compton Says That His “Intelligent Planning” Is Staying Nature’s Trend», *The New York Times* , 23 de junio de 1934. Noticia sobre Karl Compton, discurso ante la AAAS, Universidad de California en Berkeley, 21 de junio de 1934.

10 Compton, «Science and Prosperity», p. 388.

11 «Holds Roosevelt, Turns Back Chaos».

12 Compton, «Science and Prosperity», p. 391.

13 Ibid ., p. 387.

14 Ibid ., p. 391.

15 Schrödinger, «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», p. 812.

16 Albert Einstein a Erwin Schrödinger, 8 de agosto de 1935, citado en Fine, *The Shaky Game* , p. 78.

17 Schrödinger, «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», p. 812.

18 Ibid ., p. 849.

19 Ibid ., p. 812.

20 Erwin Schrödinger a Albert Einstein, 19 de agosto de 1935, y Einstein a

Schrödinger, 4 de septiembre de 1935, citado en Fine, *The Shaky Game* , pp. 82-84.

21 Heisenberg, *Physics and Beyond* , p. 117. Para «una inteligencia fabulosa», véase Gustav Heckmann a Grete Hermann, 17 de diciembre de 1933, reimpresso en Crull y Bacciagaluppi, *Grete Hermann* , pp. 221-22.

22 Hermann, «Die Naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik», p. 718. Una versión más larga de este artículo apareció el mismo año (1935) bajo el mismo título en *Abhandlungen der Fries'schen Schule* . Para una traducción al inglés, véase Hermann, «Natural-Philosophical Foundations of Quantum Mechanics», en Crull y Bacciagaluppi, *Grete Hermann* .

23 Hermann, «Natural-Philosophical Foundations of Quantum Mechanics», p. 260.

24 *Ibid.* , p. 246.

25 *Ibid.* , p. 260.

26 *Ibid.* , p. 241.

27 *Ibid.* .

28 Compton, *The Human Meaning of Science* , pp. 52-53.

29 *Ibid.* , pp. 48-49.

30 *Ibid.* , p. 35.

31 Citado en Monk, *Robert Oppenheimer* , pp. 316-17.

32 *Ibid.* , p. 317.

33 Henry L. Stimson, entrada de diario del 31 de mayo de 1945, Biblioteca Sterling Memorial, Universidad Yale, New Haven (Connecticut), citado en Schmitz, *Henry L. Stimson* , p. 182.

34 Smyth, *Atomic Energy for Military Purposes* , p. 223.

35 Transcripciones de Farm Hall, última página. Operación Épsilon (6 y 7 de

agosto de 1945), RG 77, entrada 22, caja 164, National Archives and Records Administration, College Park (Maryland).

36 Compton, «The Scattering of X-ray Photons», p. 84.

37 Ibid ., p. 83.

38 Ibid ., p. 83.

39 Ibid ., p. 84.

40 Beyler, «The Demon of Technology, Mass Society, and Atomic Physics in West Germany».

41 Szilárd, «Creative Intelligence and Society», p. 20.

42 Citado en Frisch, What Little I Remember , p. 159.

43 Born, My Life and My Views , p. 88.

44 Reichenbach, Elements of Symbolic Logic , p. 390. Para otra referencia al «superhombre» de Laplace, véase Reichenbach, The Rise of Scientific Philosophy , pp. 162-63.

45 Henry-Hermann, «Die Kausalität in der Physik», p. 382.

46 Ibid ., pp. 380, 382.

X. LOS DEMONIOS CIBERNÉTICOS

1Aunque la acuñación de «cibernético» se suele atribuir a Norbert Wiener, se puede encontrar un precedente importante en el uso que hace André-Marie Ampère de la palabra para referirse a la ciencia de gobernar.

2Citado en Dyson, «The Usefulness of Useless Knowledge», p. 92.

3Wiener, «Time, Communication and the Nervous System», p. 207.

4Ibid ., p. 208.

5Platt, «Books That Make a Year's Reading and a Lifetime's Enrichment», BR6.

6Thurston, «Devaluing the Human Brain», p. 24.

7Wiener, Cybernetics , p. 71.

8Ibid ., p. 12.

9Ibid ., p. 72.

10 Wiener, «Entropy and Information», en Proceedings of the Symposia of Applied Mathematics of the American Mathematical Society (89), Mathematical Review (305) y Wiener, Collected Works with Commentaries (202).

11 Ibid ., p. 155.

12 Shannon, «Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine, by Norbert Wiener».

13 Shannon, «A Mathematical Theory of Communication», pp. 626-27, n.º 4.

14 Brillouin, «Life, Thermodynamics, and Cybernetics», p. 566.

15 Ibid ., p. 565.

16 Ibid ., p. 565-566.

17 Ibid ., p. 560.

18 Ibid ., p. 561.

19 Ibid ., p. 566.

20 Ibid .

21 Ibid ., p. 566, n.º 11.

22 Ibid ., p. 560.

23 Ibid ., p. 561.

24 Ibid ., p. 566.

25 Ibid ., p. 567.

26 Rudolph Carnap fue uno de los muchos filósofos que intentaron hacer un análisis más amplio de las implicaciones de esta investigación. A Carnap le molestaba que se desproveyera a la teoría de la información de cualquier tipo de significado. «La teoría predominante de la comunicación (o transmisión de información) descuida deliberadamente los aspectos semánticos de la comunicación, es decir, el significado de los mensajes», escribió con su coautor Yehoshua Bar-Hillel, matemático y lingüista. El debate entre quienes buscaban una definición puramente física de la información, como Shannon, y los que resaltaban sus aspectos semánticos llegó a un punto crítico en la Universidad de Princeton en 1952. Cuando Neumann y Wolfgang Pauli defendieron la primera postura en una conversación con Carnap, lo disuadieron de publicar su trabajo. Su mano dura fue controvertida y Carnap continuó advirtiendo a los científicos de que pensarán en las «importantes relaciones entre los dos conceptos» de entropía en la teoría de la información y la termodinámica, en lugar de limitarse a equipararlos acríticamente. Carnap y Yehoshua, *An Outline of a Theory of Semantic Information* ; Kohler, «Why von Neumann Rejected Carnap's Dualism of Information Concepts»; véase también Carnap, *Two Essays on Entropy*. También son relevantes las opiniones de Bertrand Russell, quien se ponía como una fiera ante la mera sugerencia de que «la teoría de la comunicación es una rama de la física que implica, al menos, que la primera es reducible a la segunda». Tillman y Russell, «Language, Information, and Entropy», p. 127.

27 Brillouin, *Science and Information Theory* , 2.^a ed., p. 168, n.º 11.

28 «L. Szilárd lo retomó [en 1929]. Primero despejó el terreno mostrando que una simple observación, equivalente a una selección de n posibilidades igual de probables, permite al observador reducir la entropía del sistema observado en un máximo de $k \log n$ ». Gabor, «IV: Light and Information», presentado originalmente como Conferencia Ritchie el día 2 de marzo de 1951 en la Universidad de Edimburgo.

29 Gabor, «IV: Light and Information», p. 132.

30 Gabor, *Lectures on Communication Theory* , p. 4.

31 Brillouin, «Maxwell's Demon Cannot Operate», p. 335, n.º 7.

32 Ibid ., p. 334.

33 Ibid ., p. 336.

34 Ibid ., p. 334.

35 Ibid ., p. 337.

36 Wiener, *The Human Use of Human Beings* , p. 29.

37 Ibid ., p. 35.

38 Norbert Wiener, conferencia del 24 de octubre de 1950 en la Academia de las Letras de Nueva York, reimpressa como Wiener, «Men, Machines, and the World About», en Galdston, *Medicine and Science* . La grabación original de la conferencia se encuentra disponible en <https://www.wnyc.org/story/men-machines-and-the-world-about-them/>.

39 Rothstein, «Information, Measurement, and Quantum Mechanics», p. 174.

40 Rothstein trabajó en el Laboratorio de Señales Evans, se unió a Edgerton, Germeshausen and Grier como alto ejecutivo científico, fue vicepresidente y director científico de Maser Optics y luego se trasladó a la División de Electrónica de Laboratory for Electronics.

41 Rothstein, *Communication, Organization, and Science* , p. xciii.

42 Hay algunos datos biográficos sobre Rothstein en *Science* 134, 13 de octubre de 1961, p. 1060; «Jerome Rothstein: Generalized Life», *Cosmic Search* 1, n.º 2, marzo de 1979, p. 35; y «Contributors», *IEEE Transactions on Military Electronics* , abril/julio de 1963, p. 271.

43 Wiener, «Cybernetics», reimpresso en Wiener, *Collected Works with Commentaries* , p. 203.

44 Rothstein, «Information, Measurement, and Quantum Mechanics», p. 174.

45 Wiener, *Collected Works with Commentaries* , p. 203.

46 Einstein, «Autobiographical Notes», p. 57.

47 Albert Einstein a Jerome Rothstein, 22 de mayo de 1950, Archivos de Albert Einstein, Universidad Hebrea de Jerusalén.

48 Ibid ., p. 9.

49 «Je dois ressembler à une autruche qui sans cesse cache sa tête dans le sable relativiste pour n'avoir pas à regarder en face ces vilains quanta». Albert Einstein a Louis de Broglie, 15 de febrero de 1954, citado en De Broglie, *Le Dualisme des ondes et des corpuscules dans l'oeuvre de Albert Einstein* , p. 31.

50 Bohm, p. 609.

51 Bohm, «A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of Hidden Variables».

52 Años después, el físico Giancarlo Ghirardi se planteó qué talentos peculiares poseería la «bruja de Bohm»: «Simplemente sería capaz de ver las variables ocultas del sistema. [...] La bruja sería capaz de saber, sistema por sistema, dónde está exactamente la partícula». Ghirardi, «Properties and Events in a Relativistic Context», p. 353; Ghirardi, *Sneaking a Look at God's Cards* , pp. 281, 83. Para un uso reciente del término «demonio de Bohm», véase Kiukas y Werner, «Maximal Violation of Bell Inequalities by Position Measurements».

53 Heisenberg, *Das Naturbild der heutigen Physik* , p. 25.

54 Heisenberg, *Physics and Philosophy* , p. 56.

55 Heisenberg, *Physics and Beyond* , p. 117.

56 Brillouin, *Science and Information Theory* , 1.^a ed., p. 163.

57 Rothstein, *Communication, Organization, and Science* , pp. xcii-xciii.

58 Schmeck, «A Scientist Gives Demons Their Due», p. 2.

59 Ibid .

60 Rothstein, «Thermodynamics and Some Undecidable Physical Questions», p.

41, n.º 1.

61 Rothstein, «Physical Demonology», p. 99.

62 Ibid ., p. 111.

63 Ibid ., p. 115.

64 Ibid ., p. 116.

65 Rothstein, «Thermodynamics and Some Undecidable Physical Questions», p. 41, n.º 1.

66 Rothstein, «Physical Demonology», p. 102.

67 Ibid .

68 Foerster, «On Self-Organizing Systems and Their Environments», pp. 40-42.

69 Brillouin, «Information Theory and Its Applications to Fundamental Problems in Physics», p. 502.

70 Born, Von der Verantwortung des Naturwissenschaftlers , p. 100.

71 Ibid ., p. 97.

72 Ibid ., p. 98.

73 Ibid .

74 Ibid ., p. 99.

75 Ibid ., p. 100.

76 Bastin, ed., Quantum Theory and Beyond , p. ix.

77 Rothstein, «Informational Generalization of Entropy in Physics», en Bastin, Quantum Theory and Beyond , p. 291. Para una continuación de su obra sobre los demonios de Loschmidt y de Zermelo, véase Rothstein, «Loschmidt's and Zermelo's Paradoxes Do Not Exist».

78 Los científicos recurrieron a aún más amigos imaginarios con el fin de comprender el mundo más allá de las categorías cartesianas. En ese contexto, «el amigo de Wigner» se ideó para explorar las concatenaciones extrañas de efectos derivables de un único efecto cuántico. Wigner, «Remarks on the Mind-Body Question», en *Symmetries and Reflections: Scientific Essays of Eugene P. Wigner*, p. 171.

XI. LOS DEMONIOS INFORMÁTICOS

1Turing, «Computing Machinery and Intelligence», p. 459.

2Ibid .

3Ibid ., p. 460.

4Turing, «Computing Machinery and Intelligence», p. 440.

5Ibid ., p. 460.

6Ibid ., p. 459.

7Sutherland, «Opening Address», p. x.

8Proyecto MAC, informe de progreso VI.

9McKelvey, *Internet Daemons*, pp. 56, 85.

10 Selfridge, «Pandemonium: A Paradigm for Learning», p. 513.

11 Ibid ., p. 516.

12 Ibid ., p. 523.

13 Donald M. MacKay citó sus artículos en «Mentality in Machines» y «The Epistemological Problem for Automata», en *Automata Studies*.

14 «Discussion on the Paper by O. G. Selfridge», en *Mechanisation of Thought*

Processes , p. 527.

15 McCarthy, «Programs with Common Sense».

16 McCarthy, «Ascribing Mental Qualities to Machines», p. 94.

17 «Al observar un cerebro, debemos distinguir entre el comportamiento disponible para la consciencia y esos comportamientos que, pese a ser indudablemente igual de importantes, proceden de la inconsciencia». «Discussion on the Paper by O. G. Selfridge», en *Mechanisation of Thought Processes* , p. 527.

18 Selfridge y Neisser, «Pattern Recognition by Machine», p. 66.

19 Ibid ., p. 60.

20 Ibid ., p. 66.

21 Ibid .

22 Minsky, «Steps toward Artificial Intelligence», p. 14.

23 Laird y Rosenbloom, «The Research of Allen Newell», p. 22. Fechó esta experiencia de conversión en «un viernes por la tarde de mediados de noviembre de 1954».

24 Newell, «Some Problems of Basic Organization in Problem-Solving Programs», p. 13, citado en Laird y Rosenbloom, «The Research of Allen Newell», p. 27.

25 Pierce, *Symbols, Signals, and Noise* , p. 290. Según Pierce, para saber sobre qué molécula actuar, el demonio requería un mínimo de información: «Necesitamos un poco de información que especifique en qué lado está la molécula». Al igual que sus predecesores, Pierce contextualizó la descripción del demonio de Maxwell según sus consecuencias económicas: «Lo importante es que, incluso en el mejor de los casos, podríamos hacer algo más que alcanzar el punto de equilibrio. [...] El bit que mide la cantidad de información utilizada es la unidad con la que se mide la entropía de una fuente de mensaje en la teoría de la comunicación. La entropía de la termodinámica determina qué parte de la energía térmica existente se puede convertir en trabajo mecánico. Parece natural

tratar de relacionar la entropía de la termodinámica y la mecánica estadística con la entropía de la teoría de la comunicación». Ibid ., p. 201. El cuento breve de Pierce «The Exorcism» especulaba con lo lejos que podría llegar el aprendizaje automático.

26 Wiener, *Cybernetics* , p. vii.

27 En un artículo anterior, Brillouin había concluido que «el pensamiento crea entropía negativa». Para afirmarlo, había citado los geniales descubrimientos de Einstein sobre la relatividad y los de otros científicos sobre la mecánica cuántica. Promovió la noción de que el científico era el último actor inteligente; alguien que, como un demonio, podía salvarnos de las limitaciones del mundo natural. Brillouin, «Thermodynamics, Statistics, and Information», p. 326.

28 Gleick, *Genius: The Life and Science of Richard Feynman* , p. 3.

29 Feynman, Leighton y Sands, *The Feynman Lectures on Physics* , 1:46-3.

30 Ibid .

31 Ibid ., 1:46-1.

32 Ibid ., 1:46-3.

33 Ibid ., 1:46-2.

34 Ibid ., 1:46-5.

35 Ibid .

36 Ehrenberg, «A Note on Entropy and Irreversible Processes».

37 Ehrenberg, «Maxwell's Demon», p. 107.

38 Ibid ., p. 110.

39 Ibid ., p. 109.

40 Ibid ., p. 107.

41 Ibid ., p. 110.

42 Ibid .

43 Ibid .

44 Ehrenberg, *Dice of the Gods* , p. 81.

45 Ibid ., p. 90.

46 Ibid ., p. 81; véase también Born, «Physics in the Last Fifty Years».

47 Proyecto MAC, informe de progreso VI, p. 3.

48 Proyecto MAC, informe de progreso VI, p. 26.

49 Steinberg, «Mr. Smarty Pants Knows».

50 Proyecto MAC, informe de progreso VI, p. 26.

51 Ibid ., p. 9.

52 Bhushan, «A File Transfer Protocol», p. 3.

53 Ibid ., p. 1.

54 Seymour Papert, codirector del Laboratorio de Inteligencia Artificial, se unió al proyecto de Charniak como asesor de tesis, y Terry Winograd, con quien Charniak había trabajado codo con codo, se ofreció como asesor.

55 Para el uso del término «demonio de Charniak», véase Choong Huei Seow, «Of Frames, Scripts, and Stories».

56 Charniak, «Toward a Model of Children's Story Comprehension», pp. 23, 37-38.

57 Ibid ., p. 265.

58 Ibid . Por ejemplo, la palabra clínex convocaría a un conjunto de demonios que podrían moverse para establecer el contexto apropiado de las posibilidades narrativas: «La persona tendría un resfriado, o estaría a punto de estornudar, y aparecería un demonio que podría responder a la pregunta: “¿Por qué Janet cogió el clínex?” en la historia». Ibid., p. 254.

59 Ibid ., p. 123.

60 Ibid ., p. 224.

61 Meyer, «Infants in Children's Stories», p. 1.

62 Ibid ., pp. 1, 30, 7.

63 Ibid ., p. 64.

64 Rieger, «Conceptual Memory», p. 150. Más adelante, Charles Chuck Rieger alegó que había que abandonar la etiqueta «demonios» y definirlos simplemente como «observadores». Rieger, «Spontaneous Computation in Cognitive Models».

65 Kornman, «Pattern Matching and Pattern-Directed Invocation in Systems Programming Languages», p. 96.

66 Ibid .

67 Newell, Laird y Rosenbloom, «Proposal for Research on SOAR».

68 Minsky, The Society of Mind , p. 274.

69 El modus operandi de esas máquinas era similar al de los infantes: «Los ciclos sucesivos de reformulación estratégica llevan a Soar a superar etapas de desarrollo cognitivo muy parecidas a las que estudió el pionero psicólogo infantil Jean Piaget». Waldrop, «Soar: A Unified Theory of Cognition?», p. 298.

70 Waldrop, «Toward a Unified Theory of Cognition», p. 28.

71 Waldrop, «Soar: A Unified Theory of Cognition?», p. 296.

72 Waldrop, «Toward a Unified Theory of Cognition», p. 28.

73 Waldrop, «Soar: A Unified Theory of Cognition?», p. 298.

74 Waldrop, «Toward a Unified Theory of Cognition», p. 28.

75 Ibid .

76 Dotzler, «Demons-Magic-Cybernetics».

77 Foerster, «Responsibilities of Competence», pp. 1-2.

78 Ibid ., p. 1.

79 Ibid .

80 Foerster, «Disorder/Order: Discovery or Invention?», pp. 183-84. El científico de la computación Richard Laing, de la Universidad de Míchigan, también promovió esa noción. Laing arguyó que, en realidad, los demonios de Maxwell eran «autómatas computacionales» que podían operar en una amplia variedad de contextos: «Los sistemas de demonios maxwellianos ordinarios se pueden interpretar como meros autómatas computacionales».

81 Grover Maxwell, en Behavioral and Brain Sciences , «Open Peer Commentary to “Minds, Brains and Programs”», p. 437.

82 Para un estudio reciente sobre la literatura pertinente y una bibliografía, véase Mooney, Searle’s Chinese Room and Its Aftermath .

83 Searle, «Minds, Brains and Programs», p. 417.

84 Ronald Reagan, «The Triumph of Freedom», citado en Rule, «Reagan Gets a Red Carpet from British».

85 Leffler, The Design and Implementation of the 4.3BSD UNIX Operating System , p. 419. Véase la entrada de «Devil Book» («libro del diablo») en Raymond, The New Hacker’s Dictionary , p. 125.

86 Nemeth et al. , Unix System Administration Handbook , p. 403.

87 Raymond, The New Hacker’s Dictionary , p. 118.

88 Ibid ., p. 124.

89 Andrew Leonard, Bots , p. 31.

90 Ibid ., pp. 10-11.

91 Ibid ., p. 29.

92 Ibid ., pp. 26-27.

93 Ibid ., p. 27.

94 Ibid .

95 McKelvey, Internet Daemons , pp. 56, 4.

96 Ibid ., pp. 56, 67.

97 Pinker, How the Mind Works , p. 111.

98 Pinker, How the Mind Works , p. 21.

99 Ibid ., p. 111.

100 «La teoría computacional de la mente rehabilita de una vez por todas al infame homúnculo», donde el homúnculo está absolutamente presente y es esencial: «Hablar de homúnculos es indispensable en informática». Ibid ., p. 79.

101 Ibid ., p. 69.

102 Ibid ., p. 79.

103 Ibid ., p. 144.

104 Ibid ., p. 73.

105 Ibid ., p. 111.

106 Ibid ., p. 144.

107 Ibid ., p. 111.

108 Ibid ., p. 99.

109 Ibid ., p. 131.

110 Daniel Dennett citado en ibid ., p. 79.

XII. AGUJEROS NEGROS Y COMPUTACIÓN CUÁNTICA

1Penrose, *Foundations of Statistical Mechanics* , p. 225.

2Ibid ., p. 226.

3Bekenstein, «Black-Hole Thermodynamics», p. 24.

4Ibid ., p. 25.

5«Brillouin admite que el demonio [de Maxwell] puede reducir la entropía térmica del gas, pero señala que necesita información para hacerlo. Por ejemplo, debe “ver” qué moléculas son rápidas y cuáles, lentas. Brillouin muestra que, al adquirir esta información (recibir un fotón en la retina de su ojo), el demonio provoca inevitablemente un aumento en la entropía del universo». Bekenstein, «Baryon Number, Entropy, and Black Hole Physics», p. 109.

6Ibid ., pp. 110-11, 17.

7Ibid ., pp. 25-26.

8Ibid ., p. 28.

9Hawking, *A Brief History of Time* , p. 104.

10 Hawking, «Particle Creation by Black Holes», p. 201.

11 Hawking, «Black Holes and Unpredictability», p. 23.

12 Ibid ., p. 24.

13 Hawking, *A Brief History of Time* , p. 89.

14 Hawking, «Chronology Protection Conjecture».

15 Reuell, «Hawking at Harvard». Hawking articuló por primera vez estas ideas en su conferencia de 1997 «Into a Black Hole», dada en Santiago de Chile.

16 Hawking and Penrose, *The Nature of Space and Time* , p. 37; véase también

Hawking y Penrose, «The Nature of Space and Time» (Scientific American).

17 Feynman, Feynman Lectures on Computation , p. 150.

18 Ibid ., p. 160.

19 Véase Physics World , «Rolf Landauer, A Unique Physicist, Dies», Physics World , 1999.

20 Johnson, «Rolf Landauer, Pioneer in Computer Theory, Dies at 72».

21 Ibid ., p. 149.

22 Ibid ., p. 213.

23 Ibid ., p. 212.

24 Ibid ., pp. 152-53.

25 Ibid ., p. 148.

26 Ibid ., p. 52.

27 Ibid ., p. 166, n.º 6.

28 Bennett, «Demons, Engines, and the Second Law», p. 108.

29 Ibid ., p. 111.

30 Ibid ., p. 116.

31 Ibid .

32 Ibid .

33 Baeyer, Maxwell's Demon: Why Warmth Disperses and Time Passes , pp. 145, 46, 49, 52.

34 Lloyd, «Quantum-Mechanical Maxwell's Demon», p. 3374-75.

35 Ibid ., p. 3381.

36 Shenker, «Maxwell's Demon and Baron Munchausen», p. 349, n.º 6.

37 *N. del T., en castellano en el original.

38 Para estas y otras referencias, véase Universidad de Mánchester, Leigh Group, <http://www.catenane.net/pages/pub2010-2006.html>.

39 Raizen et al. , «Demons, Entropy, and the Quest for Absolute Zero».

40 ID de la concesión de la subvención de la Comisión Europea: 308850, parte del Programa Específico FP7-ICT «Cooperación»: Tecnologías de la Información y la Comunicación, tema ICT-2011.9.1 Desafiando el pensamiento actual.

XIII. LOS DEMONIOS DE LA BIOLOGÍA

1«Notes», Nature , 1899, p. 40.

2Bergson, Creative Evolution , p. 37.

3Driesch, The Science and Philosophy of the Organism , 2:199.

4«Das von ihm Fingierte als wirklich erscheint: Es gibt seine "Dämonen": wir selbst sind sie». Driesch, Philosophie des organischen , 2:202.

5Driesch, The Science and Philosophy of the Organism , 2:200.

6Schrödinger, What Is Life? , p. 20.

7Ibid ., pp. 71, 74.

8Ibid ., p. 3.

9Gamow, Mr. Tompkins Explores the Atom , pp. 12, 13, 17.

10 Leó Szilárd a Niels Bohr, alrededor de 1950, en Lanouette, Genius in the Shadows , pp. 315-316.

- 11 Cohen y Monod, «Bacterial Permeases», p. 190.
- 12 Crick, «Obituary: Jacques Lucien Monod», p. 430.
- 13 Monod, *Chance and Necessity* , p. 115.
- 14 Ibid ., p. 43.
- 15 Ibid ., p. 145.
- 16 Ibid ., p. 69.
- 17 Ibid ., p. 61.
- 18 Ibid ., p. 81.
- 19 Ibid ., pp. 94-95.
- 20 Ibid ., p. 145.
- 21 Prigogine, «Time, Irreversibility and Structure», p. 589.
- 22 Prigogine aludía a Monod, *Chance and Necessity* , p. 146.
- 23 Citado en «Ilya Prigogine», en Buckley y Peat, *Glimpsing Reality* , p. 105.
- 24 Monod, *Chance and Necessity* , p. 145; Prigogine, «Time, Irreversibility and Structure», p. 589.
- 25 Prigogine y Stengers, *La Nouvelle alliance* , pp. 45, 95, 132.

XIV. LOS DEMONIOS EN LA SOCIEDAD

1N. del T., concepto referido a la compraventa de acciones en la bolsa según rumores o datos no corroborados, sin conocimiento ni análisis serios. El noise trading se compara con la toma de decisiones aleatoria.

2La teoría económica dominante de la época, asociada mayormente a la obra del economista John Maynard Keynes, se vertebraba en cuatro demonios principales. Uno de los rasgos clave de la teoría económica keynesiana era una idea que se remontaba a Szilárd, Brillouin y otros: era la noción de que la información tenía un valor cuantitativo que había que valorar para entender la economía. «Sobre esto último, Norbert Wiener comentó lo siguiente en una ocasión: “Aquí surge una distinción muy interesante entre la física de nuestros abuelos y la de hoy. En la física del siglo xix, parecía que no costaba nada obtener información” (14, p. 29). En contexto, la declaración alude al demonio de Maxwell, no al subastador de Walras, evidentemente. Pero, mutatis mutandis , habría servido admirablemente como lema para el trabajo de Keynes». Leijonhufvud, «Keynes and the Keynesians», p. 410.

3Keller, *Refiguring Life* , p. 54.

4Asimov, *View from a Height* .

5Asimov, *Life and Energy* , p. 74.

6Asimov, «Science: The Modern Demonology», p. 79.

7Ibid ., pp. 75, 81-83.

8Ibid ., pp. 76-78.

9Ibid ., p. 79.

10 Samuelson, «Mathematics of Speculative Price», p. 18.

11 Ibid ., p. 5.

12 Kendall, «The Analysis of Economic Time-Series-Part I: Prices», p. 13.

13 Ibid .

14 Comentarios del catedrático R. G. D. Allen, «Discussion on Professor Kendall's paper», en Kendall, «The Analysis of Economic Time-Series: Part I: Prices», pp. 25-26.

15 Cootner, «Stock Prices: Random vs. Systematic Changes», p. 24.

- 16 Samuelson, «Mathematics of Speculative Price», p. 5.
- 17 Ibid ., p. 146.
- 18 Ibid ., p. 24.
- 19 Ibid ., p. 59.
- 20 Krugman, «The Incomparable Economist».
- 21 Samuelson, «Mathematics of Speculative Price», p. 5.
- 22 Samuelson, «Economics in My Time», 1986, reimpresso en Samuelson, Collected Economic Papers .
- 23 Samuelson, «Challenge to Judgement», p. 19.
- 24 Ibid ., p. 19.
- 25 Ibid ., p. 17.
- 26 Samuelson, «Scientific Correspondence: The Law Beats Maxwell's Demon», pp. 24, 25.
- 27 Samuelson, «Foreword», en Theory of Speculation de Louis Bachelier, p. x. Samuelson puso la palabra «bromear» entre paréntesis.
- 28 Samuelson, Macroscopic Time Asymmetry of Maxwell's Demon , p. 1.
- 29 Ibid ., p. 4.
- 30 Ibid ., pp. 12-13. Literalmente, la quinta escena del acto V de Macbeth dice: «La vida no es más que una sombra pasajera, un mal actor que se pavonea y consume las horas en el escenario hasta caer en el olvido. Es un cuento narrado por un idiota lleno de ruido y furia, pero que no significa nada».
- 31 Samuelson, Macroscopic Time Asymmetry of Maxwell's Demon , p. 13.
- 32 Georgescu-Roegen, Analytical Economics , p. 119.
- 33 Georgescu-Roegen, «The Steady State and Ecological Salvation», p. 267, n.º

2.

34 Ibid ., p. 270.

35 Ibid ., p. 270.

36 Martínez Alier, «In Memory of Georgescu-Roengen», p. 175.

37 Ibid ., p. 176.

38 Ibid ., p. 175.

39 Goeller y Weinberg, «The Age of Substitutability», p. 7.

40 Ibid ., p. 10.

41 Weinberg, «Global Effects of Man's Production of Energy».

42 Weinberg, «On the Relation Between Information and Energy Systems: A Family of Maxwell's Demons», p. 47.

43 Ibid ., p. 49.

44 Ibid ., p. 50.

45 Ibid ., p. 49.

46 Ibid ., p. 52.

47 Harrison et. al. , «Chernobyl in Context», p. 2.

48 Weinberg, «Are Breeders Still Necessary?», p. 345.

49 Ibid ., p. 350.

50 Weinberg, «Social Institutions and Nuclear Energy—II», p. 33.

51 Weinberg, «A Nuclear Power Advocate Reflects on Chernobyl», p. 57.

52 Weinberg, «Social Institutions and Nuclear Energy—II», p. 1071.

53 Latour y Woolgar, *Laboratory Life* , p. 245.

54 Latour concluyó que «la imprenta desempeñaba el mismo papel que el demonio de Maxwell», permitiendo que los usuarios clasificasen los materiales con mayor eficiencia. Latour, «Drawing Things Together», p. 34.

55 Serres, *The Parasite* , p. 43.

56 *Ibid.* , p. 91.

57 *Ibid.* , p. 58.

58 *Ibid.* , p. 86.

59 Bourdieu, *Raisons pratiques* , p. 40.

60 *Ibid.* , pp. 46-47.

61 Zyga, «Maxwell's Demons May Drive Some Biological Systems»; Tu, «The Nonequilibrium Mechanism for Ultrasensitivity in a Biological Switch»; Dillenschneider y Lutz, «Memory Erasure in Small Systems».

62 «daemon: a background angel. in computer terms, a background process. i live in the background. i strive to be behind the curtain with that subtle influence. that's where i've always found myself. i like to dig deep. find out how things function underneath the covers and thoughts. this also points to chaos theory and the butterfly effect.» <http://gu.st/writ/tattoos>, archivado por Archive.org el 20 de mayo de 2003.

63 Cherry, «Jaron Lanier: We're Being Enslaved by Free Information».

64 Bezos, «2016 Letter to Shareholders».

CONCLUSIÓN

1«El discreto adiós de los demonios a la teología coincide en el tiempo y se corresponde en estructura casi exactamente con la desaparición de lo

preternatural en la respetable filosofía natural». Daston y Park, *Wonders and the Order of Nature 1150-1750* , p. 361.

2A raíz de la idea del cordón sanitario, muchos historiadores han tratado de reconstituir la lógica subyacente de las creencias durante las épocas marcadas por la persecución de las brujas y la brujería, todo con el fin de entender mentalidades retrógradas y obsoletas. Durante esos tiempos, personas de toda índole veían sentido a la demonología. Un relato ejemplar de ello es Clark, *Thinking with Demons* .

3Lévi-Strauss, *Mythologiques: Le Cru et le cuit* , p. 24.

EPÍLOGO

1Para la expresión «estrictamente real», véase Bergson, *Durée et simultanéité* , p. 95.

2Como ha afirmado el filósofo Palle Yourgrau, «el rasgo que distingue lo real de lo posible, lo existente de lo inexistente, no es lo que son, sino si son». Yourgrau, *Death and Nonexistence* , p. 35.

3Un estudio clásico sobre los modelos en la ciencia es Hesse, *Models and Analogies in Science* . Para un estudio académico más reciente, véase Mauricio, *Fictions in Science: Philosophical Essays on Modeling and Idealization* .

4El sociólogo e historiador Thomas Kuhn describió acertadamente esta característica elemental, señalando que se basaba en la «prohibición de apelar a los jefes de Estado o al pueblo en general en cuestiones científicas». Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* , p. 168.

5Reichenbach, *Experience and Prediction* , p. 403.

6Ibid ., p. 6.

7Desde entonces, la mayoría de los demonios y apariciones han desaparecido del contexto religioso. La entrada de «demonio» de la progresista Nueva

enciclopedia católica de 1967 señalaba: «Los avances realizados en las ciencias naturales han destruido para siempre el crudo concepto del mundo de tres pisos en el que ángeles y demonios se materializan con ingeniosa frecuencia. La razón es que ahora se conoce con más detalle el universo». Siguiendo las tendencias freudianas, la mayoría de los demonios quedaron relegados a lo más profundo de nuestra psique: «Además, la psiquiatría ha demostrado que el funcionamiento del subconsciente explica muchas (si no la mayoría) de las condiciones anormales que las generaciones anteriores habían atribuido a la actividad diabólica». La psicologización generalizada de lo demoníaco también resultó en la degradación del conocimiento demonológico, incluso dentro de la teología: «Por esas razones, y porque se ha convenido en la necesidad de corregir el rumbo de la teología hacia líneas más positivas, la demonología no ha sido objeto de un estudio serio en el siglo xx». Elmer, «Demon (Theology of)», p. 756.

8 Meinong, «Über Gegenstandstheorie».

9 Yourgrau, *Death and Nonexistence* , p. 13.

10 Russell, «My Mental Development», p. 13.

11 Para las opiniones de Russell sobre Meinong, véase Ryle, «Intentionality-Theory and the Nature of Thinking». Para las reevaluaciones del pensamiento de ambos filósofos, véase Griffin y Jacquette, *Russell vs. Meinong: The Legacy of «On Denoting»* .

12 Yourgrau, *Death and Nonexistence* , p. 13.

13 Reichenbach, *The Rise of Scientific Philosophy* , p. 323.

14 Heidegger, «The Question Concerning Technology», p. 28.

15 Marx y Engels, *The Communist Manifesto* , p. 8.

16 Marx y Engels, *Das Kapital* , vol. 1, p. 367.

17 El empresario e inventor Elon Musk usó la palabra para explicar aquellos aspectos de la tecnología que no eran fáciles de controlar: «Con la inteligencia artificial estamos invocando al demonio. En todas esas historias que describen a un tipo con el pentagrama y el agua bendita, es como... vale, está convencido de

que puede controlar al demonio. Pero no funciona». McFarland, «Elon Musk».

18 Heidegger, «The Question Concerning Technology», p. 26.