

La ciencia de *The Big Bang Theory*

Ramon Cererols
Toni de la Torre



La ciencia de *The Big Bang Theory*

Ramon Cererols
Toni de la Torre



©2018, Fundació Dr. Antoni Esteve
Llobet i Vall-Llosera 2. E-08032 Barcelona
Teléfono: 93 433 53 20
Dirección electrónica: fundacion@esteve.org
<http://www.esteve.org>

Imagen de la portada: Suxinsu.

ISSN edición impresa: 2385-5053
ISSN edición electrónica: 2385-5061
ISBN: 978-84-947204-4-4
Depósito legal: B 21492-2018
Impreso en España

La Fundación Dr. Antoni Esteve nació para honrar la figura de este farmacéutico, investigador y emprendedor, centrándose específicamente en un elemento fundamental de su personalidad: el amor y el respeto por la ciencia. Establecida por sus hijos en 1982, la Fundación es una institución sin ánimo de lucro que orienta su actividad hacia la ciencia en general y la farmacoterapia en particular.

El Dr. Antoni Esteve i Subirana nació en Manresa en 1902. Licenciado en Farmacia, fue el quinto boticario de una estirpe de farmacéuticos de esta ciudad. Comenzó preparando especialidades medicinales en la rebotica de su farmacia, pero el crecimiento de esta actividad, juntamente con su saber científico, su espíritu industrial y la entusiasta colaboración de su esposa, lo llevaron a fundar, en 1929, la que sería una importante empresa farmacéutica.

La Fundación promueve la comunicación entre los profesionales mediante la organización de simposios internacionales, mesas redondas y grupos de discusión. A su vez, también contribuye a difundir el trabajo científico de calidad otorgando cada 2 años el Premio de Investigación Fundación Dr. Antoni Esteve al mejor artículo sobre farmacología publicado por autores españoles.

Desde la Fundación también se promueve la comunicación científica

a través de diferentes publicaciones. Las *Monografías Dr. Antoni Esteve* resumen los contenidos de las mesas redondas, y los *Cuadernos de la Fundación Dr. Antoni Esteve* abarcan temas muy diversos sobre el mundo de la ciencia. Sus actividades también se reflejan en artículos en revistas científicas. Por último, la colección titulada *Pharmacotherapy Revisited* reproduce aquellos artículos que, según el criterio de científicos de prestigio, han sido clave para el desarrollo de alguna disciplina de la farmacoterapia.

Por otro lado, los cursos de la Fundación Dr. Antoni Esteve pretenden potenciar competencias que no están suficientemente cubiertas en los programas de grado universitario. Estos cursos se organizan en su mayoría en España, pero también en el extranjero. Una actividad a medio camino entre la docencia y la comunicación científica son los *Meet the expert*, encuentros entre un científico extranjero de especial renombre en su campo de trabajo y un grupo restringido de investigadores españoles.

Finalmente, pero no menos importante, con estas actividades la Fundación colabora con una gran diversidad de profesionales biosanitarios y comparte proyectos con universidades, hospitales, sociedades científicas, otras instituciones de investigación y organismos que dan soporte a la investigación.

Índice

Presentación.....	6
Empecemos por el principio: el origen de la ciencia	8
En la piscina de bolas: átomos, partículas y bazinga	18
De Albert Einstein a Sheldon Cooper.....	30
Construimos muros, construimos pirámides	40
El bosón de Higgs, Stephen Hawking y el paraíso de Sheldon	50

El examen de Howard y la mecánica cuántica	60
Los problemas de Leonard y el gato de Schrödinger.....	72
Amor y desamor por la teoría de cuerdas.....	84
Entendiendo el cerebro de Sheldon.....	96
Más allá de la ciencia	106

Presentación

The Big Bang Theory es la serie protagonizada por científicos de más éxito de la historia de la televisión. Las cifras lo dicen todo: diez temporadas con episodios que han superado los 20 millones de espectadores en los Estados Unidos, nueve galardones en los premios Emmy, un *spin-off* que se ha estrenado recientemente y una emisión internacional que suma más de 20 países en todo el mundo. Ningún otro científico había sido tan popular como Sheldon Cooper y sus amigos, que han logrado implantarse en el imaginario colectivo como una idea de la vida de la persona que dedica su vida a la ciencia. El progreso de las investigaciones que los personajes llevan a cabo en Caltech no es el eje de las tramas de la serie, pero tiene una presencia

significativa a lo largo de la ficción y está relacionada con los momentos más importantes de sus protagonistas. La crisis personal más grande que ha vivido Sheldon no tiene que ver con las relaciones románticas, una trama habitual en esta y otras *sitcoms*, sino en la decisión de abandonar su investigación en el área de la teoría de cuerdas, convencido de que había llegado a un punto en el que era improbable que pudiera avanzar.

En ese momento, una parte de la audiencia se preguntó qué es la teoría de cuerdas y por qué es tan importante para el personaje que han aprendido a amar, a pesar de sus excentricidades, durante tantos años. Y ese es el punto fuerte de *The Big Bang Theory*: aunque los

guionistas hacen que sus personajes sean científicos para construir personalidades que se basan en el estereotipo del *nerd* (tienen dificultades con las relaciones sociales, son obsesivos con sus aficiones e inseguros en las relaciones románticas), esto no los lleva a utilizar la ciencia como un mero instrumento que explique los personajes. Podrían haber limitado la ciencia al bagaje profesional de sus protagonistas, pero sin que esta apareciera en la serie. Sin embargo, hacen justo lo contrario: integran la ciencia en la cotidianidad de los personajes, de manera que es omnipresente durante toda la ficción, ya sea de forma sutil a través de una fórmula escrita en una pizarra del apartamento de los protagonistas o en una referencia en una línea de

diálogo, en forma humorística, presentando a los personajes realizando un experimento doméstico que se aprovecha para explicar hechos científicos, y mezclado con las tramas románticas, que se aprovechan para introducir conceptos como el gato de Schrödinger, o de forma directa, con tramas en las que vemos a los personajes trabajando, como el episodio en que Sheldon investiga por qué los electrones no tienen masa cuando viajan a través del grafeno.

Los guionistas cuentan con la asesoría de científicos como el físico David Saltzberg, profesor de la Universidad de California, para asegurar que los guiones no contienen ningún error. El respeto y

el rigor con que se tratan los temas científicos son la clave para entender por qué la comunidad científica recibió la serie con los brazos abiertos, y que eminencias como Stephen Hawking hayan participado en la ficción interpretándose a sí mismos. También es la base del potencial que tiene *The Big Bang Theory* para la divulgación científica. Los espectadores de la ficción que no tienen unos grandes conocimientos científicos tienen en ella una oportunidad para interesarse por todos los conceptos que aparecen en la serie y que quizás no saben en qué consisten. El Cuaderno de la Fundació Dr. Antoni Esteve que tiene entre las manos quiere ser el pie para que estos espectadores vayan más allá y, a

partir de momentos concretos de la serie, profundicen en el mundo de la ciencia, adquiriendo nuevos conocimientos. El bosón de Higgs, la mecánica cuántica, la antimateria, la teoría del multiverso o el mismo Big Bang que da título a la serie son algunos de los temas que encontrará en las siguientes páginas. Los trataremos con sentido del humor, ayudados por las ingeniosas frases de Sheldon Cooper y los demás personajes, pero también con rigor, fieles al espíritu de una serie que ha hecho reír a carcajadas a millones de espectadores al mismo tiempo que ha abierto una puerta al conocimiento científico para que entrara en los hogares de todo el mundo.

Empecemos por el principio: el origen de la ciencia

Es una tibia tarde de verano, hacia el año 600 AEC. Has terminado tus compras en el mercado local o ágora. Te fijas en el cielo nocturno y notas que algunas estrellas parecen moverse... así que las llamas planetas, o viajeros.

(Temporada 3, episodio 10)

Las comedias de situación basan gran parte de sus momentos humorísticos en el choque entre personalidades opuestas. *The Big Bang Theory* no es ninguna excepción, y de hecho la serie arranca con una premisa basada en este mecanismo: ¿qué ocurre cuando una chica como Penny, popular, extrovertida y atractiva, irrumpen en la vida de un grupo de científicos que son todo lo contrario a ella? Pues dos cosas al mismo tiempo. La primera, que con el tiempo descubriremos que las diferencias no son tan grandes como parecen, y la segunda, que las diferencias entre formas de ver el mundo muy distintas provocarán escenas hilarantes para el espectador. Es por este motivo que

los momentos más divertidos de *The Big Bang Theory* suelen involucrar a Penny y Sheldon, que son los personajes más diametralmente opuestos de la ficción. Ella es emocional y caótica, y tiene grandes conocimientos sobre la gente famosa. Él es racional y ordenado, y tiene grandes conocimientos científicos. No puedes preguntar a Sheldon quien es Kim Kardashian, y de la misma manera no puedes pedir a Penny que sepa quien es Isaac Newton. Los dos viven en sus respectivos mundos.

Sin embargo, pueden aprender el uno del otro. De hecho, a pesar de pertenecer a planetas *a priori* diferentes, la convivencia ha hecho que hayan acabado obteniendo

conocimientos de sus respectivos intereses. En la primera temporada, Penny somete a Sheldon a un test de cultura pop en el que este no acierta ni una pregunta. Sin embargo, cuando en la novena temporada Penny vuelve a hacerle un test similar, Sheldon no solo sabe quien es Kim Kardashian, sino que puede identificar a cada una de sus hermanas. «Si se parece a Kim, es Kim; si se parece ligeramente a Kim, es Kourtney; y si no se parece en nada a Kim, es Khloe», dice orgulloso cuando logra responder correctamente a una de las preguntas¹. De hecho, este conocimiento ha sido tan interiorizado que es capaz de llevarlo a su terreno. Así, en otro episodio Sheldon afirma que «la geología es la Kardashian de la ciencia»². Como ha aprendido a través de Penny que las Kardashian son famosas de pacotilla, puede aplicar el mismo concepto a la geología, con la que tiene una actitud desdeñosa recurrente en la serie.

Del mismo modo, Penny también va entrando en el mundo de Sheldon y compañía, y a medida que avanza la serie incluso puede distinguir entre *Star Wars* y *Star Trek*, dos sagas que previamente confundía con facilidad. También ha ido adquiriendo algunos

¹Temporada 9, episodio 23.

²Temporada 7, episodio 20.

conocimientos sobre ciencia, en parte por exposición a las conversaciones de los chicos y en parte por un interés creciente en esta. En un episodio de la tercera temporada, dándose cuenta de que no puede interesarse por el trabajo de Leonard porque desconoce completamente lo que hace, le pide como favor a Sheldon que le explique «algo» sobre física³. Este reacciona alterado, pues no se puede explicar «algo» sobre física, ya que «la física lo es todo». Sheldon cree que intentar enseñar nociones de física a Penny va a ser una pérdida de tiempo, pero a la vez lo ve como un reto que puede ser interesante asumir. Así es como acepta, y empiezan unas clases que además utiliza como base para un experimento al que bautiza *Proyecto Gorila*, generando risas entre el público, y que consiste en descubrir si se puede enseñar realmente física a Penny. El nombre del proyecto es una referencia al gorila Koko, que aprendió hasta 2000 palabras del lenguaje de signos y que en la cabeza de Sheldon sería el equivalente de Penny (aunque aquí los guionistas juegan con los nombres, ya que la cuidadora de Koko en la vida real se llamaba también Penny). Así es como empiezan unas clases que podrían ser algo parecido a lo que pretende

este Cuaderno de la Fundació Dr. Antoni Esteve que el lector tiene en las manos: acercar la ciencia incluso a aquellos que son neófitos en este campo. Sheldon insiste a Penny en que para entender algo debe empezar la lección desde el principio. Es decir, que debe trasladarla a la Antigua Grecia. Siguiendo su ejemplo, nosotros vamos a hacer lo mismo, así que cierre los ojos e imagine que es una tibia tarde de verano...

Los primeros pasos

Desde los albores de la Humanidad, el mundo se nos ha aparecido dividido en dos partes: una que nos es directamente accesible (la Tierra en que vivimos) y otra que queda lejos de nuestro alcance, por lo que siempre ha sido objeto de nuestra curiosidad (el resto del universo). En esta última vemos gran cantidad de objetos, en general puntuales (estrellas y galaxias), que parecen pegados a un fondo esférico que gira como un todo completando una rotación aproximadamente diaria, mientras que otros pocos (el Sol, la Luna y los planetas) destacan sobre los anteriores o siguen una trayectoria distinta.

La periodicidad de estos movimientos sirvió a los humanos ya

en tiempos prehistóricos como calendario y reloj, o para orientarse de día y de noche. Una simple observación de la Luna permite conocer aproximadamente los días transcurridos desde la última luna nueva, y la rotación anual de la esfera estelar hace del cielo nocturno un indicador de la época del año. Hace 5000 años, los egipcios ya conocían que el primer día en que la brillante estrella Sirio era visible (lo que entonces sucedía a finales de junio) coincidía con las crecidas del Nilo, un acontecimiento importante para la agricultura de la región.

Aristóteles

El primer progreso significativo en la comprensión de nuestra situación entre los astros se debe a Aristóteles (384-322 AEC), quien presentó⁴ argumentos que probaban que la Tierra es esférica, tales como el hecho de que la sombra producida por la Tierra sobre la Luna durante un eclipse es curvada, o que la posición de las estrellas es distinta si nos desplazamos hacia el norte o hacia el sur. Tal idea chocaba con la creencia común de que la Tierra era plana, y de que si fuera una esfera solo los que estuvieran en su parte superior podrían mantenerse en pie, mientras que el resto caerían al

³ Temporada 3, episodio 10.

⁴ En su obra *Sobre el cielo*.

vacío. Aristóteles, en cambio, afirmaba que si los objetos caen es porque su tendencia natural es acercarse al centro del universo, que él suponía que estaba en el centro de la Tierra (como también creía que el lugar natural del fuego son los cielos, y por ello el humo asciende).

Aristarco

Unas décadas más tarde, Aristarco de Samos calculó los tamaños y las distancias relativos del Sol y la Luna respecto a la Tierra, a partir de simples observaciones visuales (lo que, en aquel tiempo, constituye un hecho digno de admiración). Desafortunadamente, la inevitable imprecisión de las observaciones visuales y el hecho de que todavía no se conocía la trigonometría hicieron que los resultados obtenidos⁵ estuvieran bastante alejados de la realidad. Aristarco merece ser reconocido también porque fue el primero que afirmó, en contra de la creencia generalizada, que la Tierra y los restantes planetas giran alrededor del Sol, y que además la Tierra gira sobre sí misma produciendo de este modo la alternancia del día y la noche. Ni qué decir tiene que tales ideas fueron consideradas contrarias al sentido común, porque ¿cómo podíamos movernos a tal velocidad y no notar

el movimiento? Además, si según Aristóteles los objetos tendían al centro del universo, en el caso de que este fuera el Sol, ¿qué nos mantendría unidos a la Tierra? Por todo ello, las ideas heliocéntricas de Aristarco fueron ignoradas por sus contemporáneos y rápidamente olvidadas.

Hiparco

Hiparco de Nicea (190-120 AEC) también se valió de un eclipse para estimar la distancia entre la Tierra y la Luna relativamente al tamaño de la Tierra. Hiparco observó que, en el punto máximo del eclipse, el Sol aparecía completamente oculto en Alejandría, y sin embargo solo en sus cuatro quintas partes en el Helesponto (los actuales Dardanelos), por lo que la diferencia angular entre la posición de la Luna vista desde uno y otro lugar debía ser de un quinto del diámetro aparente de la Luna desde la Tierra, que es poco más de medio grado. De todo ello dedujo que la distancia entre ambos astros era de entre 70 y 80 radios terrestres (en realidad son unos 60).

Eratóstenes

Gracias a Aristarco e Hiparco teníamos una primera aproximación a los tamaños relativos del Sol y la

Luna con respecto al de la Tierra. Para transformar estas medidas relativas en valores absolutos era necesario determinar el diámetro terrestre, y quien primero emprendió este cálculo fue Eratóstenes (276-195 AEC), a quien Ptolomeo III asignó la dirección de la biblioteca de Alejandría. Aunque varias obras de Eratóstenes se perdieron, conocemos el procedimiento que utilizó gracias a Cleómedes⁶. Eratóstenes tenía conocimiento de que en la ciudad de Syene (la actual Asuán) había un pozo cuyo fondo era iluminado por el Sol el día 21 de junio al mediodía, cosa que indicaba que en aquella fecha el sol estaba exactamente en la vertical del lugar. A la vista de ello, cierto 21 de junio al mediodía Eratóstenes midió la longitud de la sombra de un obelisco de Alejandría y la comparó con su altura, con lo que determinó que la inclinación de los rayos solares en esta ciudad era aproximadamente la quincuagésima parte de la circunferencia (poco más de 7°), valor que debía corresponder a la diferencia de latitud entre Alejandría y Syene. Además, por referencias de los mercaderes sabía que los camellos tardaban 50 días en recorrer el trayecto entre ambas poblaciones, y que un camello avanzaba unos 100 estadios al día,

⁵ Describió sus cálculos en la obra *Sobre los tamaños y distancias del Sol y la Luna*, la única que de él se ha conservado, pues el resto desapareció en el incendio de la biblioteca de Alejandría.

⁶ Lo describió en su obra *El movimiento circular de los cuerpos celestes*.

de manera que la distancia aproximada entre ambas ciudades debía ser de unos 5000 estadios. Por tanto, la circunferencia terrestre debía medir 50 veces esta longitud, o sea, unos 250.000 estadios. No sabemos con seguridad si Eratóstenes utilizaba estadios egipcios (que medían unos 157 metros) o griegos (185 metros). En el primer caso, el más probable, solo cometió un error del 1%, mientras que en el segundo caso sería del 16%.

Ptolomeo

La visión del sistema solar centrado en la Tierra presentaba una dificultad: los filósofos griegos consideraban que el círculo era la figura perfecta, y que por ello todos los cuerpos que se movían en la bóveda celeste debían hacerlo siguiendo círculos. Sin embargo, observando los planetas desde la Tierra vemos que algunos de ellos (un caso claro es Marte) parecen seguir un movimiento de zigzag. Una solución aparente llegaría con Ptolomeo (¿100-170? EC), quien propuso que cada planeta se mueve sobre un círculo llamado «epiciclo», que a su vez se desplaza sobre otro círculo mayor llamado «deferente». Ajustando los diámetros y las velocidades de rotación de ambos círculos podía conseguirse una aproximación suficiente a la trayectoria real del planeta (para mejorarla, Ptolomeo añadió unos ajustes adicionales, la «excéntrica» y

el «ecuante», que complicaban aún más el sistema y lo alejaban de la pretendida perfección del movimiento circular uniforme).

La revolución científica

A pesar de su complejidad, el sistema ptolemaico continuaría dominando nuestra concepción del universo durante más de 13 siglos. El progreso en el conocimiento astronómico iniciado en la Antigua Grecia quedó prácticamente estancado durante el largo periodo de la Edad Media, hasta que, durante los siglos XV a XVII, se produjeron en Europa dos movimientos culturales que cambiaron nuestra manera de ver el mundo. El primero fue el Renacimiento, que pretendía recuperar el espíritu y los valores que habían impulsado la cultura clásica, a cuya tarea ayudó, sin duda, la invención por Johannes Gutenberg, aproximadamente en el año 1450, de un sistema mejorado de impresión con tipos móviles que facilitaba la difusión del conocimiento al gran público. Todo ello creó el ambiente propicio para lo que se conoce como Revolución Científica, un periodo entre 1550 y 1700 en el que se establecieron las bases y la metodología de la ciencia moderna. Hasta entonces, la investigación de la naturaleza era llevada a cabo casi exclusivamente con el pensamiento, que solía estar fuertemente influenciado por la tradición, la magia, las supersticiones y la religión, creencias que Sheldon

repudia sin cesar, a pesar de venir de una familia muy religiosa. A menudo lo vemos discutir con su madre acerca de su visión del mundo como creyente. También detesta supersticiones todavía hoy presentes, como los signos del horóscopo.

– Penny: Soy sagitario, lo que os dirá más de lo que necesitáis saber (dice el día que conoce a Leonard y Sheldon).

– Sheldon: Sí, nos dice que participas en ese engaño masivo de nuestra cultura de que la posición aparente del Sol con respecto a unas constelaciones definidas arbitrariamente en el momento en que naciste puede afectar tu personalidad.

Tras la Revolución Científica se utilizaría el llamado método científico, que prescinde de ideas preconcebidas y se basa en la observación, la utilización de instrumentos de medida, la aplicación de las matemáticas y el establecimiento de hipótesis que pueden ser confirmadas o desmentidas mediante experimentos. El método científico tiene un papel crucial en la vida de Sheldon, y no solo en su trabajo; en su vida personal también lo utiliza para confirmar o desmentir hipótesis. Así, cuando Leonard le pide que le acompañe a recuperar el televisor de Penny a casa del exnovio de ella, él concluye rápidamente que la misión va a ser un fracaso. Por supuesto, lo es, y

Empecemos por el principio: el origen de la ciencia

vuelven sin pantalones al apartamento, donde Penny explica sus razonamientos:

- Penny: Lo siento, creí que no haría de las tuyas si en lugar de ir yo ibais vosotros.
- Leonard: Bueno, era una hipótesis válida.
- Sheldon: ¿Que era una hipótesis válida...? Pero... ¿qué pasa contigo?

La formulación de hipótesis que son evidentemente erróneas, porque contradicen la información recogida durante años de ser maltratados por cretinos altos y forzudos como el exnovio de Penny, es la pista que lleva a Sheldon a concluir que Leonard está abandonando la lógica científica por otro tipo de lógica basada en el deseo y la esperanza ciega (de que Penny responda positivamente a los deseos amorosos de Leonard si este logra recuperar su televisor). Para Sheldon no tiene sentido, y se lo repite constantemente a Leonard, que no le hace mucho caso. Pero no solo utiliza la ciencia para aconsejar a los demás, sino que también la aplica a su vida personal. Así, cuando Amy insiste en que el siguiente paso en su relación de pareja sería vivir juntos, él le propone que realicen un experimento durante un día entero, recojan información y tomen la decisión a partir del método científico. Cuando a mitad del experimento surge una discusión,

acaban peleándose por el método utilizado.

- Amy: Quizá vivir juntos sea una mala idea.
- Sheldon: Sí, pero ¿qué clase de científicos seríamos, llegando a una conclusión con solo 12 horas de información?
- Amy: La clase que anoche casi te ahoga con una almohada.
- Sheldon: Vaya. Anticipé que tendríamos problemas, pero nunca pensé que tu rigor científico sería uno de ellos.
- Amy: Perdona, ¿estás cuestionando mi integridad como científica?
- Sheldon: Si los zapatos de usar y tirar del laboratorio encajan.
- Penny: ¿Esto ha sido un insulto de científicos?
- Leonard: Sí.
- Penny: ¿Era bueno?
- Amy: ¿Qué podría entender un físico teórico sobre un experimento, de todos modos? Quiero decir, ¡tú no conocerías la variable de confusión si dos de ellas te pegan en la cara a la vez! Y además no pillas la broma, porque ni siquiera trabajas con variables de confusión.
- Sheldon: ¿Cómo te atreves?
- Amy: Me has oído perfectamente. Tu fiabilidad experimental es ridícula.

- Sheldon: ¿Ahora te estás riendo de mi fiabilidad?
- Amy: No te puedes reír de algo que es nulo.
- Penny: Creo que debería decir "vaya".
- Leonard: Hazlo.
- Penny: ¡Vaya!
- Sheldon: Bueno, si eres tan defensora del método científico, quizá deberíamos usar las próximas cinco semanas para terminar lo que hemos empezado.
- Amy: ¡Bien! ¡Por la ciencia, quizá lo haga!
- Sheldon: ¡Por la ciencia, quizá deberías!

Así que el origen de la forma de ver el mundo de Sheldon se encuentra en este periodo de la Revolución Científica, cuyo primer hito lo marcó el astrónomo polaco Nicolás Copérnico.

Copérnico

En realidad, Copérnico, como muchas otras figuras del Renacimiento, destacaba en actividades muy variadas, pues era médico, clérigo, matemático, jurista, diplomático, economista e incluso traductor de textos clásicos, aunque su principal afición era la astronomía. Su interés por el estudio del movimiento de los planetas le hizo ver que, por muchos ajustes que se añadieran al sistema ptolemaico, este no podría llegar a

explicar por completo las trayectorias observadas. Ya en 1514 escribió una breve obra⁷ que circuló únicamente entre un grupo reducido de personas, en la que presentaba un bosquejo de sus ideas que resumió en siete postulados:

- No hay un centro común a todos los cuerpos celestes.
- El centro de la Tierra no es el centro del universo, sino únicamente de la gravedad y de la órbita lunar.
- El centro del universo está cerca del Sol.
- La distancia de la Tierra al Sol es enormemente menor que la distancia a las estrellas.
- El firmamento permanece inmóvil, y su movimiento aparente se debe a la rotación de la Tierra.
- El movimiento aparente del Sol se debe a que la Tierra, además de rotar sobre sí misma, gira alrededor del Sol, como los restantes planetas.
- La aparente alternancia de movimientos retrógrados y directos en los planetas no se debe a su propio movimiento, sino al de la Tierra.

Si exceptuamos el tercer postulado (que el universo tiene un centro y este se halla próximo al Sol), el resto se ajustan a nuestra visión actual. Sin embargo, en su tiempo este texto pasó prácticamente inadvertido, en parte porque no llegó a publicarse (conocemos su contenido gracias a una copia del original que se encontró en la segunda mitad del siglo XIX). Ello no desanimó a Copérnico, quien a pesar del riesgo de ser acusado por la Inquisición (que condenó a morir en la hoguera a uno de sus seguidores, Giordano Bruno) prosiguió con sus observaciones y continuó elaborando su visión heliocéntrica del sistema solar. Transcurrieron de este modo casi tres décadas de investigación en las que preparó la que sería la primera gran obra de la nueva astronomía: *De revolutionibus orbium cœlestium* (Sobre las revoluciones de los orbes celestes)⁸. Tras muchas dificultades, fue publicada en 1543, el mismo año en que murió Copérnico (se cuenta que en su lecho de muerte alcanzó a ver el libro terminado).

Kepler

Aunque el sistema heliocéntrico de Copérnico tenía la ventaja de su

simplicidad, resultaba menos exacto que el de Ptolomeo con sus múltiples ajustes, por lo que corría el riesgo de caer en el olvido como había sucedido con el de Aristarco. Para que esto no sucediera era necesario averiguar qué hacía que las trayectorias planetarias no se ajustaran a lo previsto por Copérnico. La persona que lo descubrió fue el astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler, quien aplicó sus conocimientos matemáticos a las minuciosas observaciones realizadas por Tycho Brahe, y concluyó que la inexactitud del sistema copernicano se debía a que Copérnico seguía dando por sentado que el círculo es la figura perfecta a la que deben ajustarse los planetas. Kepler, en lugar de partir de una idea preconcebida para explicar los hechos, estudió las observaciones de Brahe, ayudado por sus conocimientos matemáticos, para construir en 1609 un modelo que se ajustara a ellas⁹. Este se resumía en dos leyes:

- Los planetas siguen órbitas elípticas, no circulares (aunque a excepción de Mercurio sus excentricidades son menores

⁷ *Commentariolus* (Pequeño comentario).

⁸ Resulta una curiosa coincidencia que la obra que abre la Revolución Científica trate precisamente *Sobre las revoluciones de los orbes celestes*. En el primer caso se trata de «dar la vuelta» a la situación previa, y en el segundo se refiere a «dar la vuelta» al Sol.

⁹ Publicado en su libro *Astronomia nova*.

de 0,1)¹⁰, y el Sol no se halla en el centro de la elipse, sino en uno de sus focos.

- Los planetas no se mueven con velocidad uniforme, sino que la línea imaginaria que los une al Sol barre áreas iguales en tiempos iguales. Por ello, la velocidad del planeta es mayor cuanto más cerca está del Sol.

En 1619, Kepler completó¹¹ su modelo con una tercera ley:

- El cuadrado del periodo orbital de un planeta (el tiempo que tarda en completar una vuelta alrededor del Sol) es proporcional al cubo del semieje mayor de la elipse que describe su órbita.

Galileo

Dado el estado de la tecnología óptica al iniciarse el siglo XVII, parece probable que algunos fabricantes de lentes hubieran observado que la combinación de un par de ellas permite ver ampliados los objetos lejanos. En 1608, el gobierno de La Haya, en Holanda, recibió hasta tres

peticiones de patente de un telescopio formado por un tubo que contenía sendas lentes en sus extremos: un objetivo convexo y un ocular cóncavo. El aumento conseguido por tal dispositivo era de unas tres veces. Al año siguiente, Galileo Galilei tuvo noticia del invento y procedió a fabricar su propio telescopio, de mayor potencia, y se convirtió en la primera persona que lo utilizó para realizar observaciones astronómicas.

El nuevo instrumento le permitió ver con claridad las montañas y los cráteres lunares, así como descubrir las manchas solares, las fases de Venus y los satélites de Júpiter. Estas dos últimas observaciones tenían una consecuencia que entonces resultaba revolucionaria: eran la demostración de que la Tierra no es el centro del movimiento de todos los astros. Aun con ello, en marzo de 1610 decidió revelar sus descubrimientos¹². Por entonces, las cuestiones relacionadas con la interpretación de las Sagradas Escrituras en la Iglesia Católica eran tratadas por el cardenal Roberto

Bellarmino, quien no se mostraba contrario a la teoría copernicana mientras solo fuera considerada un método de cálculo de las posiciones de los astros, y no una afirmación de que realmente los planetas, incluida la Tierra, giraban alrededor del Sol. En 1616, Galileo, en una carta dirigida a la Gran Duquesa Cristina de Lorena, argumentó vivamente que no debían aceptarse literalmente las Sagradas Escrituras cuando estas contradicen la realidad del mundo físico demostrada por la ciencia matemática, y afirmó que la teoría copernicana no era una simple herramienta de cálculo, sino una realidad física. Ello provocó las iras de la Inquisición, que condenó las ideas de Copérnico y prohibió a Galileo defenderlas. Sin embargo, la elección del papa Urbano VIII, que antes de llegar al papado había sido un admirador de Galileo, hizo que este se confiara y le dedicara su nuevo libro¹³, en el que defiende que el universo solo puede ser comprendido con el lenguaje de las matemáticas, y no con los dogmas escolásticos.

¹⁰La excentricidad de una elipse es una medida de su grado de achatamiento. Puede valer entre 0 (la elipse es un círculo) y 1 (la elipse se reduce a un segmento). Aunque Plutón tiene una excentricidad superior a 0,1, no lo incluyo porque en agosto de 2006 la Unión Astronómica Internacional (IAU) acordó asignarlo, junto con Ceres y Eris, a la nueva categoría de planetas enanos. Esta decisión no gustó en absoluto a Sheldon y se la reprocha al astrofísico estadounidense Neil deGrasse Tyson, que participó en el séptimo episodio de la cuarta temporada de la serie. Este se defiende explicando que en realidad él votó en contra, pero no es suficiente para Sheldon, que lo considera responsable. Tyson acaba disculpándose cuando vuelven a coincidir en la cafetería.

¹¹Publicada en *Harmonices mundi* (Sobre la armonía del mundo).

¹²En su breve tratado *Sidereus nuncius* (Mensajero sideral).

¹³*Il sagggiatore* (El ensayador).

Más tarde empezó a escribir un nuevo libro, que una larga etapa de mala salud y los problemas para obtener el permiso para su publicación retrasaron hasta 1632. En la nueva obra¹⁴, Galileo enfrenta a dos personajes: Salviati, defensor del sistema copernicano, y Simplicio, un inepto filósofo aristotélico en quien el papa se vio reflejado. La Inquisición prohibió el libro y convocó a Galileo a Roma. Gracias a la ayuda de amigos influyentes, Galileo llegó a un acuerdo con el tribunal, que le obligó a retractarse¹⁵, le sentenció a arresto domiciliario hasta el fin de sus días e incluyó sus obras en el *Index librorum prohibitorum* (*Índice de libros prohibidos*).

Newton

Ya Kepler había conseguido definir las trayectorias planetarias e incluso encontrar una relación entre el periodo orbital de un planeta y su distancia media al Sol. Sin embargo, se desconocía qué leyes regían el

movimiento de los cuerpos en el espacio y qué posible relación guardaban las leyes del cosmos con las terrestres. La persona que realizaría tal descubrimiento nació, en difíciles circunstancias, aproximadamente un año después de la muerte de Galileo¹⁶. En efecto, Isaac Newton nació prematuro y tan pequeño que su madre no creía que pudiera sobrevivir. Su padre había fallecido 3 meses antes, y su madre volvió a casarse cuando Isaac tenía 3 años. El padrastro no quiso hacerse cargo del niño y lo dejó con su abuela, con quien vivió hasta los 10 años, cuando murió el padrastro, y entonces volvió a casa de su madre, que quería dejarlo a cargo de la granja familiar. Esta infancia marcó el carácter de Newton, haciéndolo duro y solitario (en cierta ocasión admitió que de pequeño había amenazado a su madre y a su padrastro con quemar la casa con ellos dentro).

Newton estaba mucho más interesado en los libros que en el trabajo de la granja, y finalmente

consiguió dejar esta e ingresar en Cambridge. Su afición por la ciencia le llevó por diversos caminos, entre ellos el estudio de la luz y el color, pero los dos logros que le dieron la fama fueron la invención del cálculo infinitesimal (en paralelo con Gottfried Leibniz) y su trabajo sobre la gravitación universal, publicado en el año 1687¹⁷. En esta obra, Newton establece las leyes del movimiento y de la gravitación universal¹⁸, y muestra que con las matemáticas se explican tanto las órbitas de los planetas como las trayectorias de los objetos en la Tierra; es decir, que las leyes de la física son universales.

La trascendencia de la obra de Newton para el progreso posterior de la física hace que a menudo se considere la fecha de publicación de su trilogía como la del fin de la Revolución Científica. A la muerte de Newton, el poeta inglés Alexander Pope escribió un epitafio que decía: «La naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche; dijo Dios "¡sea Newton!" y todo se hizo luz».

¹⁴ *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo).

¹⁵ Se retractó bajo amenaza de tortura. Tras la retractación se atribuye a Galileo la célebre frase «*Eppur si muove*» (Y sin embargo se mueve), refiriéndose a que la Tierra sigue el movimiento que observa la ciencia, a pesar de lo que digan los dogmas establecidos.

¹⁶ Frecuentemente se dice que Newton nació el mismo año en que murió Galileo. La confusión se debe a que Inglaterra todavía usaba el calendario juliano, mientras que el resto de Europa había adoptado ya el gregoriano (el usado generalmente hoy). Según el calendario juliano, Newton nació el 25 de diciembre de 1642, y Galileo había muerto el 29 de diciembre de 1641, mientras que de acuerdo con el calendario gregoriano, el nacimiento de Newton fue el 4 de enero de 1643 y la muerte de Galileo ocurrió el 8 de enero de 1642. En cualquier caso, la diferencia entre ambas fechas es de 361 días.

¹⁷ En los tres volúmenes que forman los *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (Principios matemáticos de la filosofía natural).

¹⁸ La ley de la gravitación universal puede expresarse así: cualquier par de objetos experimenta una atracción mutua directamente proporcional al producto de sus masas respectivas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos.

Empecemos por el principio: el origen de la ciencia

La ciencia había alcanzado la mayoría de edad. En consecuencia, Sheldon es un gran admirador de Newton, y en una ocasión incluso llegó a proponer utilizar un busto suyo como decoración del árbol de Navidad, más válido según él que los habituales motivos navideños. A lo largo de la serie, recurre a menudo al método científico surgido en la Revolución Científica para tomar decisiones. De hecho, suele ser la única manera de convencerle de hacer algo que en realidad no quiere hacer: que lo considere como un experimento en el que pueda recoger datos y poder confirmar o descartar sus hipótesis (normalmente suele confirmarlas).

Apelar al espíritu científico del personaje es la mejor herramienta para convencerle de hacer algo, porque es capaz de oponerse a casi todo, pero no a la ciencia. Así es como acude a la fiesta de Halloween del apartamento de Penny y se sienta en el sofá examinando el comportamiento de todos los presentes. Esta es la misma actitud que adopta una noche en la que Raj le lleva a un local de copas para ligar (a cambio de una edición limitada de la linterna de Linterna Verde), donde acaban conociendo a dos chicas. Para Sheldon no se trata de ligar, sino del estímulo de poder realizar un experimento, analizar los datos y llegar a conclusiones.

De hecho, es el mismo motivo que le llevó a aceptar dar clases de física a Penny, a pesar de que lo consideraba una pérdida de tiempo: lo convirtió en un experimento y de esta manera también fue una actividad interesante para él. Sin embargo, los resultados del Proyecto Gorila demostraron que la hipótesis del personaje en este caso no era válida, pues Penny logró aprender conceptos científicos gracias a las lecciones de Sheldon, y en una cena deja a los demás con la boca abierta al comentar los parecidos entre el trabajo de Leonard y el de los científicos holandeses.

En la piscina de bolas: átomos, partículas y «bazinga»

Sé que puedo parecer perturbado, pero de hecho soy un físico de renombre mundial. Pregúnteme la diferencia entre un bosón y un fermión. ¡Adelante, pregunte! ¡Los bosones tienen un espín entero, los fermiones tienen un espín semientero!

(Temporada 8, episodio 1)

Una de las escenas más divertidas e icónicas de *The Big Bang Theory* tiene que ver con una piscina de bolas en la que Sheldon se mete y luego se niega a salir, para desesperación de Leonard, a quien no le queda más remedio que entrar para sacarlo de allí. La escena del segundo persiguiendo al primero mientras este se zambulle entre las bolas y sale por el lado opuesto es garantía de risas. El episodio suele recordarse porque es una de las primeras veces que Sheldon utilizó su famosa expresión «bazinga», que utiliza para señalar cuándo ha conseguido tomarle el pelo a alguien. Sin embargo, pocos recuerdan los motivos que le llevaron a lanzarse a la piscina de bolas, que están directamente relacionados con el tema de este segundo capítulo. Y es que unos días antes Sheldon había pasado toda una noche en vela intentando resolver una paradoja

muy compleja: ¿por qué los electrones actúan como si no tuvieran masa cuando viajan a través del grafeno?

- Sheldon: Los electrones se mueven por el grafeno, actúan como si no tuviesen masa.
- Howard: ¿Cuánto lleva atascado?
- Leonard: Intelectualmente, unas 30 horas. Emocionalmente, unos 29 años.
- Sheldon: La unidad celular contiene dos átomos de carbono, el ángulo interior de un hexágono es de 120 grados.
- Howard: ¿Has probado reiniciándolo?
- Leonard: No. Creo que es un problema de *firmware*.

Las elucubraciones de Sheldon persisten más tarde, en la cafetería: «Estructura constante, un átomo (...)

El patrón es como el de los fermiones (...) Viaja por las vías (...) hexagonal, siempre es hexagonal».

Tres días después sigue intentando resolver el problema utilizando unas canicas para reproducir el modelo del grafeno. Como esto no es suficiente, decide acabar en la piscina de bolas porque necesita algo más grande. Así, le dice a Leonard desde la piscina: «Tú puedes empezar a clasificar protones y neutrones mientras yo construyo átomos de carbono».

¿Por qué los electrones actúan como si no tuvieran masa cuando viajan a través del grafeno? Podrás leer la respuesta a este enigma al finalizar el capítulo. Antes vamos a aclarar todos los nombres que hemos mencionado hasta ahora y que quizás no acabas de tener claro en qué consisten: átomos, electrones, fermiones... Para poder seguir los pensamientos de Sheldon es necesario volver a hacer un viaje en el tiempo, esta vez al año 450 AEC, y situarnos en Abdera, una ciudad floreciente, tanto en lo económico como culturalmente, a donde llegó el filósofo Leucipo de Mileto y poco después fundó allí una escuela, entre cuyos alumnos destacó Demócrito. La mayoría de lo que conocemos de él nos ha llegado a través de otros autores, como Platón y Aristóteles. De este modo, sabemos que Demócrito afirmaba que el universo es un espacio vacío

ilimitado y que todo cuanto hay en él está formado por diminutos corpúsculos que no pueden ser divididos en partes más pequeñas. Por ello los llamó «átomos», que en griego significa «indivisible». Las distintas combinaciones que podían formar al unirse explicarían la variedad de materiales observados en la naturaleza.

El modelo atómico

El modelo atómico de Demócrito surgía de una observación racional del mundo, desprovista de ideas preconcebidas, y se ajusta conceptualmente a la realidad tal como hoy la conocemos. Desafortunadamente, no recibió el reconocimiento que merecía, exceptuando algún caso aislado como el del filósofo griego Epicuro de Samos y el del poeta y filósofo romano Tito Lucrecio Caro. Ese desinterés, y sobre todo la persistente influencia de Aristóteles en la cultura occidental, hicieron que hubiera que esperar hasta el año 1649 (¡17 siglos más tarde!) para que el sacerdote francés Pierre Gassendi, doctor en teología y profesor de matemáticas, publicara un libro en el que recuperaba el modelo atomista y proponía que los átomos pueden juntarse (él decía

que mediante una especie de ganchos) para formar las moléculas de las distintas sustancias (aunque se sintió obligado a aclarar que la creencia en las ideas de un ateo como Lucrecio no significaba un menoscabo del cristianismo).

La propuesta de Gassendi llegó en un momento en que ya se apreciaba que la observación y la experimentación constituyen un medio más eficaz para llegar al conocimiento de la realidad que la creencia ciega en los autores antiguos. En esta línea, el astrónomo y matemático Edmond Halley, quien calculó la órbita del cometa que lleva su nombre, ideó un método para calcular el diámetro de un átomo. Consultó a unos joyeros la cantidad mínima de oro que necesitaban para recubrir un alambre de plata, con la creencia de que el grosor de la mínima capa posible debería corresponder al tamaño de un átomo. A partir del peso del oro utilizado, la densidad de este y la superficie recubierta, llegó a la conclusión de que el diámetro del átomo de oro debía ser inferior a 2×10^{-7} m (0,2 milésimas de milímetro). En realidad, el valor correcto es muy inferior, ya que conseguir por medios mecánicos un recubrimiento

formado por una sola capa de átomos (o unas pocas capas) es casi imposible. El valor que Halley obtuvo debía corresponder a unas 1500 capas, puesto que el átomo de oro mide realmente $1,4 \times 10^{-10}$ m.

Las primeras evidencias de la existencia de los átomos no llegaron hasta principios del siglo XIX, gracias al químico, físico, matemático y meteorólogo inglés John Dalton¹, quien llevó a cabo una gran cantidad de reacciones químicas y anotó en todas ellas el peso de cada uno de los elementos utilizados y el de las sustancias resultantes. Al analizar cuidadosamente los datos obtenidos, algo le llamó poderosamente la atención: cuando dos elementos químicos pueden combinarse entre sí para formar más de un tipo de compuesto, las proporciones necesarias en cada caso guardan una relación correspondiente a un número entero (o, en algunos casos, una fracción de números enteros). Un ejemplo lo ilustrará con mayor claridad. El carbono y el oxígeno pueden combinarse para obtener monóxido de carbono o dióxido de carbono. En el primero, cada gramo de carbono necesita 1,33 g de oxígeno, mientras que en el segundo requiere 2,66 g, justo el

¹El daltonismo recibe este nombre porque Dalton, que lo padecía, fue la primera persona que publicó un artículo científico sobre este trastorno (*Extraordinary facts relating to the vision of colours*, 1794).

doble². De ello Dalton dedujo que: 1) los elementos están formados por átomos; 2) todos los átomos de un elemento son iguales entre sí; 3) los átomos de diferentes elementos tienen propiedades distintas; y 4) en una reacción química los átomos se unen o se separan en determinadas proporciones para formar los compuestos. Dalton publicó estas conclusiones en 1808³, proporcionando una nueva orientación a esta ciencia.

El «átomo» deja de serlo

Se habían necesitado más de dos milenios para que la idea del átomo como constituyente elemental de la materia fuera aceptada de modo generalizado. Sin embargo, bastarían unas pocas décadas para descubrir que aquel «corpúsculo indivisible» imaginado por Leucipo y Demócrito estaba formado en realidad por otras partículas más pequeñas.

Aunque el descubrimiento de la primera partícula subatómica (el electrón) se produjo en 1897, el camino que condujo a él se inició de modo más o menos fortuito en el año 1800, cuando el químico William Nicholson y el cirujano Anthony Carlisle, ambos ingleses,

experimentando con una pila voltaica observaron que al hacer circular una corriente eléctrica a través de agua, esta se descompone en sus dos componentes: hidrógeno (que va al cátodo, conectado al polo negativo de la fuente de corriente) y oxígeno (que va al ánodo, conectado al polo positivo). Este fenómeno, denominado electrólisis, fue estudiado por el físico y químico británico Michael Faraday, que en 1834 publicó dos leyes que relacionaban la masa depositada en un electrodo con la cantidad de electricidad que lo ha atravesado, y con el peso equivalente de la sustancia (relacionado con su peso atómico).

En una conferencia pronunciada en 1874, el físico y matemático irlandés George Johnstone Stoney expuso que a partir de las leyes de Faraday debía deducirse que la cantidad de electricidad no podía adquirir cualquier valor, sino que debía ser un múltiplo de una carga elemental, a la que inicialmente denominó «electrino» y más tarde «electrón». De manera independiente, el médico y físico alemán Hermann von Helmholtz, en un seminario en

1881, propuso también la existencia de unos «átomos de electricidad», aunque tanto estos como los electrones eran considerados simples unidades de medida de la carga eléctrica, y no como partículas.

Por aquellos años, el inventor estadounidense Thomas Alva Edison trataba de perfeccionar sus lámparas eléctricas. Dos problemas le preocupaban: la escasa duración de los filamentos y el ennegrecimiento de la lámpara. En una de las muchas pruebas que llevó a cabo añadió en el interior de la lámpara una fina placa de platino que conectó al polo positivo de la alimentación a través de un galvanómetro que medía la corriente circulante. Edison observó que una parte de la corriente del filamento pasaba a través del vacío de la lámpara hacia la placa de platino, y que la cantidad de corriente era mayor cuando se aumentaba el voltaje aplicado a la placa. Aunque este hecho podía haberse atribuido a la existencia de partículas eléctricas, a Edison le interesaba más el efecto práctico del experimento, y cuando en 1883 solicitó la patente del dispositivo lo hizo definiéndolo como un

² Cada molécula de monóxido de carbono contiene un átomo de oxígeno y uno de carbono, mientras que la de dióxido de carbono está formada por dos de oxígeno y uno de carbono. Por esta razón, en el segundo caso se necesita el doble de oxígeno para la misma cantidad de carbono

³ En un libro titulado *A New System of Chemical Philosophy* (Un sistema nuevo de filosofía química).

«indicador eléctrico» que podía ser utilizado en «sistemas de distribución eléctrica para medir las variaciones de consumo en las diversas partes del distrito».

El pudín de pasas

Las investigaciones de las últimas décadas del siglo XIX ya parecían indicar que el electrón no era tan solo una unidad de medida de la carga eléctrica, sino una partícula material, pero también podía tratarse simplemente de un átomo cargado eléctricamente, como los iones de cloro y sodio que se producían en la electrólisis de la sal común. Faltaba, pues, un experimento que, además de confirmar la existencia corpórea del electrón, demostrara que es una partícula distinta de los átomos conocidos.

Tal experimento tuvo lugar en 1897 y lo llevó a cabo el físico inglés Joseph John (J. J.) Thomson cuando trabajaba con tubos de rayos catódicos (las pantallas de los televisores antiguos eran dispositivos de este tipo adaptados para la proyección de imágenes). Los utilizados por Thomson consistían en un tubo de vidrio cerrado herméticamente en cuyo interior se había eliminado la mayor parte del aire, y en el que se habían dispuesto dos electrodos conectados a sendos polos de una fuente de alimentación de alto voltaje. En un extremo del tubo se

hallaba el cátodo (conectado al polo negativo), y a cierta distancia, el ánodo (conectado al polo positivo), que tenía una pequeña ranura en su centro. Además, el extremo del tubo opuesto al cátodo estaba pintado interiormente con fósforo luminiscente. Al conectar la alimentación, el cátodo emite electrones que son atraídos fuertemente por el ánodo, por lo que adquieren una gran velocidad. Algunos de ellos pasan por la ranura y siguen su camino en línea recta hasta el otro extremo del tubo, donde provocan la luminiscencia del fósforo en el punto de contacto.

Con el objetivo de determinar las propiedades de los electrones, Thomson añadió, alrededor del camino que seguían los rayos tras pasar por la ranura del ánodo, dos placas cargadas eléctricamente y dos imanes. De este modo, observando la desviación producida en los rayos que llegaban al fósforo podía calcular la carga eléctrica y la masa de las partículas circulantes. Tras numerosas observaciones con variadas configuraciones de los componentes concluyó que:

- Los rayos catódicos son partículas con carga negativa.
- Tales partículas son las mismas cualquiera que sea el material del cátodo.
- Las partículas tienen una masa unas 2000 veces menor que la del

menor átomo existente (el de hidrógeno).

Con ello quedaba probado que los electrones eran partículas que formaban parte del átomo y que podían desprenderse de él, por lo que los átomos dejaban de ser las partes indivisibles de la materia y se hacía necesario buscar un nuevo modelo atómico. Fue el mismo Thomson el primero en proponerlo. Como el conjunto del átomo es neutro, si en él hay electrones (negativos) el resto del átomo debe contener cargas positivas que los equilibren. Así que imaginó que el átomo era una bola con carga positiva repartida uniformemente, dentro de la cual flotan los electrones. Por la semejanza de este modelo con cierto postre, es conocido con el nombre de «pudín de pasas».

El modelo nuclear

La teoría de que los átomos de un elemento podían convertirse en otros elementos fue formulada por Ernest Rutherford, en 1902, junto con el radioquímico inglés Frederick Soddy. Por sus investigaciones le fue concedido el Premio Nobel de Química. Además, Rutherford ideó y dirigió un experimento de gran importancia, habitualmente conocido como el «experimento de la lámina de oro». Su ejecución práctica, entre los años 1908 y 1913, corrió a cargo del físico alemán

Hans Geiger⁴ y el físico inglés Ernest Marsden, que cuando empezó a trabajar en el experimento tenía tan solo 20 años. El objetivo era estudiar la distribución de la materia en el interior del átomo, que por aquel entonces se suponía que seguía el modelo del pudín de pasas ideado por Thomson. Para ello, se disponía una muestra de un metal radiactivo (radio) en el interior de una caja de paredes espesas de plomo que absorbían la radiación, con una única minúscula perforación por la que podía salir un fino haz de partículas alfa (núcleos de helio). A la salida de este haz se colocaba una delgada lámina de oro rodeada por una pantalla detectora circular, de manera que las partículas que traspasaban la lámina o rebotaban en ella al chocar con la pantalla generaban un destello en el punto correspondiente. Si el modelo de Thomson era cierto, la carga del átomo estaría repartida por toda su extensión, con lo que la fuerza de repulsión en cada punto sería pequeña, y la mayoría de las partículas alfa pasarían con una desviación mínima o nula. En efecto, casi todas ellas traspasaban la lámina sin desviarse, pero sorprendentemente una mínima

cantidad, solo una de cada varios millares (el número dependía de las condiciones de los diversos experimentos), sufría una desviación de más de 90° (es decir, en vez de atravesar la lámina, retrocedía). Rutherford interpretó estos resultados proponiendo su modelo nuclear del átomo, que dice así:

- La mayor parte del átomo es espacio vacío (puesto que la mayoría de las partículas alfa lo traspasan sin sufrir ninguna desviación).
- La mayoría de la masa del átomo y de su carga positiva se encuentra concentrada en un pequeñísimo espacio en el centro del átomo, el núcleo (ello explicaría la pequeña fracción de partículas que sufren una fuerte desviación).
- Los electrones cargados negativamente estarían rodeando el núcleo, a cierta distancia de él.

Las primeras partículas

En 1919 Rutherford consiguió realizar la primera transmutación de un elemento en otro (aparte de las que había observado que se producían de modo natural en los fenómenos radiactivos) bombardeando átomos de

nitrógeno con partículas alfa (núcleos de helio), obteniendo átomos de oxígeno y núcleos de hidrógeno. Como el hidrógeno es el elemento con el peso atómico más bajo, el hecho de que fuera uno de los productos obtenidos en la reacción anterior condujo a Rutherford a pensar que el núcleo de hidrógeno en realidad era una partícula elemental, y que el núcleo de los átomos de cada uno de los restantes elementos contenía un número determinado de estas partículas, a las que llamó protones (del griego *πρῶτον*, *prôton* = primero).

La concentración de la carga positiva en el núcleo planteaba el problema de cómo este podía mantener su estabilidad a pesar de la fuerte repulsión mutua que debían experimentar los protones. Rutherford propuso que debía existir en el núcleo una nueva partícula que mantuviera la unión, a la que dio el nombre de «neutrón» (porque sería una especie de protón sin carga, es decir, neutro). Fue un ayudante de Rutherford, el físico inglés James Chadwick, quien lo descubrió en 1932, por lo cual obtuvo el Premio Nobel de Física del año 1935. El neutrón tiene una masa ligeramente superior a la del protón.

⁴Es la persona que ideó el principio en que se basa el contador Geiger, el instrumento usado para medir los niveles de radiación, y que posteriormente lo desarrolló junto a Walther Müller, por lo que el dispositivo utilizado en el contador recibe el nombre de tubo Geiger-Müller.

Dos años antes del descubrimiento del neutrón, el físico suizo-estadounidense Wolfgang Pauli, Premio Nobel de Física en 1945, había estado investigando la desintegración beta en la que parecía producirse una pérdida de energía contraria a la ley de conservación de la energía. Pauli propuso la hipótesis de que la diferencia de energía se debía a una nueva partícula sin carga, de masa muy pequeña. Sin embargo, no se atrevió a publicarlo en un artículo, y simplemente lo comunicó a un grupo de físicos, entre los que se encontraba el italiano Enrico Fermi, Premio Nobel de Física en 1938, quien tomó la idea en serio y desarrolló su teoría en 1934, asignando a la nueva partícula el término «neutrino» (en italiano, pequeño neutrón). Calculó que, en caso de existir, el neutrino debía tener una masa inferior al 1% de la del protón, e interactuar mínimamente con la materia, lo que le haría de difícil detección. El descubrimiento del neutrino no se produjo hasta 1956, y fue llevado a cabo por los físicos estadounidenses Clyde Cowan y Frederick Reines. Este último recibió el Premio Nobel de Física en 1995 por tal descubrimiento (Cowan no pudo recibirlo porque había

fallecido, y desde 1974 los estatutos de los Premios Nobel impiden conceder premios a personas fallecidas⁵).

Como los neutrinos solo se ven afectados por la llamada interacción débil, que tiene un radio de acción sumamente pequeño, pueden atravesar enormes extensiones de materia sin dificultades. Las reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas generan gran cantidad de neutrinos que salen disparados en todas direcciones. Se calcula que, en un segundo, cada centímetro cuadrado de superficie terrestre es atravesado por unos 65.000 millones de neutrinos procedentes del Sol, y por tanto en este mismo tiempo cientos de miles de millones de ellos pasan a través de cada uno de nosotros. Durante un largo viaje en coche, y como una forma de pasar el tiempo, Sheldon inventa una particular versión del juego «veo, veo» basándose en los neutrinos:

– Sheldon: ¿Quieres jugar a un juego de física para viajar que he inventado, llamado “no veo, no veo”? Tiene toda la tensión y emoción de “veo, veo”, con la diversión añadida de las partículas subatómicas y las ondas de fuera del espectro visible.

- Leonard: Si es la mitad de divertido que “Hay 10 elevado a 4 botellas de cerveza en la pared”, me apunto.
- Sheldon: Empezaré yo. No veo, no veo, una cosita... algo que nos acaba de atravesar.
- Leonard: El café con soja que me he tomado.
- Sheldon: ¿Quieres jugar, por favor? No veo, no veo, una cosita, algo que nos acaba de atravesar.
- Leonard: No sé... Si 65.000 millones de neutrinos del Sol atraviesan un centímetro cuadrado cada segundo, suponiendo que la superficie de este coche es de unos 60.000 centímetros cuadrados, eso significa... ¿3,9 por 10 elevado a 15 neutrinos del Sol?

El modelo básico

Llegados a este punto, la relación de partículas elementales conocidas se reducía a cuatro, que además podían estructurarse de una manera simple y elegante, pues había dos de ellas grandes y pesadas, que formaban el núcleo de los átomos, y otras dos pequeñas y ligeras. Además, en cada grupo había una con carga y otra neutra. A las grandes se las llamaba colectivamente «hadrones» (del griego ἄδρός, *adrós* = grande,

⁵A no ser que el fallecimiento se produzca después del anuncio de la concesión.

	Con carga	Sin carga
Grandes, masivas (hadrones)	Protón (+)	Neutrón
Pequeñas, ligeras (leptones)	Electrón (-)	Neutrino

masivo), y a las pequeñas, «leptones» (del griego λεπτός, *leptós* = pequeño, ligero).

Las partículas se multiplican

La constatación de la divisibilidad del átomo y, por tanto, de la posible existencia de más componentes de este, pareció abrir la caja de Pandora y provocó un continuo descubrimiento de nuevas partículas que destruían la simplicidad del modelo original. No solo esto, sino que muchas de estas partículas no formaban parte de los átomos ni de las radiaciones conocidos hasta entonces, lo que hacía que algunos de tales descubrimientos fueran una inesperada sorpresa. Así sucedió en 1936, cuando el ya citado Carl Anderson y el también físico estadounidense Seth Neddermeyer

descubrieron en los rayos cósmicos el muon, una partícula que, como el electrón, presentaba una carga negativa, pero con una masa muy superior. Al tener noticia de ello, el físico estadounidense, nacido en Austria, Isidor Isaac Rabi, Premio Nobel de Física en 1944, exclamó «¿Quién ha pedido eso?».

A mediados del siglo xx, el número de partículas conocidas era ya considerable, como lo muestran dos anécdotas. La primera la narra el estadounidense Leon M. Lederman, Premio Nobel de Física en 1988, que cuenta⁶ que, cuando era joven, se encontró casualmente con Fermi, e impresionado por tener la ocasión de hablar con un Premio Nobel le preguntó su opinión sobre el descubrimiento de una partícula llamada «K-cero-dos». Fermi le respondió: «Joven, si pudiese recordar los nombres de esas partículas habría sido botánico». La segunda corresponde al físico Willis E. Lamb, quien en su discurso de aceptación del Nobel de Física en 1955 dijo que «había oído decir que anteriormente al descubridor de una nueva partícula elemental se le recompensaba con un Premio Nobel, pero ahora un

descubrimiento de este tipo debería ser castigado con una multa de 10.000 dólares».

La antimateria

En 1928, el físico británico Paul Dirac desarrolló unas ecuaciones que lograron adaptar las teorías cuánticas⁷ a la relatividad de Einstein. Sus fórmulas describían las características de las partículas, pero para cada una de ellas admitían dos soluciones con cargas opuestas (del mismo modo que la ecuación $x^2 = 9$ admite las soluciones $x = 3$ y $x = -3$). Así, por ejemplo, tanto valían para el electrón de carga negativa como para una partícula que tuviera las mismas características del electrón, excepto que su carga fuera positiva. Aunque inicialmente Dirac no tuvo en cuenta este hecho (más tarde dijo que «por pura cobardía»), no tardó en darse cuenta de que lo que las ecuaciones predecían era la existencia de las antipartículas, que son como la imagen especular de las partículas conocidas. Cada partícula tiene su antipartícula, y del mismo modo que las partículas forman la materia, las antipartículas forman la antimateria⁸.

En 1932, el físico estadounidense Carl Anderson descubrió la primera antipartícula: el positrón (la opuesta

⁶ En su libro *The God Particle* (La partícula de Dios).

⁷ Descritas en el capítulo *El examen de Howard y la física cuántica*, pág. 61.

⁸ En 1995, el profesor Walter Oelert y un equipo internacional consiguieron sintetizar por primera vez átomos de antimateria a partir de antipartículas elementales.

del electrón). Anderson lo consiguió estudiando los rayos cósmicos a través de una cámara de niebla (una cámara con gas supersaturado de vapor de agua). Cuando las partículas lo atraviesan chocan con los átomos y liberan electrones, creando iones que provocan la condensación de minúsculas gotas de agua, que revelan el camino seguido por la partícula (dejan una estela o traza). La cámara estaba rodeada por un potente imán que provocaba la desviación de las partículas cargadas, en uno u otro sentido según su carga eléctrica. El grosor de la traza, así como su curvatura y dirección, permiten detectar la masa y la carga de la partícula. De este modo vio una partícula que seguía una trayectoria semejante a la del electrón, pero que se curvaba en dirección contraria.

Por sus trabajos, Dirac obtuvo el Premio Nobel de Física de 1933, y Anderson el de 1936. En su discurso de aceptación del premio, Dirac explicó la completa simetría de materia y antimateria, y afirmó que «debemos considerar un mero accidente el hecho de que la Tierra (y presumiblemente el conjunto del sistema solar) contenga preponderantemente electrones negativos y protones positivos. De hecho, podría haber la mitad de las estrellas de cada tipo (de materia y antimateria). Ambos tipos de estrellas mostrarían exactamente los

mismos espectros, y no habría manera de distinguirlos con los métodos astronómicos actuales».

Cuando sendas partículas de materia y antimateria se encuentran, se aniquilan mutuamente convirtiéndose en energía según la fórmula $E = mc^2$. Ello convertiría a la antimateria en una potente fuente de energía si no fuera porque tanto su producción como su almacenamiento requieren una energía miles de millones de veces superior a la que podría obtenerse posteriormente.

Los quarks

Hasta la década de 1960 se creía que los protones y los neutrones eran partículas elementales (indivisibles), pero en realidad cada uno de ellos está formado por tres partículas, denominadas genéricamente «quarks». La existencia de los quarks fue predicha en 1964 por los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann, Premio Nobel en 1969, y George Zweig, y fue comprobada en 1968 en el SLAC National Accelerator Laboratory (Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC).

En el modelo inicial, de solo cuatro tipos de partículas habíamos distinguido dos masivas (los hadrones: el protón y el neutrón) y dos ligeras (los leptones: el electrón y el neutrino). Mientras que los hadrones, como hemos visto, están compuestos cada uno por tres

quarks (o un quark y un antiquark), los leptones son partículas elementales. Posteriormente se descubrieron otros cuatro leptones: el muon, el neutrino muónico, el tauón y el neutrino tauónico (con sus correspondientes antipartículas); así como un nuevo tipo de hadrones: los mesones, compuestos de un quark y un antiquark.

Los bosones

Nuestra visión macroscópica del mundo nos hace interpretar la materia y las fuerzas como dos partes de la realidad muy diferenciadas. Entendemos habitualmente la materia como algo de lo que están hechas las cosas que nos rodean, que ocupa un espacio, tiene una masa y una perduración en el tiempo. Por el contrario, la fuerza es una acción capaz de modificar el estado de movimiento o la forma de los cuerpos materiales. Por ejemplo, una piedra es un fragmento de materia que podemos tocar y ver, mientras que el peso de esta piedra es la fuerza con que la Tierra la atrae.

Sin embargo, cuando penetramos en el mundo subatómico la diferencia entre materia y fuerza se difumina (como veremos con más detalle en el siguiente capítulo dedicado a la física cuántica). Por ahora, bástenos decir que en este entorno las fuerzas se manifiestan como interacciones producidas por el intercambio de unas partículas portadoras de fuerza

denominadas bosones gauge. Hay cuatro fuerzas o interacciones fundamentales, de las cuales dos tienen un radio de acción limitado a las distancias que se dan en el interior del núcleo de los átomos y otras dos tienen un alcance prácticamente ilimitado. Son:

- Interacción nuclear fuerte, ejercida por los gluones.
- Interacción nuclear débil, ejercida por los bosones.
- Interacción electromagnética, ejercida por los fotones.
- Interacción gravitatoria, ejercida en teoría por los gravitones.

Una diferencia fundamental entre las partículas de materia o fermiones (los quarks y los leptones) y las de fuerza o bosones es que los fermiones ocupan un espacio, es decir, en un mismo punto solo puede haber un fermión, y en cambio un número cualquiera de bosones puede compartir un único lugar (ello hace posible que la acumulación de bosones llegue a generar campos de fuerza intensos, observables macroscópicamente). Otra diferencia entre fermiones y bosones es que estos últimos, al no ser partículas de materia, no tienen sus correspondientes antipartículas.

El modelo estándar de partículas

El conjunto de partículas conocidas (18 quarks, 18 antiquarks, 6 leptones,

	1. ^a gen.	2. ^a gen.	3. ^a gen.	
QUARKS	u arriba	c encanto	t cima	g gluón
	d abajo	s extraño	b fondo	γ fotón
LEPTONES	e electrón	μ muón	τ tauón	Z bosón Z
	ν_e neutrino electrónico	ν_μ neutrino muónico	ν_τ neutrino tauónico	W bosón W
				BOSONES GAUGE

6 antileptones y 12 bosones gauge) puede ser representado simplificada en un cuadro de 4 × 4 que ofrece cierto grado de simetría y constituye la imagen gráfica del modelo estándar.

La simplicidad y la elegancia del cuadro esconde una serie de incógnitas que los científicos intentan desvelar, como las grandes diferencias entre las masas de unas y otras partículas, o entre las intensidades de las fuerzas generadas por los distintos bosones. Además, el modelo no incluye la partícula correspondiente a la fuerza de la gravedad, porque no se ha podido comprobar su existencia. Pero la limitación de nuestro conocimiento no acaba aquí.

El mundo oscuro

Ya en las décadas de 1920 y 1930 algunos astrónomos y astrofísicos observaron que el movimiento rotatorio de los cúmulos de galaxias no se ajustaba al que les correspondería por su masa (deducida a partir de la observación de su brillo y número de galaxias). Sin embargo, sus cálculos contenían algunos errores, por lo que fueron ignorados. Fue en la década de 1970 cuando la astrónoma estadounidense Vera Rubin y su colaborador Kent Ford, al estudiar la curva de distribución de velocidades de rotación a distintas distancias del núcleo galáctico, llegaron a la conclusión de que la mayoría de las galaxias deben contener seis veces más materia que la que observamos.

Además, esta materia interactúa con la fuerza gravitatoria (pues altera el movimiento de las estrellas), pero no con la electromagnética (ya que no la vemos), por lo que se la conoce como materia oscura.

En el mundo de *The Big Bang Theory*, la existencia de la materia oscura es probada en la segunda temporada cuando un físico llamado David Underhill aporta la primera prueba concluyente de su existencia, desmontando el trabajo de Leonard, que intentaba demostrar lo contrario. Como no le basta con esto, este científico también le arrebató el interés de Penny al ser bastante más atractivo que él. Afortunadamente para Leonard, también es un mujeriego y Penny acaba deshaciéndose de él. Tras el fracaso de su trabajo, Leonard ayudará más adelante a solidificar las pruebas de la existencia de la materia oscura con un fotomultiplicador. En la tercera temporada son Sheldon y Raj los que trabajan con la materia oscura y tienen que ponerse de acuerdo (sus conflictos son el centro del episodio) para llevar a cabo un experimento sobre el espectro de aniquilación resultante de la colisión de materia oscura en el espacio. En la séptima temporada Sheldon abandona, para

sorprender a sus amigos y también de la audiencia, su trabajo sobre la teoría de cuerdas⁹ para dedicarse precisamente a la investigación de la materia oscura. En la octava temporada vuelve a coordinarse con Raj, que le informa de que el gobierno está fundando el campo de la materia oscura enviando equipos a una mina de sal para llevar a cabo experimentos. Los dos quedan atrapados dentro de los túneles en una situación claustrofóbica en la que Sheldon entra en crisis, pues se da cuenta de que su trabajo en el campo de la materia oscura apenas acaba de empezar, mientras que cuando se dedicaba a la teoría de las cuerdas era uno de los físicos más brillantes de su campo.

En la actualidad se considera que el 85% de la materia existente en el universo es materia oscura, es decir, solo el 15% restante corresponde al modelo estándar de partículas. Si sumamos la cantidad de materia oscura a la de energía oscura¹⁰, resulta que el 95% del universo corresponde a un «mundo oscuro» del que no conocemos nada. Pero vamos a acabar este capítulo con algo que sí sabemos, que es la respuesta a la pregunta «¿por qué

los electrones actúan como si no tuvieran masa cuando viajan a través del grafeno?». La incógnita no fue solucionada en la serie, pero sí lo vamos a resolver aquí. Para empezar, tenemos que explicar qué es el grafeno, que se trata de una delgada lámina de carbón (puede obtenerse separando las capas de grafito, el material utilizado en los lápices), de solo un átomo de grosor (con una estructura de colmena), que tiene unas capacidades excepcionales: es extraordinariamente resistente, buen conductor de la electricidad y superior a cualquier otro material en cuanto a conducción del calor. Es casi transparente por completo. Y a diferencia de los materiales habituales, tridimensionales, el grafeno es bidimensional.

La extrema regularidad de su estructura permite que los electrones circulen a través de ella sin los numerosos obstáculos que encuentran en otros materiales, por lo que alcanzan una gran velocidad. Debido a ello, su comportamiento no responde a la mecánica cuántica «normal», sino a la mecánica cuántica «relativista», es decir, la electrodinámica cuántica (QED, *Quantum Electrodynamics*). En la QED, el comportamiento de los

⁹ En el capítulo *Amor y desamor por la teoría de cuerdas* (pág. 84) abordaremos la teoría de cuerdas y también los motivos que llevaron a los guionistas a hacer que Sheldon abandonara este campo de estudio.

¹⁰ Explicada en la pág. 47 de este cuaderno.

En la piscina de bolas: átomos, partículas y «bazinga»

electrones cambia y debemos considerarlos cuasipartículas de Dirac sin masa. El comportamiento de los electrones en el grafeno había sido previsto teóricamente por P.R. Wallace en 1947, pero no

pudo comprobarse experimentalmente hasta 2004, cuando los físicos Andre Geim y Konstantin Novoselov, de la Universidad de Manchester, experimentaron sobre el grafeno.

Curiosamente, ambos fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 2010, apenas 8 meses después de la emisión del episodio de la piscina de bolas de *The Big Bang Theory*.

De Albert Einstein a Sheldon Cooper

– Sheldon: A ver, Penny, soy un físico, tengo conocimientos completos de todo el universo y de todo lo que contiene.

– Penny: ¿Quiénes son Radiohead?

– Sheldon: Tengo conocimientos de todas las cosas importantes del universo.

(Temporada 2, episodio 18)

Si hay un físico que sea conocido incluso por las personas que no están interesadas por la ciencia, ese es Albert Einstein. El físico alemán también es una figura muy importante en *The Big Bang Theory*, sobre todo para Sheldon Cooper, que lo tiene como un referente (podemos ver que incluso tiene un busto de Einstein en su mesa) y al que llega imitar. En un episodio en el que no encuentra la solución a un problema, Sheldon decide trabajar como camarero en el mismo restaurante donde lo hace Penny, creyendo que lo rutinario y anodino de la tarea de ella le ayudará a encontrar una idea genial. Lo hace inspirándose en Albert Einstein, cuyo tedioso trabajo en la oficina de patentes de Berna le ayudó a crear su teoría de la relatividad especial en 1905. Del mismo modo, y tras asumir que había fracasado en su investigación de los monopolos, aseguró que sus errores serían reconocidos como aciertos en el futuro, tal como ocurrió con la constante cosmológica de Albert

Einstein, primero considerada un error (por el propio científico), pero luego considerada válida.

De hecho, pueden trazarse diversos paralelismos entre el personaje y el físico que demuestran que los guionistas tomaron como referencia al físico de la lengua fuera. En lo biográfico, a los dos les costó hacer amigos de pequeños, ambos aborrecían la escuela, los dos aprendieron a tocar un instrumento a una edad muy temprana, durante la niñez tenían la costumbre de repetir frases una y otra vez (algo que Sheldon sigue haciendo como adulto), y empezaron a diseñar aparatos desde muy jóvenes. En cuanto a su personalidad, los dos tienen memoria eidética, se caracterizan por tener poco tacto y una nula capacidad para ser empáticos, y a menudo se concentran tanto que se olvidan de comer o dormir. Como Albert Einstein, la principal preocupación de Sheldon Cooper es el universo y

todo lo que contiene, un área de conocimiento en la que se considera una eminencia. ¿Pero a qué nos referimos exactamente cuando hablamos de universo?

Para entenderlo, debemos dar unos cuantos pasos hacia atrás en el tiempo y hablar de otro de los héroes de Sheldon, el físico y matemático escocés James Clerk Maxwell, que en 1864 publicó un importante artículo¹ en el que unificó la electricidad y el magnetismo (hasta entonces considerados fenómenos distintos) en un campo electromagnético, y formuló cuatro ecuaciones que resuelven cualquier problema relacionado con dichas materias. Las ecuaciones contienen una constante c , que Maxwell relaciona con la velocidad de la luz porque intuye que «la luz consiste en las ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos».

La relatividad especial

En las ecuaciones de Maxwell, la velocidad de la luz tiene un valor determinado que no depende de ningún otro factor. Siendo así, cualquier medición de la velocidad de la luz debería obtener el mismo resultado, sin importar la velocidad con que el experimentador se

¹ *A Dynamical Theory of Electromagnetic Field* (Una teoría dinámica del campo electromagnético).

mueva. Sin embargo, ello contradice la mecánica clásica newtoniana, según la cual la velocidad con que vemos acercarse un vehículo que se dirige hacia nosotros depende de cuál sea la nuestra. Por tanto, o las ecuaciones de Maxwell no eran correctas o fallaba la mecánica clásica, de la que no había razón para dudar, hasta entonces.

Albert Einstein estudió la cuestión y la resolvió con un giro genial y sorprendente: consideró que las ecuaciones de Maxwell eran correctas y que, por tanto, si la velocidad de la luz es invariable, entonces son el espacio y el tiempo los que deben ser variables. Desarrolló los cálculos a partir de esta idea y llegó a la conclusión de que cuando un objeto se mueve respecto a un observador estacionario para el objeto, el tiempo se dilata y el espacio se contrae (y también la masa del objeto aumenta en función de la velocidad, manifestando la equivalencia de masa y energía, según la célebre fórmula $E = mc^2$). La magnitud de estas variaciones viene dada por el valor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Einstein describió estos resultados en un artículo² en 1905, el tercero que

publicó aquel año, que constituye la teoría de la relatividad especial. Con la relatividad, los conceptos de espacio y tiempo dejan de ser independientes y se unen en un único espacio-tiempo.

Nos parece extraño, incluso absurdo, pensar en el espacio y el tiempo como algo que varía según el observador. Imaginamos el espacio como un escenario estático en el que se mueven los objetos y nosotros mismos, y en el que transcurre el tiempo siempre con el mismo ritmo, el mismo para todos. Y es que en nuestra vida diaria no apreciamos los efectos de la relatividad especial porque, como vemos en la fórmula, su magnitud depende del cuadrado de la relación entre la velocidad con que nos movemos y la velocidad de la luz. Para que la variación respecto a la mecánica newtoniana sea apreciable, la velocidad del objeto debe aproximarse a la velocidad de la luz, cosa que no se da en las circunstancias en que habitualmente nos movemos.

Sin embargo, si fuésemos capaces de desplazarnos a velocidades mucho más altas podríamos encontrarnos con situaciones sorprendentes, como la denominada paradoja de los dos gemelos, en la que uno de ellos marcha al espacio

en una nave espacial que viaja a una velocidad próxima a la de la luz mientras que el otro permanece en la Tierra. Según cuál sea el recorrido y la velocidad del viaje puede suceder, por ejemplo, que cuando el viajero regrese tras unos pocos años de viaje, en la Tierra hayan transcurrido muchos más, y encuentre a su hermano ya anciano, mientras que él apenas ha envejecido. Aunque tal experimento no ha podido ser llevado a cabo en las condiciones descritas, sí ha podido reproducirse a menor escala en diversas situaciones. En 1971 el físico Joseph C. Hafele y el astrónomo Richard E. Keating instalaron relojes atómicos de alta precisión en aviones comerciales y al terminar el viaje pudieron comprobar una diferencia con los que habían dejado en tierra, que coincidía con las previsiones de la relatividad especial. Posteriormente, el efecto ha sido replicado en múltiples y variadas circunstancias, confirmando en todas ellas las previsiones de Einstein.

La relatividad general

La relatividad especial recibe este nombre porque solo tiene en cuenta el caso especial en que los objetos se desplazan a una velocidad constante,

²Zur *Elektrodynamik Bewegter Körper* (Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento).

y Einstein quería ampliarla para que incluyera también los efectos de la gravedad y la aceleración (convirtiéndola de este modo en la teoría de la relatividad general). Durante la década siguiente a la publicación de la teoría de la relatividad especial, Einstein estuvo trabajando intensamente (sería más correcto decir obsesivamente) en tal empeño. Cierta día de 1907 (según se dice, cuando estaba en la oficina de patentes³) imaginó a una persona cayendo del tejado y pensó que durante su caída no sentiría la atracción de la gravedad. Similarmente, un objeto que sufre una fuerte aceleración experimenta un efecto similar al de la gravedad (es por ello por lo que durante la carrera de despegue de un avión la aceleración pega los pasajeros a los asientos con un efecto similar al que produciría la gravedad si estuvieran tumbados sobre ellos). De ahí dedujo que aceleración y gravedad eran equivalentes⁴ (Einstein consideraba que este había sido el «pensamiento más feliz de su vida»).

Diez años le ocupó a Einstein completar la relatividad general. Según esta, el universo no es uniforme, sino que se deforma (se

curva) en las proximidades de la materia. En palabras del físico teórico norteamericano John Archibald Wheeler: «la materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse, y el espacio-tiempo curvado le dice a la materia cómo moverse». Tal efecto es el que percibimos como la fuerza de atracción gravitatoria. Podemos visualizarlo imaginando que el espacio-tiempo es una inmensa lona extendida horizontalmente. Si en un punto de ella colocamos una piedra, la lona cederá a su peso formando una especie de embudo a su alrededor, tanto más profundo cuanto más pesada sea la piedra. Si ahora dejamos una bola pequeña cerca de la piedra, la bola se desplazará hacia ella como si esta la atrajera.

Lo mismo es aplicable al tiempo (nuestra lona imaginaria no solo representa el espacio, sino el espacio-tiempo), que también se deforma por acción de la materia, de manera que transcurre más lentamente cuando la atracción gravitatoria es mayor (es decir, los relojes van más lentos a nivel del mar que en la cima de una montaña). Aunque tal efecto pasa

generalmente inadvertido, podemos medirlo con los instrumentos adecuados. Es más, hoy no necesitamos ir muy lejos para encontrar un dispositivo que utiliza los efectos de la relatividad especial y general. Se trata del sistema de navegación GPS, de uso cada vez más frecuente en vehículos, teléfonos móviles, etc. Estos dispositivos obtienen su posición a partir de las señales recibidas de un conjunto de satélites que orbitan la Tierra, mediante cálculos que requieren una exactitud extraordinaria en la medición del tiempo. Sin embargo, el tiempo en los satélites difiere del de la superficie de la Tierra debido a dos efectos: 1) por la relatividad especial, la velocidad de los satélites introduce un retraso en sus relojes de unos 7 $\mu\text{s}/\text{día}$, y 2) por la relatividad general, la menor gravedad experimentada a aquella altura provoca un avance de unos 45 $\mu\text{s}/\text{día}$. Considerando ambos factores, antes de poner en órbita los satélites se ajustan sus relojes con un retraso constante de 38 $\mu\text{s}/\text{día}$ (la diferencia entre 45 y 7) para que sus indicaciones coincidan con las nuestras.

³ Einstein consideraba la oficina de patentes como «un claustro en medio del mundo donde incubé mis ideas más hermosas (...) era capaz de hacer todo el trabajo del día en dos o tres horas, y el resto lo dedicaba a trabajar en mis propias ideas».

⁴ Tanto es así que para medir la aceleración soportada por una persona en cierta situación suele utilizarse la unidad G, que equivale a la aceleración producida por la gravedad en la superficie de la Tierra. La aceleración durante la carrera de despegue de un avión comercial suele estar alrededor de 0,4 G.

El universo

En el primer capítulo vimos que Eratóstenes, en el siglo III AEC, había calculado la circunferencia terrestre basándose en la diferencia angular (denominada paralaje) entre las direcciones de los rayos solares en dos lugares de la Tierra separados por cierta distancia. Una variante de este método nos permite calcular la distancia a objetos lejanos. Para ello, imaginemos que montamos dos pequeños telescopios sobre un soporte de manera que ambos estén perfectamente paralelos y a un metro de distancia uno de otro, y que además el telescopio de la derecha puede girar horizontalmente sobre un dispositivo que nos permite medir con precisión el ángulo girado. Movemos el soporte hasta que el telescopio de la izquierda apunte en su centro a cierto objeto lejano del cual queremos medir a qué distancia está. Ahora, sin mover el soporte, giramos únicamente el otro telescopio hasta que quede centrado también en el mismo objeto, y entonces medimos el ángulo girado (la paralaje). Supongamos que el valor observado sea de medio grado sexagesimal (30 minutos de arco). Como ambos telescopios y el objeto lejano forman los tres vértices de un triángulo rectángulo del que conocemos uno de los ángulos ($0^{\circ}30'$) y el lado opuesto (la distancia entre los telescopios, un metro), por trigonometría obtenemos que la

distancia al objeto es
 $1 / \text{sen}(0^{\circ}30') = 114,6$ metros.

Algunas cámaras fotográficas utilizan todavía un sistema similar para determinar la distancia del objeto que se desea enfocar (actualmente la mayoría utiliza un sistema electrónico basado en la maximización del contraste de los contornos de ciertas áreas del fotograma). Para ello, mediante un sistema de prismas, en el centro de la imagen que ve el fotógrafo se superpone otra obtenida desde otro visor situado a cierta distancia del principal. Este visor auxiliar está sincronizado con el anillo de enfoque del objetivo de la cámara de tal modo que cuando el fotógrafo, al girar el anillo, hace coincidir exactamente las dos imágenes, el ajuste de la distancia es el adecuado.

El efecto de la paralaje es algo que podemos observar sin ningún instrumento de manera muy sencilla. Basta situarnos a corta distancia de un poste vertical (como el que sostiene una señal de tráfico) u otro objeto similar, de manera que tras él haya algún edificio u otro fondo relativamente lejano. Si ahora cerramos alternativamente uno y otro ojo, observaremos que el poste nos oculta puntos distintos del edificio, separados entre ellos por cierta distancia. Si repetimos la prueba alejándonos del poste, veremos que la distancia entre ambos disminuye, mientras que si

nos acercamos aumenta (el efecto es más fácilmente apreciable si la fachada del edificio presenta un número suficiente de elementos distribuidos regularmente, como pueden ser ventanas o columnas).

La visión binocular nos ayuda a precisar las distancias a los objetos, algo que resulta muy útil a los animales depredadores para acechar a sus presas. Por esta razón, la mayoría de las especies depredadoras han desarrollado evolutivamente ojos situados en posición frontal, mientras que a las presas, por el contrario, les interesa abarcar el máximo campo de visión para detectar a sus posibles atacantes, y por ello suelen tener los ojos a los lados.

Como es lógico, la aplicación del método de la paralaje para el cálculo de las distancias a las estrellas requiere conocer sus posiciones con una precisión extrema. Los primeros catálogos estelares (desde el de Hiparco en el siglo II AEC, que incluía 850 estrellas, hasta el de Ulugh Beg en el siglo XV con 994) fueron obtenidos a simple vista usando rudimentarios instrumentos, como los astrolabios, los cuadrantes o los sextantes, y ofrecían una precisión de aproximadamente un grado. La mayor exactitud antes de la invención del telescopio la consiguió a finales del siglo XVI Tycho Brahe, quien en su observatorio Uraniborg consiguió determinar la posición de

un millar de estrellas con una precisión de un minuto de arco, pero incluso esta no bastaba para calcular la distancia a ninguna estrella.

Hemos visto que en el cálculo de distancias por el método de la paralaje intervienen dos magnitudes. La primera es la distancia entre los puntos en que se realizan las dos observaciones: cuanto mayor sea, mayores serán también las distancias que podamos medir. La segunda es la diferencia angular que, al ser sumamente pequeña, requiere una gran exactitud en su medición. La revolución científica introdujo dos innovaciones que mejorarían significativamente ambos aspectos:

- El reconocimiento del heliocentrismo sugirió una idea: dado que la Tierra gira alrededor del Sol en 1 año, si efectuamos dos mediciones de la posición de una estrella con 6 meses de diferencia, la distancia entre ambos puntos de observación es del orden de 300 millones de kilómetros.
- La invención del telescopio permitió mejorar extraordinariamente la precisión de las posiciones estelares, y con ellas, los ángulos de paralaje.

El primer astrónomo que publicó un resultado fiable fue el alemán Friedrich Bessel, quien en 1838 midió la paralaje de la estrella 61 Cygni obteniendo un resultado de 0,314 segundos de arco, por lo que

la distancia a la estrella debía ser de unos 10 años luz (actualmente sabemos que 61 Cygni es en realidad un sistema binario, con una paralaje de 0,286 para una de las estrellas y de 0,287 para la otra, por lo que su distancia media es de unos 11,4 años luz). Otros dos astrónomos, el alemán Wilhelm Struve y el inglés Thomas Henderson, habían realizado mediciones de paralaje poco antes que Bessel, pero en el caso de Struve sus primeros datos no fueron considerados fiables, y Henderson no publicó los suyos hasta 1839.

Parémonos un momento para repasar las unidades astronómicas:

- Un año luz equivale a la longitud recorrida por la luz en el vacío en 1 año, o lo que es lo mismo, $9,46 \times 10^{15}$ metros.
- Una unidad astronómica equivale a 149.597.870.700 metros, y es ligeramente menor que la distancia media de la Tierra al Sol.
- Un pársec equivale a la distancia a la cual una unidad astronómica subtiende un ángulo de un segundo de arco (es decir, una estrella a esta distancia tendría una paralaje de un segundo de arco). Equivale a 3,262 años luz.

Los cálculos de paralaje estelar se simplifican midiendo las distancias en pársecs y los ángulos en segundos de arco. Con estas unidades, el cálculo de la distancia

se reduce a la fórmula $d = 1 / p$, siendo d la distancia y p el ángulo de paralaje. Así, por ejemplo, si la paralaje de Próxima Centauri, la estrella más cercana al sistema solar, es de 0,773 segundos de arco, su distancia a la Tierra será de $1 / 0,773 = 1,29$ pársecs (unos 4,2 años luz).

A partir de finales del siglo XIX, la utilización de la fotografía revolucionó la práctica astronómica. Hasta entonces, las mediciones debían efectuarse en tiempo real y la posición de cada astro debía calcularse visualmente usando el retículo del telescopio. En cambio, la fotografía permitía el registro de las observaciones para su posterior estudio detallado, y facilitaba la medición de las posiciones estelares. Además, aumentando el tiempo de exposición podían captarse estrellas mucho más débiles. Ello incrementó el catálogo de estrellas incluidas en el mapa celeste, y permitió que en 1910 se conocieran las distancias a 365 de ellas.

Sin embargo, a mediados del siglo XX se llegó a un punto en el que no era posible continuar aumentando la precisión de las mediciones, debido a los efectos de la atmósfera terrestre y a las deformaciones en los instrumentos producidas por la gravedad y los cambios térmicos. Para evitar ambos problemas, la Agencia Espacial Europea ha desarrollado y puesto en órbita dos observatorios espaciales: el Hipparcos (*High*

Precision Parallax Collecting Satellite)⁵, que operó de 1989 a 1993, y el Gaia (*Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*), lanzado en 2013. Del primero se obtuvo un catálogo de 2,5 millones de estrellas, y del segundo se espera conseguir un mapa tridimensional de 1000 millones de objetos astronómicos de todos tipos.

Midiendo el universo

Los protagonistas de *The Big Bang Theory* también sienten curiosidad acerca de la naturaleza del universo. ¿A qué distancia de la Tierra están los astros? ¿Hacia qué dirección se mueven? ¿Cuál es su composición? La comunidad científica ha hallado algunas respuestas a estas preguntas. Hay un episodio de la serie en el que Sheldon, Leonard, Howard y Raj se proponen calcular la distancia entre la Tierra y la Luna, algo posible con un experimento que es posible hacer con un equipamiento relativamente sencillo y que consiste en apuntar con un láser hacia la Luna y calcular cuánto tarda la luz en volver. Como es habitual en la serie, los guionistas utilizan un personaje nada versado en ciencia que sirve para explicar el proceso a los espectadores con menos conocimientos, y al mismo tiempo para introducir una dosis de

humor gracias al choque entre Sheldon y este personaje.

A menudo este personaje es Penny, pero en esta ocasión lo será su nuevo novio, Zack, introduciendo un elemento de tensión para Leonard, que lógicamente no lleva nada bien ver a la chica con otro. Todos acaban en el tejado del edificio, donde se lleva a cabo el experimento.

– Zack: ¡Whoa! ¿Es ese el láser? Es cojonudo.

– Sheldon: Sí. En 1917, cuando Albert Einstein estableció el fundamento teórico del láser en su obra *Zur Quantentheorie der Strahlung*, su mayor esperanza fue que el dispositivo resultante fuera cojonudo.

– Zack: Bien, misión cumplida.

– Leonard: Déjame explicarte qué estamos haciendo aquí. En 1969, los astronautas del Apolo 11 posicionaron reflectores en la superficie de la Luna, y nosotros vamos a disparar un láser a uno de ellos y dejar que la luz rebote en el fotomultiplicador.

– Penny: ¡Oh! Eso es muy guay.

– Zack: Una pregunta. ¿Cómo pueden estar seguros de que no explotará?

– Leonard: ¿El láser?

– Zack: La Luna.

– Sheldon: Ves, este es un hombre adecuado para Penny.

– Leonard: Es una buena pregunta, Zack.

– Sheldon: No, no lo es.

– Penny: ¡Sheldon! Sé amable.

– Sheldon: No es una gran pregunta. “¿Cómo puede alguien creer que vayamos a hacer explotar la Luna?”, esa sí es una gran pregunta.

– Leonard: No te preocupes por la Luna. Hemos ajustado el láser en modo «aturdir».

– Zack: Inteligente.

– Leonard: Ahora, seremos capaces de ver el rayo cuando sale, pero no será lo suficientemente fuerte cuando regrese para ser visto a simple vista (...) Este dispositivo, allí, medirá los fotones que devuelve y nos permitirá verlos en el ordenador. Raj, dale unas gafas.

– Zack: Genial, ¿será en 3D?

– Howard: Preparando el disparo láser a la Luna.

– Leonard: Que así sea.

– Howard: Ahí está, ha alcanzado el máximo.

– Leonard: 2,5 segundos para que la luz regrese. ¡Es la Luna! ¡Hemos dado a la Luna!

⁵Obviamente, el nombre del proyecto fue elegido para que su acrónimo coincidiera con el nombre del astrónomo Hiparco de Nicea.

- Zack: ¿Esto es vuestro gran experimento? ¿Todo esto para una línea en la pantalla?
- Leonard: Sí, pero, piensa en lo que representa. El hecho de que podamos hacer esto es la única manera de probar definitivamente que hay objetos hechos por el hombre en la Luna, puestos ahí por un miembro de la especie que inventó el avión tan solo 60 años antes.
- Zack: ¿Qué especie es esa?
- Sheldon: Me equivoqué. Penny merece un hombre mejor.

Los personajes de la serie logran con su pequeño experimento calcular a qué distancia se encuentra la Luna de la Tierra. Con procedimientos más elaborados y un equipamiento superior, la comunidad científica ha logrado llegar a diversas conclusiones que nos ayudan a comprender mejor la naturaleza del Universo: que los astros están compuestos de elementos que encontramos en la Tierra, que su movimiento en la mayoría de los casos los está alejando de la Tierra y que el Universo se encuentra en una expansión constante. Estos hallazgos han sido posibles gracias a varios métodos y fenómenos que detallamos a continuación.

Espectroscopia

Aunque el fenómeno de la dispersión de la luz a través de un prisma ya

había sido observado antes de Newton, fue este quien mediante sus experimentos en 1665 demostró que el prisma no coloreaba la luz, sino que la descomponía en los distintos colores del espectro. Para ello, en un primer experimento puso a la salida del prisma una pantalla con una ranura que solo dejaba pasar un color, que luego hacía pasar por un segundo prisma. Si el prisma realmente coloreara la luz entrante, debería observarse también a la salida de este segundo prisma una variación de colores, y sin embargo solo aparecía el mismo color entrante. En un segundo experimento eliminó la pantalla intermedia y puso el segundo prisma boca abajo. La luz que se había dispersado al pasar por el primer prisma se recombinó de nuevo en la luz blanca original.

En el año 1802, el físico y químico inglés William Wollaston observó que cuando hacía pasar la luz solar a través de un prisma y observaba el espectro ampliado detectaba en él unas líneas oscuras. Pero fue el físico industrial alemán Josef von Fraunhofer quien, tras descubrir independientemente el mismo fenómeno en 1814, prosiguió investigándolo. Ideó una nueva técnica que mejoraba la dispersión de la luz (las redes de difracción) y llegó a contar un total de 576 líneas en el espectro solar (que son conocidas como las líneas de Fraunhofer).

Fraunhofer no llegó a conocer la causa de aquellas líneas. Fueron el químico alemán Robert Bunsen y el físico prusiano Gustav Kirchhoff quienes, trabajando conjuntamente en Heidelberg, descubrieron que cuando en una llama hay una sustancia a elevada temperatura aparecen líneas brillantes en frecuencias específicas (correspondientes al tipo de sustancia), mientras que si la sustancia está presente en la llama, pero relativamente fría, produce líneas oscuras en las mismas frecuencias. Ello permitió detectar la presencia en el Sol de algunos elementos, como el sodio, por comparación del espectro de la luz solar con el de la combustión del mismo elemento. De esta manera se llegó a la conclusión de que los elementos que componen los astros se encuentran también en la Tierra.

Las Cefeidas

Las estrellas variables son aquellas cuyo brillo, visto desde la Tierra, varía con el tiempo, una particularidad que permitió calcular la distancia a que se encuentran de nuestro planeta. Los astrónomos ingleses Edward Pigott y John Goodricke estudiaron este tipo de estrellas y descubrieron varias de ellas. Goodricke era sordo a causa de una grave enfermedad que sufrió de pequeño, y tenía una gran habilidad para detectar el brillo de una estrella comparándolo con el de otras. Entre

ambos estudiaron los ciclos de variación de diversos tipos de estrellas variables. Así, por ejemplo, observaron que el brillo de Algol era constante excepto durante cierto tiempo cada 68 horas y 50 minutos, en el que descendía a su valor mínimo. De ello Goodricke dedujo, correctamente, que en realidad se trataba de un par de estrellas de las cuales una era más oscura y giraba alrededor de la otra, eclipsándola cada vez que pasaba por delante de ella.

Observaron en cambio que otras estrellas, como Delta Cephei, muestran una variación de brillo gradual y asimétrica parecida a un diente de sierra con una subida relativamente rápida y un descenso más lento (se las llama Cefeidas por haberse descubierto en la constelación de Cefeo). La razón de este tipo de ciclo es distinta al caso anterior, y la variación de brillo observado no está producida por un efecto externo, sino que es intrínseca, y se debe al dinamismo térmico de la estrella. La mayoría de las estrellas están en un equilibrio estable: la masa tiende a colapsarse en sí misma por la fuerza de la gravedad, pero el intenso calor interno crea una presión hacia el exterior que la contrarresta,

estableciéndose un equilibrio entre ambos efectos. Por el contrario, en las Cefeidas este equilibrio no existe. Cuando la estrella está relativamente fría no puede contrarrestar la fuerza gravitatoria y se contrae; ello comprime el núcleo y se genera más calor, que vuelve a expandir la estrella, lo cual produce una pérdida de energía que vuelve a enfriarla y contraerla.

El Observatorio del Harvard College fue un importante centro astronómico que llevó a cabo un intenso programa de observaciones fotográficas. Llegó a obtener hasta medio millón de placas, cada una de las cuales incluía gran número de estrellas, que debían ser estudiadas detenidamente para establecer la posición, el brillo y el color de cada uno de los astros registrados, y comparar posteriormente estos datos con los de la misma zona del cielo en otras fechas. Cuando Edward Pickering fue nombrado director en 1876, seleccionó un grupo de hombres para llevar a cabo estos trabajos, pero se sentía insatisfecho con los resultados obtenidos. Por aquel entonces tenía empleada en su hogar a Williamina Fleming, una joven de 24 años que había sido abandonada por su marido. Pickering consideró que el

cuidado, el orden y la atención al detalle con que ella atendía la casa eran precisamente las cualidades que necesitaba para el análisis de las fotografías (y además, una mujer cobraba mucho menos que un hombre). La contrató y el resultado fue excelente, hasta el punto de que Fleming diseñó un nuevo sistema de clasificación de las estrellas.

En vista de ello, Pickering fue incorporando mujeres a su equipo, entre las que destacaron Annie Jump Cannon y Henrietta Leavitt, ambas con problemas auditivos⁶. Leavitt fue asignada al estudio de las estrellas variables, y su habilidad y dedicación fueron tales que llegó a descubrir más de 2400, la mitad de todas las conocidas en su tiempo. Se interesó especialmente por las Cefeidas e intentó relacionar los dos datos de que disponía: su periodo y su brillo aparente. Sin embargo, este último dato no es algo intrínseco de la estrella, sino que depende de la distancia de esta a la Tierra, por lo que Leavitt no extraía de ello ningún resultado. Aquello cambió cuando descubrió 25 Cefeidas de la Pequeña Nube de Magallanes. Supuso que, al pertenecer todas ellas a la misma galaxia, su distancia a la Tierra debía ser aproximadamente la misma, por lo que su brillo aparente debía ser

⁶Es curioso observar la coincidencia de que Goodricke, Cannon y Leavitt sufrían sordera. Cabe pensar si la disminución del sentido del oído acentuaba su capacidad visual.

proporcional a su brillo intrínseco. Cuando representó en un gráfico el brillo de la estrella y el período de su fluctuación, comprobó que se ajustaba con bastante aproximación a una línea recta, es decir, que el brillo era proporcional al período⁷.

El descubrimiento de Leavitt permitía conocer la distancia relativa de cualquier Cefeida, puesto que bastaba observar su período para conocer su brillo intrínseco, y al comparar este con el brillo aparente observado se podía calcular la distancia relativa (el brillo aparente disminuye con el cuadrado de la distancia). Ahora solo faltaba conocer la distancia de una de las Cefeidas para saber la de todas las demás. Este dato lo consiguió el astrónomo danés Ejnar Hertzsprung, quien en 1913 calculó la distancia a varias Cefeidas por un método de paralaje estadístico.

La capacidad de conocer la distancia a las Cefeidas sirvió también para cerrar el debate (conocido como «el Gran Debate») existente entre los astrónomos que creían que nuestra galaxia, la Vía Láctea, era la única existente (y que, por tanto, las nebulosas⁸ observadas se encontraban dentro de ella), entre

los que estaba Harlow Shapley, y los que, como Edwin Hubble, afirmaban que las nebulosas eran otras galaxias distintas de la nuestra. En 1923 Hubble, usando el telescopio de 2,54 metros del observatorio del Monte Wilson en Pasadena (California), detectó una Cefeida en la nebulosa de Andrómeda, y comparando su brillo real (calculado a partir de su período) con el brillo aparente calculó que estaba por lo menos diez veces más lejos que cualquier estrella de la Vía Láctea. Hubble comprendió la repercusión que tendría su descubrimiento, por lo que no lo hizo público hasta obtener suficientes pruebas que lo confirmaran. Finalmente lo hizo en febrero de 1924. Con ello se cerraba el Gran Debate, la nebulosa de Andrómeda pasaba a ser la galaxia Andrómeda, y descubríamos que nuestro universo es todavía mucho más grande de lo que creíamos.

El efecto Doppler

El efecto Doppler es el cambio de frecuencia que se percibe cuando el objeto emisor de la onda se mueve con relación al observador. Es el fenómeno que podemos observar al escuchar la sirena de una

ambulancia: cuando el vehículo se acerca a nosotros, el sonido es más agudo que cuando se aleja. Ello se debe a que al aproximarse la ambulancia «comprime» las ondas sonoras, y a una longitud de onda más corta corresponde una frecuencia más alta (las cuerdas más cortas de un instrumento musical producen notas más agudas). Lo inverso sucede cuando la ambulancia se aleja. El mismo fenómeno sucede con las ondas lumínicas, pero dada la inmensamente mayor velocidad de la luz, su efecto resulta imperceptible por nuestros sentidos (60 km/h equivalen a un 5% de la velocidad del sonido, pero representan solo el 0,00005% de la velocidad de la luz).

Los astrónomos William Huggins y su esposa Margaret Lindsay Huggins construyeron un observatorio en Londres en el que, valiéndose de la espectroscopia, estudiaban los elementos existentes en las estrellas, y de ello concluyeron que «en todo el universo existe una misma química». Sin embargo, descubrieron también algo más importante: que la espectroscopia puede utilizarse también para determinar la velocidad relativa de las estrellas.

⁷En el eje vertical figuraba la magnitud de la estrella (una medida logarítmica de su brillo), y en el horizontal, el logaritmo del período especificado en número de días.

⁸Propiamente, una nebulosa es una nube interestelar de polvo y gases, pero anteriormente recibía este nombre cualquier objeto astronómico difuso.

Ya anteriormente se habían detectado variaciones en la posición de algunos astros, pero tan pequeñas que solo eran apreciables después de décadas o incluso siglos. Además, la observación visual únicamente permitía apreciar los movimientos transversales, y no los radiales (de acercamiento o alejamiento). El matrimonio Huggins conocía el efecto Doppler, y pensaron que si alguna estrella se desplazaba radialmente se apreciaría una variación de frecuencia en las líneas de Fraunhofer observadas en el espectroscopio. El desplazamiento debía ser tanto más grande cuanto mayor fuera la velocidad de la estrella, y sería hacia el rojo si la estrella se aleja y hacia el azul si se acerca. Efectivamente, en 1868 consiguieron detectar un

desplazamiento al rojo de un 0,015% en el espectro de la estrella Sirio, lo que les llevó a la conclusión de que se alejaba de la Tierra a unos 46 km/s.

El efecto Doppler es uno de los fenómenos favoritos de Sheldon. De hecho, en una fiesta de disfraces que Penny organiza en su piso, el personaje decide disfrazarse de efecto Doppler, a pesar de que es consciente de que nadie de los presentes va a entender el disfraz. Efectivamente, se pasa la fiesta intentando explicar a los presentes en qué consiste el efecto Doppler, sin tener éxito, mientras Leonard le insiste para que lo olvide y diga que va disfrazado de cebra. Esperamos que nosotros hayamos tenido mejor suerte intentando explicar en qué

consiste. Su importancia se hizo más evidente casi medio siglo más tarde, entre 1912 y 1917, cuando el astrónomo norteamericano Vesto Slipher llevó a cabo la medición de velocidades de 25 galaxias desde el Observatorio Lowell, en Arizona. Cabía esperar que hubiera un número similar de galaxias que se acercaban o que se alejaban, pero en lugar de ello observó 21 desplazamientos al rojo y solo cuatro al azul. Slipher supuso que ello se debía a que «todo nuestro sistema estelar se mueve y nos arrastra con él». Sin embargo, la auténtica explicación llegaría unos años más tarde y representaría un cambio radical en nuestra visión del universo. Lo veremos en el siguiente capítulo, dedicado al Big Bang.

Construimos muros, construimos pirámides

Todo nuestro universo entero estaba en un estado denso y caliente. Luego, hace casi catorce mil millones de años comenzó la expansión. Espera... La Tierra comenzó a enfriarse, los autótrofos a babear, los neandertales desarrollaron herramientas. Construimos muros, construimos pirámides. Matemáticas, ciencias, historia, desentrañando el misterio, ¡todo ello empezó con el Big Bang! ¡Bang!

(Letra de la canción de la serie *The Big Bang Theory*)

La canción que inicia los episodios de *The Big Bang Theory* nos ofrece un vertiginoso recorrido visual y sonoro a través de la historia de la vida en la Tierra, que termina afirmando: «¡Todo ello empezó con el Big Bang!». Y es que la teoría del Big Bang, que en sus inicios fue una idea controvertida, en la actualidad es aceptada mayoritariamente como la mejor explicación del origen del universo, e incluso ha sobrepasado el ámbito de los especialistas para entrar en el vocabulario popular. Sin embargo, debemos tener en cuenta que, como sucede con otros muchos avances científicos, también este abre más interrogantes de los que cierra, pues el Big Bang, más que ser el instante en que todo empieza (como dice la canción), constituye el punto donde termina nuestro conocimiento actual. Al fin y

al cabo, la teoría del Big Bang no es sino un paso más en el afán del ser humano por comprender sus orígenes.

Lemaître convence a Einstein

La contemplación de la inmensidad de la esfera celeste y su aparente estabilidad a través de los siglos invitaban a pensar que el universo había existido siempre y permanecía eternamente invariable. Esta idea se vio reforzada, en las primeras décadas del siglo XX, por los resultados proporcionados por la datación radiométrica de las rocas terrestres, que establecían la edad de la Tierra entre 1000 y 3000 millones de años (los cálculos actuales la fijan en 4,54 miles de millones). También Einstein estaba plenamente convencido de que el

universo era estático. Por ello, cuando completó su teoría de la relatividad general y observó que sus fórmulas solo permitían un universo en expansión o en contracción, introdujo en ellas un término adicional (conocido como la constante cosmológica), aunque, como él mismo reconoció, «este término solo es necesario para hacer posible una distribución prácticamente estática de la materia, como conviene al hecho de las reducidas velocidades de las estrellas».

El interés generalizado que produjeron las ecuaciones de Einstein hizo que un gran número de científicos se dedicaran a estudiarlas para tratar de deducir sus posibles consecuencias. Entre ellos estaba el matemático ruso Alexander Friedmann, que partió de las fórmulas iniciales de Einstein (sin la constante cosmológica) y concluyó que el universo tendería a contraerse a causa de la gravedad producida por la materia que contiene. En un artículo publicado en 1922, propuso tres posibles escenarios compatibles con esta hipótesis: 1) el universo se contrae progresivamente hasta llegar al colapso total; 2) la explosión inicial generó una fuerza suficiente para superar a la gravedad y continuar expandiéndose; o 3) la densidad del universo es tal que se produce cierto equilibrio entre ambas

fuerzas, de modo que no evoluciona ni al colapso ni a la expansión infinita.

Einstein rechazó estas posibilidades e incluso escribió una carta de queja a la revista que había publicado el artículo, en la que afirmaba que Friedmann no se había ajustado a las ecuaciones de la relatividad general. Tal reprobación, y la muerte de Friedmann a causa de una enfermedad 3 años más tarde, hicieron que su artículo fuera prácticamente ignorado.

Desconocedor del trabajo de Friedmann, el astrónomo y sacerdote católico Georges Lemaître siguió un camino parecido, que sin embargo tendría un resultado muy distinto. Utilizando las fórmulas de la relatividad general, Lemaître reinterpretó las mediciones de Slipher sobre la velocidad de las galaxias que hemos visto en el capítulo anterior, y en 1927 propuso que su movimiento se debe a que el universo está en continua expansión, y esta se produce de modo que la velocidad de alejamiento entre dos puntos cualesquiera del universo ha de ser mayor cuanto más distanciados se encuentren.

Por aquel tiempo, Hubble, ayudado por el también astrónomo norteamericano Milton Humason, utilizando el telescopio reflector de 2,54 metros del Monte Wilson

amplió las observaciones de Slipher con otras galaxias, y confirmó que prácticamente todas ellas mostraban desplazamientos al rojo. Además, llegó a la conclusión de que el grado de desplazamiento al rojo de un objeto estelar es proporcional a su distancia a la Tierra (resultado publicado en 1929 y que se conoce como ley de Hubble). Es decir, las estrellas y galaxias se alejan de nosotros a una velocidad tanto mayor cuanto más lejos se encuentran (concordando con la previsión de Lemaître).

La ley de Hubble suele expresarse con la fórmula $v = H_0 D$, donde v es la velocidad a la que se aleja la galaxia, D es la distancia a la que se encuentra y H_0 es el factor de proporcionalidad (la constante de Hubble). El valor estimado actualmente para esta constante, a partir de los datos obtenidos por el telescopio espacial Hubble y la sonda WMAP, es de 72 km/s por megaparsec (Mpc). Es decir, una galaxia situada a 1 Mpc se aleja de nosotros a 72 km/s, otra que se halle a 2 Mpc lo hace a 144 km/s, y así sucesivamente.

Si en cualquier dirección en que miremos vemos a los astros alejarse de nosotros, ¿debemos pensar por ello que la Tierra (o el Sol, o la Vía Láctea) es el centro del universo? En absoluto. Para ver lo que sucede podemos imaginar el universo como si fuera la superficie de un globo

hinchable, sobre el que colocamos unas pegatinas esparcidas representando estrellas y galaxias. Si hinchamos gradualmente el globo (expandimos el universo), todas las pegatinas se separarán unas de otras. Una hormiga que estuviera sobre una pegatina vería a las demás alejarse en todas direcciones (lo mismo que nosotros observamos en las galaxias). El símil del globo también nos permite visualizar otro aspecto de la expansión del universo: que lo que se expande en realidad es el propio espacio, que arrastra a los astros con él, de modo que el universo tiende a quedarse cada vez más vacío, como sucede en nuestro ejemplo, en el que las pegatinas conservan su dimensión y están cada vez más alejadas unas de otras.

Una vez confirmada la expansión del universo, en 1931 Lemaître llegó a otra conclusión que ahora, vista *a posteriori*, parece evidente, pero que entonces necesitó unas décadas para ser adoptada mayoritariamente. Pensó que, si el universo se expandía de modo continuo y había estado haciéndolo igualmente con anterioridad, debía haber algún instante en el pasado en que el tamaño del universo fuera nulo. Ello implicaba dos cosas: que el universo tuvo un origen, y que hubo una fuerza inicial que produjo su expansión (expansión que continúa en nuestros días). Hacía

pocos años que se conocía la radiactividad¹, en la que el núcleo de un átomo inestable pierde parte de su energía por la emisión de ondas y partículas. Lemaître imaginó que en su origen el universo se asemejaba a un núcleo que habría empezado a desintegrarse, por lo que denominó a su teoría «del átomo primigenio».

A Einstein, como a la mayoría de sus contemporáneos, la idea de un origen del universo le parecía contraria al sentido común y de difícil aceptación. Tal vez a Lemaître le resultaba más fácil creer en ella debido a su fe cristiana (en la Biblia se dice que «en el principio Dios creó los cielos y la Tierra»). Lemaître decía que «hay dos maneras de llegar a la verdad [la ciencia y la religión], y he decidido seguir ambas».

Tras la confirmación de la expansión del universo en 1929 y la publicación del modelo del Big Bang en 1931, Lemaître y Einstein coincidieron en unas conferencias en 1933. Al acabar la suya Lemaître, Einstein se levantó y dijo: «Esta es la más bella y satisfactoria explicación de la creación que nunca he escuchado». De hecho, Einstein reconoció que la

inclusión de la constante cosmológica en sus fórmulas había sido una chapuza innecesaria y «el mayor error de mi vida»².

Lemaître continuó trabajando y publicando el resto de su vida, dedicándose cada vez con más intensidad al campo de las matemáticas (aplicadas a la astronomía, los sistemas de numeración, el cálculo y los ordenadores). Desde 1960 hasta su muerte en 1966 fue el presidente de la Academia Pontificia de las Ciencias.

El estado estacionario

El británico Fred Hoyle y los austríacos Herman Bondi y Thomas Gold coincidieron en 1942, cuando Hoyle trabajaba para el servicio de radar del Almirantazgo Británico en Witley. Los tres compartían su interés por la astronomía, y pasaban muchas noches discutiendo los últimos descubrimientos en este campo, una actividad que continuaron una vez acabada la guerra, dado que los tres residían en Cambridge. Fruto de estos trabajos, en 1946 desarrollaron un modelo alternativo al Big Bang: el del estado estacionario (*steady state*). Según este modelo, en el

espacio se produciría una creación constante de materia en el vacío que dejan los astros en su expansión, de manera que la densidad del universo se mantendría invariable. Por ello, su aspecto en cualquier momento pasado o futuro sería siempre el mismo. Para justificar la continua creación de materia, Hoyle propuso la existencia de un campo especial (el campo C, o campo de creación), aunque no llegó a explicar en qué consistía.

La polémica entre el modelo del estado estacionario y el del Big Bang tomó para Hoyle un cariz cada vez más personal, y más que defender sus ideas en los ámbitos científicos lo hacía ante el gran público con series de televisión y novelas. En el año 1950 fue invitado a realizar cinco conferencias en el tercer canal de radio de la BBC. En la última de ellas pretendió ridiculizar el modelo de Lemaître denominándolo «el del gran estampido» (el Big Bang), calificándolo de «proceso irracional que no puede ser descrito en términos científicos». Paradójicamente, aquella denominación, que era un intento de descrédito, se convirtió en el

¹ Fue descubierta en 1896 por el científico francés Henri Becquerel, quien recibió el premio Nobel de Física en 2003 junto con los esposos Curie.

² Aunque recientemente los científicos están considerando que la constante cosmológica podría ser la que mejor se ajuste al efecto de la energía oscura que contrarresta a la gravedad.

nombre con que se ha popularizado el modelo.³

Uno de los factores que había dificultado la aceptación de las ideas de Lemaître fue que, debido a diversos problemas (dificultades de observación y confusión de Cefeidas con otros tipos de variables), los valores obtenidos por Hubble para la velocidad de expansión de las galaxias eran unas siete veces mayores que los reales (obtuvo para su constante un valor de 500 km/s por Mpc, cuando el valor estimado actualmente es de 72). Del valor calculado por Hubble se deducía que el universo tenía una edad de unos 2000 millones de años, cuando las dataciones radiométricas de las rocas terrestres ya habían establecido que la Tierra era más antigua, lo que resultaba contradictorio. Nuevas mediciones realizadas durante la década de 1950 fueron rebajando el valor de la constante hasta aproximarse al actual (según las estimaciones actuales, el universo se originó hace 13.750

millones de años, y la edad de la Tierra es de 4.543 millones de años).

Radiación de fondo de microondas

La radioastronomía nació accidentalmente en 1931. Los laboratorios Bell recibieron el encargo de estudiar el origen de las señales que interferían las comunicaciones radiotelefónicas a larga distancia, y asignaron esta tarea a Karl Jansky, entonces un joven que acababa de graduarse en la Universidad de Wisconsin. Jansky construyó una antena giratoria de unos 30 m de diámetro por 6 m de alto que exploraba y registraba las señales recibidas en todas direcciones. La mayoría correspondían a tormentas locales o lejanas, pero por debajo de ellas se percibía una especie de soplo mucho más continuo que, curiosamente, parecía adquirir su máxima intensidad cada 23 horas y 56 minutos, lo que coincide con la duración de un día sidéreo⁴. De ello dedujo que el origen de la señal se

hallaba fuera de la Tierra, y al investigar su dirección observó que procedía del centro de la Vía Láctea (donde hay una potente fuente de radiaciones electromagnéticas). En 1933 publicó estos resultados⁵. A partir de entonces, la radioastronomía se convirtió en otra herramienta para el estudio del universo.

En 1948, los norteamericanos Ralph Alpher y Robert Herman consideraron la idea de que la enorme cantidad de radiación producida en el Big Bang debía continuar presente en el universo, y llegaron a la conclusión de que la temperatura actual de tal radiación debería ser de alrededor de 5 K, es decir, -268 °C ⁶. Sin embargo, por aquel entonces no se disponía de medios para comprobar tal afirmación. En 1960, los Laboratorios Bell construyeron una antena de bocina de 6 metros para las comunicaciones con el satélite Echo, y al finalizar el servicio de este quedó disponible para investigación.

³En un mundo progresivamente influenciado por los medios de comunicación, el nombre por el que son conocidas las cosas adquiere una importancia vital. Un claro ejemplo es el del bosón de Higgs, una partícula elemental cuya popularidad se vio claramente aumentada cuando en 1993 el físico Leon Lederman publicó un libro sobre ella y lo tituló *The God particle: If the universe is the answer, what is the question?* (La partícula de Dios: si el universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?). A la mayoría de los científicos, incluido el propio Higgs, les desagradaba tal denominación, que encuentran completamente inapropiada.

⁴El día sidéreo es el tiempo que emplea la Tierra en completar una rotación sobre sí misma con respecto a las estrellas fijas. El día sidéreo es unos 4 minutos más breve que el solar, y por ello la salida de cada estrella se adelanta 4 minutos cada noche.

⁵En su artículo *Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin* (Interferencias eléctricas de origen aparentemente extraterrestre).

⁶La escala Kelvin (K) está basada en el cero absoluto, la temperatura más baja posible a la cual las partículas fundamentales tienen su mínima vibración. El cero absoluto (0 K) corresponde a $-273,15\text{ °C}$.

Los radioastrónomos Arno Penzias y Robert Wilson la aprovecharon para estudiar las señales de radio procedentes de los espacios vacíos entre las galaxias, y comprobaron que la antena recibía siempre un continuo ruido de microondas dondequiera que estuviera orientada. Inicialmente creyeron que ello se debía a algún tipo de interferencia, por lo que investigaron sus posibles causas sin ningún resultado: el ruido continuaba. Hasta que entraron en contacto con un grupo de cosmólogos de la Universidad de Princeton, y entonces comprendieron que lo que estaban recibiendo era precisamente la radiación residual del Big Bang prevista por Alpher y Herman (la llamada radiación de fondo de microondas, o CMB por sus siglas en inglés). El hallazgo, publicado en 1965, sirvió para refrendar la teoría del Big Bang.

Curiosamente, el Big Bang ya estaba presente en nuestros televisores mucho antes de que llegaran Sheldon y sus amigos. Para ser más exactos, estaba presente en los televisores analógicos cuando estos no estaban sintonizados con ninguna emisora y aparecía en la pantalla el centelleo que habitualmente

denominábamos «nieve». Una pequeña parte de este efecto (habitualmente se dice que un 1%, pero no se concreta de qué modo se ha obtenido este valor) se debe precisamente a la radiación de fondo procedente del Big Bang captada por la antena del televisor.

En 1989, la NASA (National Aeronautics and Space Administration [Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos]) puso en órbita el satélite COBE (Cosmic Background Explorer [Explorador del Fondo Cósmico]) destinado a investigar con más detalle, y fuera de la influencia de la atmósfera terrestre, la radiación de fondo de microondas. Los instrumentos del satélite detectaron una anisotropía (variación de la intensidad según la dirección) de una parte en 100.000. Tales variaciones muestran la distribución de la materia y la energía que existía en el joven universo, que sería la causante de la estructura actual de este. Asimismo, el COBE detectó que el espectro de la radiación de fondo de microondas corresponde al de un cuerpo negro⁷ con una temperatura de 2,725 K, en concordancia con las predicciones de la teoría del Big Bang. El satélite estuvo en

funcionamiento hasta finales de 1993.

Los primeros instantes del universo

Sucede en ocasiones que la aparición de una nueva teoría no invalida otra anterior, sino que simplemente la perfecciona, tal vez porque amplía el ámbito de validez de la primera (como sucede con la relatividad de Einstein respecto a la mecánica newtoniana) o porque consolida diversos campos en uno (como Maxwell unificó la electricidad y el magnetismo). Sin embargo, en otras ocasiones, dos (o más) ideas contradictorias han coincidido durante décadas o siglos y han provocado intensos debates, como los que se produjeron entre los defensores del geocentrismo y el heliocentrismo, o entre las teorías del Big Bang y del estado estacionario. En tales casos, el debate no puede cerrarse hasta que nuevas observaciones confirman las predicciones de una de las teorías y descartan las de la otra, pero ello puede requerir un largo tiempo.

Actualmente, la esencia de la teoría del Big Bang es aceptada mayoritariamente por la comunidad

⁷Se denomina «cuerpo negro» a aquel que absorbe cualquier radiación electromagnética que le llegue. Un cuerpo negro en equilibrio térmico emite radiación electromagnética cuyo espectro está determinado solo por su temperatura, independientemente de otras características.

científica (lo que no impide que todavía tenga sus detractores). Sin embargo, algunos de sus aspectos (inflación, gran unificación, etc.) aún están pendientes de verificación. Hechas estas reservas, con nuestros conocimientos actuales y aplicando las fórmulas hacia atrás en el tiempo, obtenemos que la cronología más probable para la evolución del universo a partir del Big Bang es la siguiente:

- Época Planck (desde el instante cero hasta $5,39 \times 10^{-44}$ segundos, es decir, una unidad Planck⁸). Resulta imposible saber qué sucedió, pues se daba una singularidad gravitacional (la densidad de la materia, y por tanto la curvatura del espacio-tiempo, eran infinitas) y en ella la relatividad general ya no es aplicable (es equivalente a intentar una división por cero). Se cree que durante esta época las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza (electromagnetismo, gravedad, nuclear fuerte y nuclear débil) estaban unidas en una única fuerza fundamental. Al terminar esta época, el universo tenía un diámetro de 10^{-35} m y una temperatura de 10^{32} °C.
- Época de la gran unificación (desde 10^{-43} hasta 10^{-36} segundos). La fuerza de la gravedad se separa de las demás y se generan las primeras partículas elementales.
- Época inflacionaria (desde 10^{-36} hasta 10^{-32} segundos). El universo contiene todavía muy poca materia, pero grandes cantidades de energía oscura que genera una enorme expansión (inflación), y el universo alcanza unos 10 cm de diámetro (esta es la gran explosión de la que se deriva el nombre del Big Bang). La inflación sería la que explicaría las características actuales del universo, con la materia repartida aproximadamente por igual en todas direcciones. A primera vista, que el universo se expandiera hasta 10 cm no parece gran cosa, pero si tenemos en cuenta que esta expansión se realizó en algo menos de 10^{-32} segundos, un rápido cálculo nos muestra que la velocidad alcanzada es de unos 20.000 trillones de veces la velocidad de la luz. Ello puede llevar a preguntarnos: ¿acaso la relatividad no afirma que nada puede superar tal velocidad?⁹ Efectivamente, pero lo que sucedió durante la inflación no fue que la materia o la radiación se desplazaran, sino que fue el espacio sobre el que estas se asentaban el que se expandió. Para verlo más gráficamente, volvamos al ejemplo del globo hinchado que habíamos utilizado en el fragmento dedicado a Lemaître, e imaginemos que las pegatinas se desplazan a una velocidad de 3 cm/s. Supongamos que colocamos dos de estas pegatinas una al lado de otra, y que solo se mueve una de ellas. Al cabo de un segundo se encontrará a 3 cm de la que se ha quedado inmóvil. Sin embargo, si repetimos el experimento mientras el globo está siendo inflado de manera que dobla su diámetro cada segundo (se expande), en el mismo espacio de tiempo la pegatina móvil se encontrará a 6 cm de la fija y parecerá que ha doblado la velocidad.
- Época electrodébil (desde 10^{-32} hasta 10^{-12} segundos). La fuerza nuclear fuerte se separa de las otras dos y se genera un gran número de partículas (entre ellas bosones de Higgs).

⁸ La unidad de tiempo Planck es la unidad más pequeña de tiempo que tiene un sentido físico, ya que por debajo de él, el espacio-tiempo clásico deja de tener validez y predominan los efectos cuánticos.

⁹ Para ser exactos, según la relatividad, nada que inicialmente tenga una velocidad inferior a la de la luz puede llegar a superarla, pero ello no impide que existan partículas que siempre vayan a una velocidad superior, como en alguna ocasión se ha especulado (sería el caso de los taquiones, unas partículas hipotéticas que nunca han sido detectadas).

- Época quark (desde 10^{-12} hasta 10^{-6} segundos). La fuerza nuclear débil y el electromagnetismo se separan y se genera un gran número de quarks, electrones y neutrinos. El universo se enfría hasta 10.000 billones de grados.
- Época hadrón (desde 10^{-6} hasta 1 segundo). El universo continúa enfriándose hasta 1 billón de grados, lo que permite a los quarks formar hadrones (protones, neutrones, y mesones). También se forman neutrinos.
- Época leptón (desde 1 segundo hasta 3 minutos). Electrones y positrones constituyen la mayor parte de la masa del universo.
- Nucleosíntesis (desde 3 minutos hasta 20 minutos). La temperatura baja a 1000 millones de grados, lo que permite la formación de los núcleos de algunos elementos simples (hidrógeno, helio, litio).
- Época fotón (desde 3 minutos hasta 240.000 años). El universo continúa enfriándose y está repleto de plasma.
- Recombinación/desacoplamiento (desde 240.000 hasta 300.000 años). La temperatura desciende a 3000 grados. Los átomos capturan electrones, lo que hace al universo transparente a la luz, por lo que esta es la época más antigua que podemos observar. El universo está compuesto de un 75% de hidrógeno y un 25% de helio, y apenas algunas trazas de litio.
- Era oscura (desde 300.000 años hasta 150 millones de años). La actividad disminuye y el universo está dominado por la materia oscura.
- Reionización (desde 150 millones de años hasta 1000 millones de años). El colapso gravitacional genera los primeros cuásares¹⁰.
- Formación de estrellas y galaxias (desde 300 millones de años en adelante). Las nubes de gas se colapsan por la acción de la gravedad y generan reacciones de fusión nuclear, creando las primeras estrellas y galaxias, mientras continúa la expansión.
- Formación del sistema solar (desde unos 8500 millones de años después del Big Bang). Hace unos 5000 millones de años se formó el Sol a partir de los restos de otras estrellas.
- Hoy día. Unos 13.700 millones de años después del Big Bang, el proceso continúa, mientras en un minúsculo planeta que gira

alrededor de una de las 300.000 estrellas que forman una de las 100.000 millones de galaxias del universo, unos cuantos seres (aparecidos hace tan solo una cienmilésima parte de la vida del universo, y formados por partículas generadas en el Big Bang) nos preguntamos sobre el origen de todo ello.

¿Es el Big Bang el origen de todo?

Que el Big Bang explique el origen del universo no significa necesariamente que explique el origen de todo. Nuestro conocimiento del Big Bang, además de que nos falta completar, confirmar o corregir muchos detalles, solo alcanza hasta $5,39 \times 10^{-44}$ segundos después del instante cero. Lo que existía, o lo que sucedió en aquel instante cero, escapa completamente a nuestra capacidad actual, pues las leyes físicas que conocemos se rompen cuando las aplicamos a las condiciones entonces existentes, y los conceptos que aplicamos para interpretar la realidad (espacio, tiempo, materia y energía) dejan de tener sentido. Por tanto, el Big Bang, más que ser el origen de todo, es el final de nuestro conocimiento.

¹⁰Un cuásar es un objeto muy lejano que emite enormes cantidades de energía en forma de radiaciones. Se cree que son los centros de algunas galaxias en los que se produce algún fenómeno extraordinariamente energético, tal vez un potente agujero negro.

¿Y antes del Big Bang?

Si efectivamente el punto inicial del Big Bang es una singularidad gravitacional, la pregunta puede no tener sentido por una de estas dos razones: 1) si nuestro espacio-tiempo se originó con el Big Bang, no podemos hablar de un «antes», pues el tiempo solo existía después, o 2) en caso de que existiera algún tipo de espacio-tiempo «al otro lado» del Big Bang, no guardaría ninguna relación con el nuestro (hemos entrecomillado las expresiones «antes» y «al otro lado» porque se basan en conceptos que corresponden a nuestra percepción del universo actual, tras el Big Bang).

Algunos cosmólogos proponen un modelo cíclico según el cual el universo no se originó en el Big Bang, sino que «rebotó» desde un universo anterior que se había contraído hasta alcanzar tal densidad que provocó una nueva expansión. Según este modelo, el universo podría seguir un ciclo continuo de contracciones y expansiones, y tendría 11 dimensiones, de las cuales cuatro serían las que percibimos (tres de espacio más una de tiempo). Estas cuatro dimensiones formarían nuestra brana (nuestro universo local tetradimensional que se movería en

un sustrato de más dimensiones), que coexistiría con otra similar. Cuando ambas branas se contraen llegan a colisionar, generando el rebote que vuelve a expandirlas y provocando una repetición del ciclo.

Si el Big Bang es el origen, ¿cuál es el fin?

A veces, obtener un resultado distinto al esperado puede resultar muy favorable, e incluso conducir a la obtención de un Premio Nobel, como sucedió a los astrofísicos norteamericanos Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt y Adam G. Riess. Hasta finales del siglo xx se suponía que la expansión del universo, resultante de la fuerza explosiva generada por el Big Bang, era frenada progresivamente por la acción de la gravedad que atrae a las galaxias entre sí. Durante la década de 1990, Perlmutter, por un lado, y Schmidt y Riess por el otro, trabajaban en proyectos que pretendían determinar las distancias y las velocidades de las supernovas más lejanas con el fin de calcular el grado de ralentización de la expansión del universo. En 1998, ambos equipos llegaron a una misma y sorprendente conclusión: la expansión no solo no se frenaba, sino que se aceleraba. La razón de

ello se atribuyó a la energía oscura, una supuesta y desconocida forma de energía que constituiría el 70% de la existente en el espacio (muchos físicos consideran que la energía oscura es una propiedad del mismo espacio, y se correspondería con la constante cosmológica que Einstein introdujo en la relatividad general).

El descubrimiento valió a los tres científicos el Premio Nobel de Física en 2011. Para entonces, la serie *The Big Bang Theory* ya estaba en emisión y los guionistas mostraron en un episodio a Sheldon y Leonard viendo la ceremonia por televisión en directo. El segundo prácticamente no dice nada, pero el primero no se corta a la hora de opinar: «Mira el Dr. Saul Perlmutter agarrado a su premio Nobel. ¿Qué te pasa, Saul, tienes miedo de que alguien te lo robe como tú robaste la constante cosmológica de Einstein?». Y luego prosigue: «Ah, mira, Perlmutter le está dando la mano al rey. ¡Cuidado con tu reloj, Carlos Gustavo! A lo mejor te lo quita»¹¹. De hecho, ya antes de esta escena Sheldon tenía previsto pasar cuentas con el astrofísico estadounidense, y en un episodio previo planea asistir a una conferencia de Perlmutter en Pasadena, coincidiendo con la visita de su madre, a la que le promete que humillará al Premio Nobel en el

¹¹ Temporada 5, episodio 11.

turno de preguntas. Sin embargo, acaba yendo solo, por lo que la serie no muestra la conferencia, sino que realiza una elipsis. Más tarde, Sheldon resume: «La conferencia fue una pérdida de tiempo. Hice mejores diagramas de la expansión del universo en la guardería con los contenidos de mis pañales», dice mientras tose. «¿Te has resfriado?» pregunta Amy. «No, solo soy alérgico a la gente que gana un Nobel sin motivo»¹².

El pronóstico de futuro que arrojan los datos actuales no es nada alentador: si la expansión continúa acelerándose, la distancia entre las galaxias aumentará a un ritmo cada vez más rápido y el universo terminará convirtiéndose en algo inmensamente vacío, oscuro y frío (un

final a veces denominado la «gran congelación» o *big freeze*). Aún más, es posible que la energía oscura aumente con el espacio, en cuyo caso su fuerza expansiva llegaría a separar no solo el espacio intergaláctico, sino también el interior de las galaxias (el «gran desgarramiento» o *big rip*). Una tercera posibilidad es que, si por alguna razón la energía oscura disminuye con el tiempo y llega a ser inferior a la atracción gravitatoria entre las galaxias, el universo frene su expansión e inicie un proceso de contracción hasta colapsarse completamente (la «gran implosión» o *big crunch*). Este último caso es compatible con el efecto rebote del modelo cíclico antes descrito.

En cualquier caso, nada de esto nos afecta a los humanos como especie,

pues otras causas precipitarán nuestra desaparición en un tiempo muy inferior. En los próximos 4000 millones de años, el Sol irá incrementando su luminosidad y la temperatura en la Tierra subirá hasta provocar la fusión de su superficie. Por si ello no fuera suficiente, a continuación el Sol se convertirá en una gigante roja que absorberá a la Tierra. Pero además de estos fenómenos previsibles, existen muchos otros aleatorios que en cualquier momento pueden ocasionar la destrucción de la vida en la Tierra: un choque de asteroides, perturbaciones gravitatorias, la explosión de una supernova cercana, etc.; sin olvidar los que puede ocasionar la propia humanidad: un holocausto nuclear, un desastre ecológico, etc.

¹² Temporada 5, episodio 6.

El bosón de Higgs, Stephen Hawking y el paraíso de Sheldon

– Voz: Cierra los ojos e imagina que estás en un lugar lleno de paz.

– Sheldon: Estoy dentro del CERN.

(Temporada 7, episodio 13)

No es habitual que Sheldon Cooper pida un favor. Por lo general, no necesita de los demás nada que no pueda procurarse él mismo. Sin embargo, ha habido dos situaciones, relacionadas con el tema que trataremos en este capítulo, en las que el personaje ha dejado de lado su desdén habitual. Las dos están relacionadas con dos de sus mayores deseos como científico. El primero es poder visitar el gran colisionador de hadrones del CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear), situado cerca de Ginebra, en la frontera franco-suiza. El asunto es tan importante para él que una de las cláusulas de su contrato de compañeros de piso establece que si uno de los miembros del piso logra visitarlo hará lo posible para incluir al otro en el viaje. Por eso, cuando Leonard es invitado a visitarlo, Sheldon da por

hecho que él va a ser su acompañante¹. Sin embargo, Leonard tiene previsto invitar a su novia Penny y hacer del viaje algo romántico. La decisión es ilógica para Sheldon, pues no solo implica una vulneración de su contrato, sino que además no entiende cómo puede elegir a Penny, que no tiene ningún interés por el gran colisionador de hadrones, mientras que para él es un sueño que podría hacer realidad. Sheldon declara traidor a Leonard, comparándolo con Darth Vader, entre otros, para posteriormente intentar que cambie de opinión por todos los medios. Leonard se mantiene firme. En el último momento, Penny enferma de gripe y parece que será la oportunidad de Sheldon, pero ella lo ha contagiado, de manera que al final es Raj quien acompaña a Leonard.

Quizá se estarán preguntando por qué es tan importante para Sheldon visitar el gran colisionador de hadrones. La serie hace bien en considerar esta posibilidad un hito personal y profesional para el personaje, pues se trata de la mayor y más costosa máquina jamás construida, en la que trabajan miles de científicos de todo el mundo y en la que se han invertido miles de millones de euros. A continuación explicaremos por qué es importante y qué relación tiene con el bosón de Higgs.

La mal llamada «partícula de Dios»

El mundo que conocemos se asemeja a aquellos juegos infantiles que, mediante bloques de plástico interconectables de unos pocos tipos, permiten crear múltiples y variadas construcciones. Del mismo modo, la realidad que nos rodea, aunque se nos muestra en una casi infinita variedad de formas, se reduce (hasta donde sabemos) a la combinación de 61 tipos de partículas elementales, una de las cuales es el bosón de Higgs. Sin embargo, mientras que muchas de ellas, como el tauón o el neutrino muónico, son generalmente desconocidas fuera de los ámbitos especializados, el bosón de Higgs ha

¹Temporada 3, episodio 15.

alcanzado una repercusión mediática muy superior, e incluso algunos titulares periodísticos lo presentan como la «partícula de Dios». ¿Qué lo hace tan especial?

Un nuevo bosón

El modelo estándar no es tan solo una clasificación de las partículas conocidas, sino principalmente un conjunto de tres teorías cuánticas que explican la interacción de fermiones y bosones:

1) la electrodinámica explica la fuerza electromagnética, 2) la cromodinámica explica la fuerza nuclear fuerte, y 3) la electrodébil explica la fuerza nuclear débil.

La eficacia de tales teorías fallaba en un aspecto importante: la simetría del modelo requería que los bosones gauge tuvieran masa cero, lo cual es cierto en el caso de los fotones y los gluones, pero no en los bosones Z^0 , W^+ y W^- (los causantes de la interacción débil). Era necesario encontrar algo que explicara tal creación de masa.

La solución a este problema la halló en 1960 el estadounidense Yoichiro Nambu. Basándose en estudios sobre el fenómeno de la superconductividad, formuló una

teoría matemática que explica el mecanismo de la rotura espontánea de la simetría en la física subatómica. La publicación del trabajo de Nambu inspiró a muchos físicos, y en 1964, de modo casi simultáneo, tres equipos distintos propusieron un mecanismo que explica el origen de la masa de las partículas subatómicas. Fueron, por orden cronológico: 1) los belgas François Englert y Robert Brout, 2) el británico Peter Higgs y 3) los estadounidenses Gerald Guralnik y Carl R. Hagen, y el británico Tom Kibble. Por ello parecería más adecuado denominarlo Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble, pero usualmente se le conoce como el mecanismo de Higgs. En realidad, tendría que haberse llamado de Englert-Brout, ya que el artículo en que proponían su idea² se presentó y publicó antes que los de Higgs³. Sin embargo, un error del físico teórico Steven Weinberg, que en algunas de sus publicaciones confundió las fechas de los artículos, anteponiendo el de Higgs al de Englert y Brout, se fue propagando posteriormente en el mundo de la física. No fue hasta 2011 que Frank Close explicó el error⁴ y el propio Weinberg lo reconoció el año siguiente, pero se

sigue conociendo como el mecanismo de Higgs.

El mecanismo de Higgs

Para comprender de qué modo el mecanismo de Higgs proporciona masa a las partículas debemos empezar concretando dos conceptos físicos: la masa y el campo. A veces se define la masa como la cantidad de materia, pero tal definición puede resultar confusa. Según esta, podría parecer que 250 cm³ de poliestireno expandido contienen una masa mayor que 1 cm³ de plomo, cuando es a la inversa. Tampoco hay que confundir la masa con el peso (un objeto tiene la misma masa en la Tierra o en la Luna, pero su peso en uno y otro lugar es distinto). Una definición más ajustada a la realidad es que la masa es la resistencia (inercia) que ofrece un cuerpo a cambiar su estado de reposo o movimiento. Según esto, la fuerza que debemos aplicar a un objeto para cambiar su velocidad en cierto tiempo (por ejemplo, para pasarlo de 10 a 20 km/h en 10 segundos) es proporcional a su masa, lo que se traduce en la fórmula $F = ma$ (fuerza igual a masa por aceleración). Por su parte, un campo (en física) es

²*Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons*, publicado el 26 de junio de 1964.

³*Broken symmetries, massless particles and gauge fields*, publicado el 15 de septiembre, y *Broken symmetries and the masses of gauge bosons*, publicado el 19 de octubre.

⁴En su libro *The infinity puzzle*.

simplemente algo que tiene un valor en cada punto del espacio (un valor que suele ejercer determinados efectos en tales puntos). Así, por ejemplo, hablamos del campo gravitatorio o del campo magnético.

Aunque tanto la fuerza gravitatoria como la electromagnética tienen un alcance infinito, si nos situáramos en un punto del universo enormemente alejado de cualquier influencia externa, en aquel espacio vacío el valor de ambos campos sería prácticamente nulo. Ello es así porque en el espacio vacío los campos tienden a su nivel mínimo de energía, que en el caso de las cuatro fuerzas elementales corresponde al valor cero (es decir, ausencia de fuerza alguna). Pues bien, el mecanismo de Higgs consiste en la

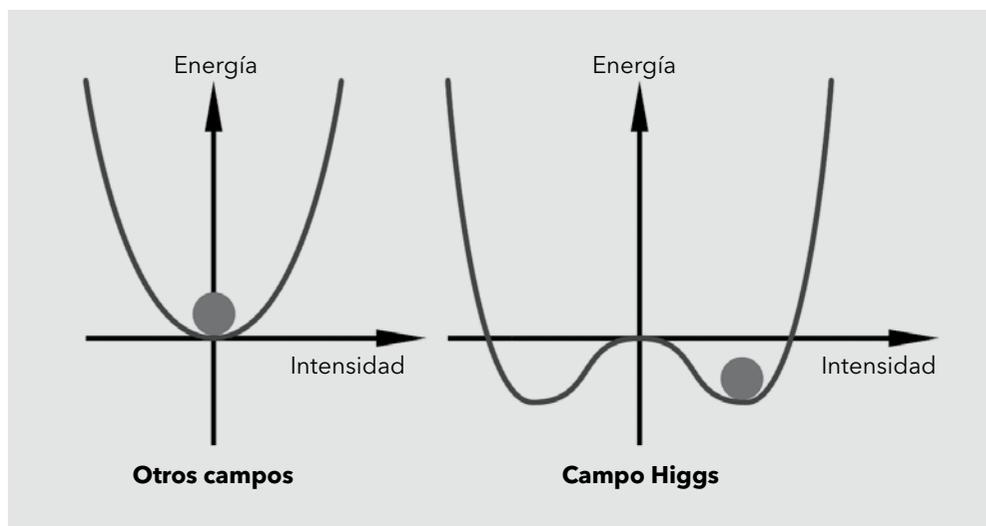
existencia de un campo (el campo Higgs) que, a diferencia de los demás, alcanza su nivel mínimo de energía para un valor distinto de cero. La figura 1 muestra la relación entre la intensidad y la energía en los campos «normales» y en el Higgs. La forma de este último suele ser denominada «el sombrero mejicano». En ambos casos, el círculo indica el estado de mínima energía al que tiende el campo en el espacio vacío (el punto más bajo de la curva).

Esto tiene un efecto importante: como las restantes fuerzas, en el espacio vacío el campo Higgs tiende a su mínimo de energía, pero en él este mínimo corresponde a una intensidad distinta de cero, y por tanto, cualquier partícula, esté donde

esté, se encuentra siempre sometida al valor fijo del campo Higgs, y la interacción de ellos genera una energía que altera la masa de la partícula según la fórmula $E = mc^2$ (ya que la masa se corresponde con la energía que tiene un cuerpo en estado de reposo). Los distintos tipos de partículas interactúan con diferente intensidad con el campo Higgs. De este modo, las que no interactúan con él conservan su masa cero (fotones, gluones), mientras que el resto de las partículas adquieren una masa mayor o menor según la intensidad de la interacción (fuerte en los quarks t , b y c , los tauones y los bosones Z y W , y débil en los electrones, los neutrinos, los muones y los quarks u , d y s).

Sin embargo, conviene aclarar un concepto que a menudo se interpreta de manera incorrecta dando a entender que el campo Higgs es el causante de toda la masa existente, cuando lo cierto es que apenas genera una mínima parte de la que tiene la materia habitual (la que forma todo aquello que tenemos a nuestro alrededor y nosotros mismos). La mayoría de la masa de los átomos se debe a los protones y los neutrones, que la obtienen por la interacción de los quarks con las fuerzas nucleares. La masa obtenida de este modo es muy superior a la que produce el campo Higgs. Aun así, la existencia del campo Higgs y su intensidad

Figura 1. Niveles mínimos de energía en el campo Higgs y en otros campos.



concreta son esenciales para la existencia de la vida tal como la conocemos, ya que incluso pequeñas variaciones de su valor generarían importantes cambios en la estructura de los átomos que alterarían de modo radical su comportamiento físico y químico.

A la búsqueda del bosón

El mecanismo de Higgs parecía una solución plausible al problema de la creación de la masa, pero por el momento se trataba tan solo de una teoría que era necesario comprobar. Del mismo modo que las cuatro interacciones fundamentales están mediadas por partículas de fuerza (los bosones gauge), debería existir otro bosón (el bosón de Higgs) cuyas propiedades correspondieran a las previstas en el mecanismo de Higgs. Desde el mismo momento de la publicación de la teoría en 1964, físicos de todo el mundo iniciaron una carrera para descubrir una partícula que reuniera tales características.

Una investigación de este tipo requiere el uso de grandes y complejas máquinas: los aceleradores de partículas. Se trata de dispositivos que lanzan partículas en sentidos contrarios a gran velocidad para producir choques entre ellas y así poder observar las eventuales nuevas partículas resultantes de la colisión. La realización práctica presenta

importantes retos tecnológicos y económicos, pues las partículas deben alcanzar una velocidad cercana a la de la luz, y para ello tienen que ser aceleradas mediante campos eléctricos y magnéticos en el interior de largos tubos. Además, su trayectoria debe ser controlada con una precisión extrema para asegurar que alcancen su objetivo y se consiga el mayor número posible de choques.

Los mayores aceleradores suelen ser del tipo sincrotrón, en el que los haces de partículas siguen una trayectoria cíclica de modo que a cada vuelta son acelerados progresivamente, aumentando con ello su energía, puesto que cuanto mayor sea esta, más masivas serán las partículas que podrán obtenerse. Las primeras partículas descubiertas fueron las más ligeras, por lo que la búsqueda de nuevas partículas requiere aceleradores cada vez más potentes.

Los físicos de partículas suelen medir la energía en electronvoltios (eV). Un eV es la cantidad de energía necesaria para desplazar un electrón entre dos puntos entre los que exista una diferencia de potencial de un voltio. El eV es, pues, una unidad muy pequeña, por lo que habitualmente se utilizan sus múltiplos: el gigaelectronvoltio ($\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$) o el teraelectronvoltio ($\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$). Dada la equivalencia entre masa y energía, la masa de las

partículas suele medirse en eV/c^2 (a veces simplificado a eV). Por ejemplo, la masa del bosón de Higgs es de unos $125 \text{ GeV}/c^2$.

Bevatron

El Bevatron fue un acelerador de partículas en Berkeley (California), que estuvo en funcionamiento desde 1954 hasta 1993. No hacía chocar partículas entre ellas, sino que las lanzaba contra un objetivo fijo. Su nombre deriva de *Billions of eV Synchrotron* (sincrotrón de miles de millones de eV). Al cabo de un año de funcionamiento permitió el descubrimiento del antiprotón, realizado por Emilio Segrè y Owen Chamberlain, quienes compartieron el Premio Nobel de Física en 1955. Durante los años siguientes, Luis W. Álvarez incorporó al Bevatron dispositivos que permitieron detectar e identificar las nuevas partículas obtenidas, lo que le valió el Premio Nobel de Física en 1968.

Tevatron

A pesar de los logros alcanzados por el Bevatron, la energía que podía alcanzar distaba mucho de la necesaria para descubrir el Higgs. El primer acelerador que intentó su búsqueda fue el Tevatron del Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory), cerca de Chicago, operativo desde 1983 hasta 2011. El nombre Tevatron se refiere a que es

capaz de alcanzar energías de 1 TeV (*TeV Synchrotron*), cientos de veces más que el Bevatron. Operativo desde 1970 hasta 2011, lanzaba protones y antiprotones al 99.999954% de la velocidad de la luz. El circuito, de casi 7 km de circunferencia, estaba en el interior de un túnel bajo tierra, y los haces de partículas eran guiados por mil imanes superconductores mantenidos a $-230\text{ }^{\circ}\text{C}$. En marzo de 2012, cuando ya no estaba en servicio, científicos del Tevatron presentaron un informe con el análisis de los datos experimentales recogidos en los últimos 10 años que indicaban la posible detección de una partícula compatible con el Higgs (con una significación de $2,2 - \sigma^5$).

El supercolisionador fantasma

A finales de la década de 1970, en los Estados Unidos se empezó a pensar en la construcción de un acelerador que fuera mucho más potente que cualquiera de los existentes: el *Superconducting Super Collider* (SSC). La idea fue tomando forma, y en 1983 empezó la fase de diseño. Según este, debía ocupar un anillo de 87 km de circunferencia al sur de Dallas, y tener una potencia de 20 TeV

por haz, suficiente no solo para producir el Higgs, sino también otras partículas aún desconocidas. En 1987, el presidente Ronald Reagan aprobó el proyecto y se inició la construcción.

Se empezó la excavación de kilómetros de túneles, la construcción de miles de metros cuadrados de edificios, y la contratación de miles de personas, entre ellas cientos de científicos. El coste presupuestado inicialmente (4400 millones de dólares) fue aumentando hasta doblarse en 1992 y casi triplicarse al año siguiente, y las esperadas colaboraciones de otros países no se materializaban. Todo ello sucedía en unos tiempos en que la recesión económica creaba un clima poco propicio a este tipo de gastos, por lo que, finalmente, en octubre de 1993, el Congreso canceló el proyecto.

La cancelación dejó 30 km de túneles, un gran complejo de edificios y una enorme infraestructura eléctrica y de comunicaciones. En 2006, un multimillonario de Arkansas compró la totalidad de las instalaciones por 6,5 millones de dólares, con la intención de montar en ellas el que debía ser el mayor y más seguro centro de almacenamiento de datos

de los Estados Unidos. Sin embargo, pocos meses más tarde, el magnate murió por una lesión en la cabeza a consecuencia de una caída, y su proyecto fue abandonado. Actualmente las instalaciones pertenecen a una empresa química.

Uno de los principales propulsores del proyecto del SSC fue el estadounidense Leon M. Lederman, Premio Nobel de Física en 1988. Cuando el proyecto empezó a verse amenazado, Lederman publicó un libro (escrito junto con Dick Teresi) sobre el bosón de Higgs con el objetivo de destacar la importancia que tendría su eventual descubrimiento. Lo tituló *The God particle* (La partícula de Dios), probablemente porque así resultaba más comercial, o como él mismo escribe en el primer capítulo, porque «el editor no nos dejó llamarlo *La partícula maldita*, dada su infame naturaleza y los gastos que nos está provocando».

Aunque Lederman no pudo evitar la cancelación del proyecto, sí consiguió llamar la atención del público, pues el libro tuvo un gran éxito y desde entonces la denominación «la partícula de Dios» ocupa muchos de los titulares sobre el tema en los medios de

⁵ Equivale a decir que la probabilidad de que los resultados obtenidos en el Tevatron fueran debidos al azar es del 2,8% (una entre 36). En física de partículas se considera que para anunciar el descubrimiento de una partícula debe alcanzarse 5 - sigma, que corresponde a una probabilidad de error del 0,00003% (una entre 3,3 millones).

comunicación (aunque la mayoría de los físicos, tanto creyentes como no, se sienten molestos con ella).

Primeros colisionadores del CERN

En el año 1953, doce estados europeos⁶ firmaron la convención del CERN (la actual Organización Europea para la Investigación Nuclear), un esfuerzo colectivo para revitalizar la investigación física en el continente y crear el que hoy día es el mayor y más complejo laboratorio dedicado al estudio de los constituyentes elementales de la naturaleza. Después de más de medio siglo, con los cambios geopolíticos y las nuevas incorporaciones, cuenta ya con 22 estados miembros⁷.

Su primer acelerador fue el Sincrociclotrón, en 1957, que alcanzaba una energía de 0,6 GeV (menos de la mitad de la que conseguía entonces el americano Bevatron), y apenas 2 años más tarde fue seguido por el sincrotrón de protones PS (*Proton Synchrotron*), que antes de finalizar el año 1959 había llegado a los 25 GeV, un valor récord en aquel tiempo. El PS aceleraba protones que eran guiados por 277 electroimanes

convencionales en una conducción circular con una circunferencia de 628 metros. Se ha mostrado como un dispositivo muy fiable y flexible, hasta el punto de que aún sigue en funcionamiento, ha multiplicado por 1000 la intensidad de su haz de protones y se utiliza en combinación con otros equipos del CERN.

El siguiente e importante paso llegó en 1971 con la construcción de los anillos de almacenamiento con intersección ISR (*Intersecting Storage Rings*), consistentes en dos anillos concéntricos de 150 m de diámetro que no son exactamente circulares, sino que están entrelazados de modo que se intersecan en ocho puntos, en los que colisionan los haces de protones (el ISR fue el primer acelerador que hacía chocar unas partículas con otras). Los anillos están construidos en un túnel subterráneo a unos 200 metros del PS, que es el que acelera inicialmente los protones y los envía a uno u otro anillo de los ISR a través de un conducto de transferencia. La energía alcanzada por los protones era de 62 GeV, equivalente a un haz de 2000 GeV chocando con un objetivo estacionario. El ISR terminó sus operaciones en 1984, pero permitió desarrollar la tecnología

que sería utilizada en aceleradores posteriores.

Con el ISR todavía en plena operatividad, en 1976 entró en funcionamiento el supersincrotrón de protones SPS (*Super Proton Synchrotron*). Con una circunferencia de casi 7 km y 1317 electroimanes es la segunda mayor máquina del CERN y actualmente continúa en funcionamiento. Su principal logro fue el descubrimiento de los bosones W y Z en 1983, lo que valió al italiano Carlo Rubbia y al holandés Simon Van der Meer el Premio Nobel de Física en 1984.

Colisionadores de electrones

Los colisionadores que hemos descrito hasta ahora hacían chocar protones (contra un objetivo estático o contra otros protones) en lugar de otras partículas más ligeras, como son los electrones. Ello presenta ventajas e inconvenientes. La principal ventaja de los colisionadores protón-protón es que los protones tienen una masa muy superior a la del electrón (unas 2000 veces mayor) y pueden ser acelerados a mayores energías. Su inconveniente es que el protón es una partícula compleja, cosa que hace difícil analizar los resultados

⁶ Bélgica, Dinamarca, Francia, Grecia, Holanda, Italia, Noruega, el Reino Unido, la República Federal de Alemania, Suecia, Suiza y Yugoslavia.

⁷ Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Dinamarca, Eslovaquia, España, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Hungría, Israel, Italia, Noruega, Polonia, Portugal, el Reino Unido, la República Checa, Rumanía, Suecia y Suiza.

del choque de las partículas componentes. En cambio, los colisionadores electrón-electrón o electrón-positrón, al trabajar con partículas elementales, permiten mediciones mucho más exactas. Sin embargo, como son partículas con carga eléctrica, al moverse por el anillo a gran velocidad los haces tienen una importante pérdida de energía por radiación, lo que limita la energía efectiva que puede alcanzarse en el choque. Tal pérdida de energía puede evitarse haciendo que la conducción por donde se mueven las partículas no sea un anillo, sino un conducto en línea recta.

El mayor acelerador lineal del mundo es el SLAC (originalmente *Stanford Linear Accelerator Center*), situado cerca de la Universidad de Stanford, que se encarga de su funcionamiento en nombre del Departamento de Energía de los Estados Unidos. Tiene una longitud de 3,2 km y ha estado operativo desde 1966. Permitted descubrir varias partículas, como el quark encanto⁸ (Burton Richter y Samuel C.C. Ting, que compartieron el Premio Nobel de Física en 1976) y el tauón (Martin Perl, Premio Nobel de Física en 1995). Resultó decisivo para

confirmar que los protones no eran partículas elementales, lo que confirmaba la idea de los quarks, por cuyo descubrimiento se otorgó el Premio Nobel de Física en 1990 a Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall y Richard E. Taylor.

Por su parte, el CERN optó por la solución en anillo en su colisionador electrón-positrón LEP (*Large Electron-Positron collider*), para el que hubo que construir un nuevo túnel de 27 km de circunferencia que requirió 3 años de excavación. El túnel está situado bajo tierra, en la frontera franco-suiza, a una profundidad media de 100 m que llega a 175 m cuando pasa cerca de Ginebra. Contaba con 5176 imanes y 128 cavidades aceleradoras, y alcanzaba una energía de unos 100 GeV. Estuvo en funcionamiento desde 1989 hasta 2000, y los experimentos realizados en este tiempo sirvieron para comprobar el modelo estándar y estudiar detalladamente la interacción electrodébil.

LHC

Mientras en los Estados Unidos se planeaba e iniciaba la construcción

del SSC, los científicos europeos consideraban la posibilidad de crear un gran colisionador capaz de competir en la búsqueda del Higgs: el gran colisionador de hadrones LHC (*Large Hadron Collider*). Las primeras reuniones formales para tratar el tema tuvieron lugar en 1984, cuando el SSC estaba ya en fase de diseño. El proyecto europeo se enfrentaba también a la situación económica, que obligaba a aprovechar los túneles existentes del LEP, de 27 km⁹, lo que limitaba la máxima potencia posible a un tercio de la alcanzable en el SSC, para el que se preveía un anillo de 87 km. A pesar de estas dificultades, y gracias en buena medida al empuje del entonces director general del laboratorio Carlo Rubbia¹⁰, en 1991 el consejo del CERN decidió estudiar la propuesta, y a finales de 1994, cuando ya el SSC había sido cancelado, aprobó la puesta en marcha del proyecto.

Llevar a cabo un proyecto de la envergadura del LHC es una tarea descomunal. El LHC es la máquina más grande y más compleja jamás construida, y además exige una

⁸La denominación de los quarks es bastante curiosa. Los hay de seis sabores (tipos): arriba, abajo, encanto, extraño, cima y fondo. Para abreviarlos, suele usarse la inicial del nombre en inglés: u (*up*), d (*down*), c (*charm*), s (*strange*), t (*top*) y b (*bottom*). Estos nombres no se refieren a ninguna característica física de los quarks.

⁹La circunferencia del anillo mide exactamente 26.659 m.

¹⁰Ya citado anteriormente como descubridor de los bosones W y Z en 1983 junto con Simon van der Meer, lo que valió a ambos compartir el Premio Nobel de Física en 1984.

precisión extraordinaria en todos sus elementos. Por ejemplo, es conocido que la atracción lunar genera mareas en los mares y océanos, un efecto que se manifiesta también, en menor magnitud, en la corteza terrestre. Ello provoca que la circunferencia del anillo del LHC sufra una diferencia de 1 mm (¡en 27 km!), y esta alteración debe ser tomada en cuenta para la correcta alineación de los haces de hadrones. El guiado y la aceleración de estos haces se consigue con 9593 imanes superconductores de niobio-titanio, cada uno de 15 m de largo y unas 35 toneladas, que deben ser mantenidos a una temperatura de 1,9 K (-271,3 °C)¹¹ mientras a través de sus 7600 km de cable circula una corriente de 11.850 amperios (el LHC consume tanta electricidad como todo el cantón de Ginebra, y el coste del consumo eléctrico anual del LHC es de unos 20 millones de euros). Además, alrededor del anillo acelerador están los preaceleradores (Linac 2 y 3, PSB, PS y SPS), y cuatro detectores de partículas (ATLAS, CMS, ALICE y LHCb), todos ellos también de gran complejidad.

Los grandes números no se limitan al aspecto constructivo, sino que se extienden también a la obtención y el análisis de los resultados de los experimentos. El LHC contiene unos

150 millones de sensores que recogen datos 40 millones de veces por segundo, generando 15 petabytes (15 millones de gigabytes) de información por año. Toda esta información debe ser estudiada para detectar cualquier posible fenómeno de interés.

La construcción de tan gran proyecto duró 10 años, hasta que por fin, el 10 de septiembre de 2008, el LHC se puso en marcha. Sin embargo, tras unos días de funcionamiento según lo planificado, en los que se iba procediendo a ajustes y comprobaciones, de repente el 19 de septiembre saltaron todas las alarmas. Un pequeño incidente eléctrico en un cable que alimentaba dos imanes hizo que estos se calentaran por encima de la temperatura de superconducción y provocó que el helio líquido entrara en ebullición, dañando a otros 53 imanes y esparciendo por los túneles dos toneladas de gas (durante las pruebas los túneles son desalojados, por lo que no hubo que lamentar ningún tipo de incidente personal).

La reparación de los daños y las necesarias nuevas comprobaciones hicieron que el LHC no pudiera reemprender su funcionamiento hasta el 20 de noviembre de 2009.

Pocos días después alcanzó una energía de 2,36 TeV totales (1,18 TeV por cada haz), lo que superaba el anterior récord del Tevatron. En marzo de 2010 se había llegado ya a los 7 TeV, potencia que se aumentó a 8 TeV en 2012. Estaba previsto que a finales de ese año el LHC iniciaría una parada de 2 años para proceder a aumentar su potencia hasta los 14 TeV. Sin embargo, durante el verano sucedió algo que hizo posponer unos meses tal parada, algo que había sido largamente esperado.

Por fin, el Higgs

Ya hemos visto que en marzo de 2012 los científicos que habían trabajado en el Tevatron, cerrado medio año antes, presentaron un análisis de los últimos datos obtenidos en aquel colisionador, que mostraban indicios de una partícula compatible con el Higgs. Sin embargo, la significación estadística de tales datos era tan solo de 2,2 – sigma, menor que los 3 – sigma requeridos para una «evidencia», y mucho menor que los 5 – sigma que podrían avalar un «descubrimiento».

Mientras tanto, desde el CERN surgían rumores cada vez más insistentes que apuntaban a que los

¹¹ El proceso de enfriamiento requiere varias semanas y se ejecuta en tres fases: descenso de la temperatura hasta -268,7 °C, relleno de los imanes con helio líquido y enfriamiento final hasta -271,3 °C.

dos principales equipos experimentales del LHC, el ATLAS y el CMS¹², estaban obteniendo resultados superiores a los 3 – sigma, y tal vez incluso alrededor de los 4 – sigma. La expectación de la comunidad científica aumentó cuando el CERN anunció para el 4 de julio de 2012 una presentación de los resultados obtenidos por ambos equipos. Además, el CERN estaba invitando a personas de relieve, entre las que figuraban los mismos Peter Higgs y François Englert, así como otros que habían trabajado en la idea del ansiado bosón. Higgs, que ya tenía 83 años, se encontraba entonces en una conferencia en Sicilia y tenía algunos problemas para viajar a Ginebra, pero un veterano del CERN le advirtió de que «si no iba a la presentación después se lamentaría de ello».

Por fin llegó el día de la presentación, y la expectación creada tuvo su premio cuando los equipos del ATLAS y el CMS informaron de que los resultados del análisis de billones de colisiones protón-protón en el LHC durante 2011 y 2012 habían alcanzado un nivel de significación de 5 – sigma, lo que confirmaba el descubrimiento del bosón de Higgs con una masa de alrededor de 126 GeV (o cuanto menos una partícula

que reúne las características que se esperaban del Higgs). Al año siguiente, François Englert y Peter Higgs recibieron el Premio Nobel de Física de 2013. De este modo se cerraba una búsqueda que había durado prácticamente medio siglo.

¿Y ahora qué?

Pasada la resaca del descubrimiento, el CERN cerró el LHC el 13 de febrero de 2013 para proceder a ampliar su potencia y llevar a cabo una serie de mejoras y renovaciones (entre ellas rehacer 10.170 conexiones eléctricas de los imanes, como la que falló en 2008, para permitir el paso de los 13.000 amperios que ahora se necesitan), operaciones que en total requerían unos 2 años. Finalizados estos trabajos, el LHC volvió a ser operativo el 5 de abril de 2015, ahora con una potencia total de 13 TeV y un nivel de colisiones de 700 millones por segundo.

Sin embargo, entre los físicos existe cierto sentimiento de que el descubrimiento del Higgs ha cerrado una etapa, y que ahora el futuro no presenta una clara expectativa. El recorrido de los últimos cien años parecía la progresiva subida de una rampa continua y, de repente, nos encontramos frente a un escalón que

no sabemos qué altura tiene. Para superarlo solo parecen posibles dos opciones. La primera, que podríamos llamar la de la fuerza bruta, consiste en continuar aumentando la potencia de los aceleradores con la esperanza de descubrir partículas que abran nuevos caminos de investigación. Sin embargo, aunque el LHC tiene todavía previsto continuar operativo hasta el año 2030, en la actualidad ya está funcionando a 13 TeV, casi la máxima energía para la que fue diseñado (14 TeV), y hay que tener en cuenta que cualquier nuevo proyecto necesitaría de 10 a 15 años para su construcción. Los colisionadores son máquinas muy caras, tanto de construcción como de mantenimiento, con unos resultados efectivos inciertos, y no aseguran un beneficio práctico a corto plazo, cosa que desanima a quienes deben financiarlos. Parece, pues, que la investigación de partículas ha llegado a un punto muerto difícil de superar, lo que frena nuestra posibilidad de ahondar en el conocimiento íntimo de la materia. Sin embargo, frente a la fuerza bruta hay una segunda opción: el ingenio. Y la historia nos muestra que suele ser en momentos así cuando surge una figura genial que cambia el paradigma existente y aporta una nueva visión de la

¹²El ATLAS y el CMS son los dos mayores detectores de partículas de uso general del LHC. Han sido diseñados de modo independiente y son operados por personal distinto, de manera que los resultados de ambos proporcionen una mayor fiabilidad.

realidad. Y quién sabe, tal vez esta persona está ya ahora mismo trabajando en ello. El propio Sheldon ha trabajado en su propia teoría acerca del bosón de Higgs y, de hecho, sus resultados están relacionados con otro momento de la serie en que dejó de lado su orgullo y se puso a suplicar, nada más y nada menos que ante Howard, que de todos sus amigos es el que más menosprecio recibe por parte de Sheldon. Resulta que a través de su trabajo Howard pudo conocer a Stephen Hawking, un verdadero ídolo para Sheldon, como también para sus amigos, que llegan a ver en DVD una conferencia suya y comentarla¹³. Aunque inicialmente la intención de Howard era lograr que Sheldon pudiera conocer a Stephen Hawking, el trato que este le dispensó cuando se disponía a darle la noticia hizo que cambiara de opinión.

Por supuesto, cuando Sheldon descubrió lo que estaba en juego, intentó razonar con él por todos los medios posibles. «Howard, por favor. Es Stephen Hawking. Quizás mi único igual intelectualmente», imploró. «Tienes que estar de broma», responde Howard. «Trata de ponerte en mi lugar. Imagínate que eres el

único ser humano viviendo en un planeta habitado solo por perros. Y luego resulta que hay otro ser humano». «Espera. ¿Estás diciendo que el resto de nosotros somos perros?» «Vale, ya veo que te lo estás tomando mal. Déjame intentarlo de nuevo. Imagínate que eres el único ser humano viviendo en un planeta habitado solo por chimpancés», intenta corregir Sheldon. «Sal de mi laboratorio.» «Pero si son mucho más listos que los perros», se excusa Sheldon.

A pesar de su evidente falta de tacto, al final Sheldon logró conocer a Stephen Hawking¹⁴, pues aunque Howard no se lo presentó, sí accedió a entregarle de su parte su trabajo sobre el bosón de Higgs. Sheldon estaba convencido de que había logrado revolucionar la manera de entender la partícula, y cuando Stephen Hawking lo llamó personalmente esta ilusión pareció confirmarse:

- Sheldon: Profesor Hawking, es un honor y un privilegio conocerle, señor.
- Stephen Hawking: Lo sé.
- Sheldon: Quiero agradecerle que me dedique su tiempo.

- Stephen Hawking: El placer es mío. He disfrutado mucho leyendo su artículo. Está claro que tiene una mente brillante.
- Sheldon: Lo sé.
- Stephen Hawking: Su tesis de que el bosón de Higgs es un agujero negro acelerando hacia atrás en el tiempo es fascinante.
- Sheldon: Gracias. Fue... se me ocurrió una mañana en la ducha.
- Stephen Hawking: Es curioso. Una pena que esté equivocado.
- Sheldon: ¿Qué quiere decir?
- Stephen Hawking: Cometí un error aritmético en la página dos. Qué metedura de pata.
- Sheldon: No, no... Eso no puede ser cierto. Yo no cometo errores aritméticos.
- Stephen Hawking: ¿Está diciendo que yo sí?
- Sheldon: No, no, no, por supuesto que no. Es solo que, estaba pensando... Cielos, porras, metí la pata, y se lo enseñé a Stephen Hawking. (Sheldon se desmaya.)
- Stephen Hawking: Genial, otro debilucho¹⁵.

¹³ Temporada 1, episodio 1

¹⁴ Temporada 5, episodio 21.

¹⁵ A pesar de esta mala primera impresión, Sheldon y Stephen Hawking mantuvieron posteriormente una comunicación regular y todavía juega con él partidas de *Palabras con amigos* (y se deja ganar), llevando a Sheldon a considerar con orgullo que es amigo de Stephen Hawking.

El examen de Howard y la física cuántica

*La física cuántica me hace tan feliz...
Es como ver el universo desnudo.*

(Temporada 5, episodio 20)

Ya hemos visto que uno de los hobbies favoritos de Sheldon es menospreciar a Howard, de quien considera que no tiene la misma capacidad intelectual que él (por algo él es físico y Howard un simple ingeniero, argumenta) para hablar sobre los misterios del universo a su mismo nivel. Sin embargo, hubo una ocasión en que a Sheldon no le quedó más remedio que admitir que quizás había subestimado a Howard. Se produjo cuando le sometió a un examen para determinar si su amigo tenía los conocimientos suficientes para poder asistir a sus clases¹, unas clases a las que, por otro lado, no se había presentado ningún estudiante, pues todos habían oído comentarios de la reputación de Sheldon como alguien con quien se puede ser condescendiente hasta decir basta. A pesar del fracaso, Sheldon se puso quisquilloso cuando Howard se

interesó por las clases, dando por hecho que no podía tener los conocimientos suficientes para seguir las de forma correcta. Irritado por esta postura, Howard le retó a hacerle un pequeño examen verbal, y Sheldon accedió preguntándole por el tema más complejo del mundo de la física: la mecánica cuántica.

- Sheldon: ¿Cómo determinarías el estado fundamental de un sistema cuántico sin solución exacta?
- Howard: Estimaría una función de onda y luego variaría sus parámetros hasta que encontrara la solución con la energía más baja.
- Sheldon: ¿Sabes cómo integrar X al cuadrado por E elevado a menos X sin buscarlo?
- Howard: Usaría el truco de Feynman, diferenciaría bajo el signo integral.

- Sheldon: Vale. ¿Cuál es la interpretación correcta de la mecánica cuántica?
- Howard: Dado que toda interpretación da exactamente la misma respuesta para toda medida, son todas igualmente correctas. Aunque sé que crees en la interpretación de los universos paralelos, así que diría esa. ¿Ahora crees que soy suficientemente listo?
- Sheldon: No.
- Howard: Vamos. Puede que hayas ido a la facultad un par de años más que yo, pero sabes que los ingenieros son tan inteligentes como los físicos.
- Sheldon: ¡Retira eso!

A pesar de todo, Sheldon se vio obligado a reconocer que Howard podía seguir sus clases sin ningún problema, pues responder a preguntas sobre mecánica cuántica equivale, según la lógica de Sheldon, a tener un elevado nivel de conocimientos científicos. En este capítulo nos adentraremos en este mundo, que fue una verdadera revolución de la física, pues a finales del siglo XIX en el mundo científico se creía que la física había alcanzado a explicar la práctica totalidad de los fenómenos naturales, y no cabía

¹Temporada 8, episodio 2.

esperar ningún nuevo progreso². Bastaron unas pocas décadas, las primeras del siglo XX, para descubrir que la realidad «no solo es más extraña que lo que imaginábamos, sino más extraña que lo que podemos imaginar»³.

Como ya hemos visto anteriormente, el primer descubrimiento inesperado lo constituyó la teoría de la relatividad (especial y general). Desde Aristóteles hasta Newton, nuestra concepción de las leyes que rigen el movimiento de los cuerpos había cambiado considerablemente, pero siempre habíamos dado por sentado que tal movimiento tenía lugar en un espacio y un tiempo independientes de cualquier hecho que en ellos se produjera. La relatividad cambió la naturaleza de ambos conceptos convirtiéndolos en un único espacio-tiempo que se curva en presencia de masa, y que cambia para cada objeto según la velocidad con que se mueve, hasta el punto de que lo que para un observador es el pasado para otro puede ser el futuro. Sin embargo, nuestra visión de la realidad aún

debería cambiar de un modo mucho más radical con otro descubrimiento: la física cuántica.

La catástrofe ultravioleta

La creencia de que en el campo de la física todo estaba ya conocido parecía bastante lógica. Por una parte, las leyes de Newton permitían calcular con extraordinaria precisión las trayectorias de cualquier móvil, tanto terrestre como celeste, y por otra, las ecuaciones de Maxwell explicaban los fenómenos eléctricos y magnéticos con sus ondas asociadas, incluida la luz. En ambos casos, solo quedaban por resolver pequeños detalles. Sin embargo, como suele decirse, el diablo está en los detalles, y fueron estos los que conducirían al mundo cuántico.

Uno de esos detalles era el conocido como «la catástrofe ultravioleta», que había sido observada al estudiar la radiación emitida por los cuerpos a distintas temperaturas. Cualquier objeto caliente emite ondas electromagnéticas en un amplio rango de frecuencias, con una

intensidad máxima para una frecuencia que depende de la temperatura, de modo que cuánto más alta es esta, mayor es la frecuencia de la onda dominante. Si la temperatura es superior a unos 550 °C, la radiación producida alcanza el rango visible, percibiéndose con un color rojo oscuro que se vuelve más brillante hasta los 800 °C, para pasar a naranja a los 900 °C, amarillo a los 1000 °C, blanco a los 1200 °C, etc. (un fenómeno que resulta útil para apreciar visualmente la temperatura de un objeto en oficios como la herrería, la cerámica y otros).

Los físicos ingleses John Strutt y James Jeans utilizaron la mecánica estadística clásica para intentar explicar la distribución del espectro producido por los cuerpos negros (se denomina cuerpo negro a un objeto ideal que absorbe toda la energía que le llega y emite la máxima radiación posible). Obtuvieron una ecuación que se ajustaba bastante a lo observado con frecuencias bajas (infrarrojo), pero que para las altas (ultravioleta) predecía una intensidad

² Por ejemplo, Albert A. Michelson, Premio Nobel de Física en 1907, en una serie de conferencias pronunciadas en 1899 (*Light waves and their uses*) afirmó que «todas las leyes y los hechos fundamentales más importantes de la ciencia física han sido descubiertos, y están ya establecidos tan firmemente que la posibilidad de que algún día sean reemplazados debido a nuevos descubrimientos es extremadamente remota». Asimismo, Max Planck, Premio Nobel de Física en 1918, relata que en 1875 uno de sus profesores (Philipp von Jolly) le aconsejó no dedicarse a la física porque en esta área «ya está todo descubierto y solo quedan algunos detalles por resolver».

³ La cita corresponde al genetista británico J.B.S. Haldane en su libro *Possible worlds and other papers* (Mundos posibles y otros artículos), de 1927.

que crecía sin fin, lo cual, además de no coincidir con la realidad, era contrario al principio de conservación de la energía. Aquella manifiesta contradicción fue denominada «la catástrofe ultravioleta». Por su parte, el físico alemán Wilhelm Wien, Premio Nobel de Física en 1911, obtuvo una fórmula que aproximaba los valores observados a frecuencias altas, pero en contrapartida proporcionaba resultados erróneos en el resto del espectro.

La solución a este problema vendría de una idea revolucionaria, que curiosamente surgió de la mente de un físico conservador y tradicional, tanto en su vida personal como en su trabajo científico: Max Planck, que siempre había sentido un gran interés por la termodinámica⁴, a la que dedicó su tesis doctoral y numerosos e importantes artículos, y que en 1895 decidió utilizar para tratar de encontrar una solución al problema de la distribución de la energía emitida por los cuerpos negros en función de su temperatura. Consideró que la energía térmica debía repartirse estadísticamente entre los «osciladores electromagnéticos» (por aquel entonces la estructura atómica aún no estaba definida) provocando su vibración. Para calcular la intensidad

generada a las distintas frecuencias utilizó el recurso matemático de dividir la energía de cada oscilador en pequeños fragmentos, cosa que facilitaba el cálculo y permitía aumentar la precisión sin más que reducir progresivamente el tamaño del fragmento hasta llevarlo a cero.

Con este método, Planck obtuvo una fórmula que se ajustaba exactamente a los resultados experimentales en toda la gama de frecuencias, y resolvía así la catástrofe ultravioleta. Sin embargo, la fórmula solo funcionaba si se aceptaba que la energía no podía adoptar cualquier valor, sino que se componía de unidades indivisibles a las que Planck llamó «cuantos de energía», cuyo valor era $h\nu$, siendo h una constante, que se conoce actualmente como la constante de Planck, y ν la frecuencia. Planck hizo pública su fórmula en una reunión en la Deutsche Physikalische Gesellschaft (Sociedad Alemana de Física) el 14 de diciembre de 1900, pero ni sus colegas ni él mismo creían que los cuantos fueran reales, sino tan solo una solución temporal a la espera de una mejor interpretación de los hechos observados.

Dos años más tarde, el físico experimental alemán Philipp Lenard, que estudiaba el efecto fotoeléctrico,

descubrió que cuando un rayo luminoso incide sobre la superficie de un material la energía de los electrones que este emite no depende de la intensidad de la luz, sino de su longitud de onda. Aumentar la intensidad hace que el número de electrones emitidos sea mayor, pero la energía de cada uno de ellos es la misma, y es mayor cuanto menor es la longitud de onda de la luz recibida. Estas investigaciones valieron a Lenard el Premio Nobel de Física en 1905, pero no podían explicarse con el modelo ondulatorio de la luz. Fue Einstein quien, en el «más revolucionario» (así lo consideraba él mismo) de los cuatro artículos que publicó en 1905, explicó las leyes del efecto fotoeléctrico mediante la consideración de que la radiación electromagnética de una determinada frecuencia ν (la inversa de la longitud de onda) es realmente un flujo de cuantos individuales de luz, cada uno de ellos con una energía dada por la fórmula $h\nu$ (los cuantos de energía cuya existencia real Planck se resistía a aceptar)⁵.

La existencia real de los cuantos resultaba difícil de aceptar (incluso el propio Einstein en su artículo utilizó la expresión «un punto de vista heurístico»). Uno de los científicos

⁴La termodinámica es la rama de la física que estudia las relaciones entre el calor y otras formas de energía, y los efectos que todas ellas causan en los sistemas.

más contrarios a esta idea fue el físico experimental estadounidense Robert Millikan, que consideraba que la teoría corpuscular de la luz era impensable e irreconciliable con los fenómenos de difracción e interferencia óptica. Con el propósito de refutarla, inició una serie de ingeniosos experimentos, que durarían 10 años, destinados a medir con la máxima precisión el efecto fotoeléctrico. Sin embargo, el resultado fue totalmente opuesto al que Millikan pretendía, pues según él mismo reconocería más tarde: «este trabajo produjo, contrariamente a lo que esperaba, la primera prueba experimental directa de la ecuación de Einstein y la primera determinación fotoeléctrica de la constante de Planck». Ello valió a Millikan el Premio Nobel de Física en 1923.

El átomo revisitado

La visión que se tenía del átomo al empezar la segunda década del siglo XX era la que había propuesto Rutherford: un núcleo en el que se concentraba toda la carga positiva, y un gran espacio a su alrededor en el que se movían los electrones. Aquel

modelo entraba en conflicto con las leyes físicas entonces conocidas, ya que los electrones debían precipitarse hacia el núcleo por el efecto atractivo de las cargas de distinto signo. Incluso en el supuesto de que giraran alrededor de él, la pérdida de energía (por emisión de ondas electromagnéticas) que experimenta una carga en movimiento circular provocaría la rápida disminución del radio de la órbita hasta chocar igualmente con el núcleo.

La solución a este problema empezó a gestarse en 1912, un año que resultaría decisivo en la vida del entonces joven físico danés Niels Bohr, hijo de un profesor de fisiología de la Universidad de Copenhague (dos veces nominado al Premio Nobel⁶) y una mujer procedente de una acaudalada familia del mundo de la banca y la política danesas. Con su reciente doctorado en la misma universidad que su padre, y con una beca para estudiar en el extranjero, Niels Bohr se trasladó a Inglaterra, donde trabajó junto a J.J. Thomson hasta que en abril de 1912 fue invitado por Rutherford a incorporarse a su

laboratorio de Manchester. Allí encontró el ambiente propicio para desarrollar su trabajo y se interesó por el estudio de la estructura del átomo. Bohr tenía gran capacidad para intuir soluciones incluso cuando solo disponía de datos parciales o inconexos, y fue así como empezó a construir un modelo del átomo que mezclaba la física clásica (el átomo como un sistema solar en el cual los electrones orbitan alrededor del núcleo a distintas distancias) con la mecánica cuántica, que hasta entonces solo se había relacionado con las radiaciones electromagnéticas.

Sin embargo, Bohr no tenía la confianza necesaria para publicar algo tan revolucionario sin ninguna prueba que lo avalara. Fue a principios de 1913 cuando su colega H.M. Hansen le hizo notar que el físico J.J. Balmer había observado que el espectro del átomo de hidrógeno se ajustaba a una fórmula empírica que nadie había sabido justificar. Inmediatamente Bohr se dio cuenta de que era precisamente su modelo atómico el que explicaba la fórmula de Balmer, y escribió tres artículos que se publicaron ese

⁵ Aquel artículo, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts Betreffenden Heuristischen Gesichtspunkt* (Un punto de vista heurístico sobre la producción y la transformación de luz), fue el motivo por el que se concedió a Einstein el Premio Nobel de Física en 1921.

⁶ Christian Bohr fue nominado al Premio Nobel de Fisiología o Medicina en los años 1907 y 1908, por su trabajo sobre el proceso de la respiración.

mismo año⁷ y que se resumen en estos tres postulados:

- Los electrones giran alrededor del núcleo siguiendo órbitas circulares definidas. En tanto el electrón permanece en tal órbita, no emite ni absorbe energía.
- El momento angular⁸ del electrón en su órbita está cuantizado, es decir, no puede tener cualquier valor, sino que debe ser un múltiplo del cuanto ($L = nh / 2\pi$, siendo $n = 1, 2, 3, 4, \text{etc.}$, y h la constante de Planck). Así pues, los electrones se distribuyen en capas correspondientes a n , el denominado número cuántico principal que indica el nivel de la órbita.
- La energía del electrón solo cambia si salta de una órbita a otra (si la nueva órbita está más cerca del núcleo, el electrón libera energía; en caso contrario, la absorbe).

El cambio de órbita se traduce en la emisión o absorción de ondas electromagnéticas de una frecuencia que depende de la diferencia de energía entre el nivel inicial y el final.

El modelo de Bohr permite calcular estas frecuencias, y los valores que se obtienen se ajustan a los observados experimentalmente en el espectro del átomo de hidrógeno. Ello convirtió rápidamente a Bohr en una de las figuras principales del creciente campo de la mecánica cuántica. Fue nombrado catedrático de física teórica en la Universidad de Copenhague en 1916, y en 1922 fue galardonado con el Premio Nobel de Física. Desde su nuevo puesto luchó por la creación de un Instituto de Física Teórica que hiciera posible que investigadores internacionales pudieran viajar a Dinamarca y compartir sus ideas e investigaciones con otros físicos en un ambiente propicio al desarrollo de la ciencia. El instituto se puso en marcha en 1921, y junto a él entró en funcionamiento en 1934 el Instituto de Matemáticas, dirigido por su hermano Harald Bohr. La contigüidad de ambos institutos favorecía la colaboración entre físicos y matemáticos, dos materias cada vez más relacionadas.

En este punto conviene que nos detengamos un momento para

captar plenamente el concepto del cuanto. Cuando Bohr, en su tercer postulado, habla del salto del electrón de una órbita a otra, lo más probable es que nos imaginemos al electrón aumentar o disminuir la distancia que le separa del núcleo de una manera rápida, pero continua. No es así (si lo fuera, nada impediría que el electrón terminara precipitándose hacia el núcleo). El electrón simplemente deja de estar en una órbita e instantáneamente pasa a estar en otra porque su momento angular solo puede ser un múltiplo de la constante de Planck y no puede corresponder, ni por un instante, a ningún valor intermedio.

El efecto Zeeman

Aunque el modelo de Bohr explicaba el espectro del hidrógeno en condiciones normales, ya en 1896 el físico holandés Pieter Zeeman había observado que bajo la influencia de un campo magnético cada línea espectral se subdividía en otras varias (por este descubrimiento le fue concedido el Premio Nobel de Física en 1902). Este fenómeno,

⁷ *On the Constitution of Atoms and Molecules* (Sobre la constitución de átomos y moléculas), publicados en la revista *Philosophical Magazine*.

⁸ El momento angular (L) de un objeto que gira alrededor de un punto viene dado por la fórmula $L = rmv$ (siendo r el radio de la órbita, m la masa del objeto y v su velocidad tangencial). El momento angular tiende a conservarse, cosa que hace que un trompo o una peonza mantengan su eje (aproximadamente) vertical hasta que la fricción con el suelo y la resistencia del aire disminuyan suficientemente su velocidad. Otros ejemplos de aplicación de este principio son los giroscopios, o el cambio de velocidad de los patinadores sobre hielo al extender y juntar los brazos (dado que el producto rmv permanece constante, la disminución de r provoca el aumento de v , y viceversa).

conocido como efecto Zeeman, fue utilizado en 1908 por el astrónomo estadounidense George Ellery Hale para deducir que en las manchas solares había fuertes campos magnéticos.

El físico teórico alemán Arnold Sommerfeld se propuso estudiar cómo podía adaptar el modelo de Bohr para que explicara también el efecto Zeeman. Dado que Bohr se había inspirado en el sistema solar, Sommerfeld pensó que podía haber cometido el mismo error en que había incurrido Copérnico al suponer que las órbitas debían ser circulares, por lo que, siguiendo el ejemplo de Kepler, propuso que las órbitas podían ser elípticas con distintas excentricidades. Así, en 1915 añadió un segundo número cuántico, el llamado momento angular orbital (l), que define la forma de la órbita y puede tomar los valores enteros entre 0 y $n - 1$ (n era el número principal). En 1920, Sommerfeld añadió un tercer número correspondiente a la orientación de la órbita del electrón, el número cuántico magnético (m_l , o simplemente m , que puede valer entre $-l$ y l).

Con los tres números cuánticos, el modelo de Bohr–Sommerfeld se ajustaba con suficiente precisión a

los datos observados como para que pronto fuera aceptado mayoritariamente (y con él la existencia real de los cuantos). Sin embargo, en 1897 el científico irlandés Thomas Preston había observado una anomalía en el efecto Zeeman, consistente en que en algunos casos las líneas espectrales, en lugar de dividirse en tres, lo hacían en cuatro, seis o más. La solución al problema planteado por este efecto Zeeman «anómalo» tuvo que esperar hasta el año 1925, y terminó con la aceptación de un cuarto número cuántico: el espín⁹ del electrón, cuya historia es también bastante larga. En realidad, el físico estadounidense Arthur Compton ya había sugerido en 1921 que las nuevas líneas espectrales observadas podrían explicarse suponiendo que el electrón «gira» sobre sí mismo convirtiéndose en una especie de imán que interactuaría con el campo magnético exterior, pero en aquel tiempo su propuesta no recibió ninguna atención.

A principios de 1925, el entonces joven físico alemán Ralph Kronig empezó a trabajar como asistente de Alfred Landé en la Universidad de Tubinga. Este informó a Kronig de que Pauli¹⁰ visitaría la universidad al día siguiente, y completó esta

información mostrándole una carta de Pauli en la que manifestaba su convicción de que para poder explicar el efecto Zeeman anómalo sería necesario dotar al electrón de un cuarto número cuántico que solo tuviese dos posibles valores. Inmediatamente le vino a la mente a Kronig la imagen del electrón como un pequeño planeta que gira sobre su eje, y cuyos polos admiten dos direcciones opuestas (el polo «norte» puede estar arriba o abajo). En las pocas horas de que disponía desarrolló su idea, y al día siguiente se la expuso a Pauli. Este reconoció su ingenio, pero rechazó sus cálculos, lo mismo que haría unos meses más tarde Bohr en Copenhague, lo que desanimó a Kronig.

Desconocedores del trabajo de Kronig, en otoño del mismo año 1925 dos estudiantes holandeses, George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit, llegaron a la misma conclusión y lo comunicaron a su profesor, Paul Ehrenfest, quien les recomendó preparar un artículo y presentarlo a Hendrik Lorentz, Premio Nobel de Física en 1902 precisamente por su investigación de la influencia del magnetismo sobre los fenómenos de la radiación. Así lo hicieron, y al cabo de unos días Lorentz les respondió

⁹ El término «espín» es la adaptación del inglés *spin* (girar).

¹⁰ De quien ya hemos hablado en la sección *Las primeras partículas*, en la pág. 22.

con una serie de objeciones que descorazonaron a los dos estudiantes. De todos modos, su profesor ya había enviado el artículo a la revista *Naturwissenschaften*, que lo publicó en noviembre de 1925. Un resumen del mismo apareció en *Nature* en febrero de 1926, y fue entonces cuando el físico y matemático Llewellyn Thomas consideró que debía aplicarse la relatividad especial a los cálculos de Uhlenbeck y Goudsmit, y al hacerlo comprobó que se solucionaban las contradicciones observadas por Lorentz. Inmediatamente Pauli aceptó la idea del espín como cuarto número cuántico (m_s o simplemente s), que podía tomar dos valores: $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$ (o espín arriba y espín abajo).

El principio de exclusión

La cuantización de las órbitas es la razón por la cual los electrones no caen al núcleo, pero no explica por qué no acaban todos en la órbita más baja (su estado de mínima energía). La solución a este problema llegaría de la intuición de Bohr y el genio de Pauli.

Hacia ya medio siglo que los químicos conocían que al ordenar

los elementos según su número atómico (el número de protones contenidos en el núcleo, que en condiciones normales es igual al número de electrones que le rodean) se observa la repetición periódica de propiedades similares, lo que permite disponerlos en la llamada tabla periódica de los elementos. En 1922, Bohr dedujo que tal periodicidad podía deberse a que los electrones de un átomo se distribuyen en capas, cada una de las cuales admite un número determinado de ellos. Cada electrón intenta colocarse en la capa más baja posible (su mínimo nivel de energía), pero si esta se encuentra llena va a la capa siguiente¹¹. A partir de esta idea, y observando la tabla periódica, dedujo que la primera capa admite 2 electrones, la segunda 8 y la tercera 18.

Además, los átomos tendrían tendencia a completar su capa externa, lo que lograrían capturando o cediendo electrones a átomos de otros elementos para formar compuestos. Por ejemplo, el sodio (Na), de número atómico 11, tiene 2 electrones en la primera capa, 8 en la segunda y 1 en la tercera; y el cloro

(Cl), de número atómico 17, tiene 2 en la primera, 8 en la segunda y 7 en la tercera. Cuando átomos de uno y otro elemento se encuentran, el de sodio cederá el solitario electrón de su capa externa al de cloro, y de este modo ambos tendrán una capa externa completa (formando cloruro sódico¹², según la reacción $\text{Na} + \text{Cl} = \text{NaCl}$). Por la misma razón, los elementos que tienen completa su capa externa (los llamados gases nobles: helio, neón, argón, criptón, etc.) raramente se combinan con otros elementos.

Hemos visto que cada capa de electrones corresponde a un número cuántico principal n (el número de orden de la capa, empezando por la más cercana al núcleo), y que los electrones que se encuentran en esta capa tienen otros tres números cuánticos que admiten distintos valores. Examinando las combinaciones posibles, en 1925 Pauli observó lo que se muestra en la tabla 1 (solo se incluyen las tres primeras capas):

Es decir, el número de combinaciones posibles coincide con el número máximo de electrones que puede haber en

¹¹ En realidad, no es exactamente así. El orden de llenado de las capas sigue la regla de Madelung, que dice que la precedencia depende de la suma $n + l$, y a igualdad de $n + l$ la prioridad la marca n . Por esta razón, el subnivel $n = 4, l = 0$ (suma 4) se ocupa antes que el $n = 3, l = 2$ (suma 5), cosa que hace que la tercera fila de la tabla periódica incluya 8 elementos en lugar de los 18 que permite el tercer nivel cuántico principal.

¹² El componente principal de la sal común.

cada capa. Ello llevó a Pauli a deducir que en un átomo no pueden coexistir dos electrones que tengan los mismos cuatro números cuánticos (lo que se conoce como el «principio de exclusión», que valió a Pauli el Premio Nobel de Física en 1945). Posteriormente se vio que el principio de exclusión no solo se aplica a los electrones, sino a todas las partículas que tienen espines con valores equivalentes a la mitad de un entero (1/2, 3/2, 5/2, etc.). Estas partículas son denominadas genéricamente fermiones (las «partículas de materia» que vimos anteriormente: los quarks, el electrón, el neutrino, el muon, etc.), mientras que las que tienen un espín nulo o entero (0, 1, 2, 3, etc.) son los bosones (o «partículas de fuerza»: el fotón, el gluon, el Higgs, etc.).

Ondas y partículas

Según nuestra percepción del mundo, ondas y partículas tienen propiedades completamente distintas. Las ondas pueden propagarse a través de un medio a grandes distancias (las ondas sonoras, las radioeléctricas, las que se producen en la superficie de un estanque, etc.). Además, están

Tabla 1. Valores posibles de los números cuánticos para las tres primeras capas de electrones.

n (capa)	Números cuánticos			Combinaciones posibles	
	l (de 0 a n - 1)	m (de -l a +l)	s (espín)	Parcial	Total capa
1	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2	2
2	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2	8
	1	-1, 0, +1	$\pm\frac{1}{2}$	6	
3	0	0	$\pm\frac{1}{2}$	2	18
	1	-1, 0, +1	$\pm\frac{1}{2}$	6	
	2	-2, -1, 0, +1, +2	$\pm\frac{1}{2}$	10	

sometidas a los fenómenos de: 1) reflexión (cuando chocan con una superficie y rebotan, como el eco, o la luz en un espejo), 2) refracción (cuando pasan de un medio a otro y cambian su dirección), y 3) interferencia (cuando coinciden en una misma región dos o más ondas, y sus intensidades se suman algebraicamente). Por el contrario, las partículas (los componentes de la materia) ocupan un espacio concreto, tienen masa y no experimentan refracción ni interferencia¹³.

El físico teórico Louis de Broglie observó que las fórmulas de Einstein para el efecto fotoeléctrico

relacionaban directamente el momento de los fotones (partículas) con una frecuencia (ondas). Además, tanto en este caso como en el de la distribución de los electrones alrededor del núcleo, los valores posibles no son continuos, sino múltiplos enteros de la constante de Planck. Sin embargo, en física clásica solo hay dos tipos de fenómeno que implican números enteros, y ambos corresponden a fenómenos ondulatorios: la interferencia y las ondas estacionarias (modos de vibración de una cuerda tensa sujeta por ambos extremos, que puede vibrar en su frecuencia fundamental o en sus armónicos, múltiplos de

¹³Desde nuestra percepción sensorial del mundo.

ella). Ello llevó a De Broglie a pensar que todas las partículas tienen una onda asociada, una idea que desarrolló en tres artículos que sirvieron de base para la tesis¹⁴ con la que obtuvo el doctorado en la Universidad de París en 1924. Su propuesta chocó inicialmente con la falta de algún experimento que mostrara directamente el comportamiento ondulatorio de la materia. Tal experimento se realizó en 1927, cuando Clinton Davisson y George Thomson consiguieron producir patrones de difracción al hacer pasar un haz de electrones a través de un cristal de níquel. Por este trabajo obtuvieron conjuntamente el Premio Nobel de Física en 1937.

Imaginar el electrón como una onda que vibra a lo largo de su órbita alrededor del núcleo es tan solo una analogía, pero resulta útil en algunos aspectos concretos. Por ejemplo, en el segundo postulado de Bohr veíamos que el momento angular del electrón venía dado por la fórmula $L = nh / 2\pi$. Podemos llegar a esta fórmula partiendo simplemente de que el electrón es una onda que vibra a lo largo de la circunferencia de su órbita. Si es así, por similitud con las ondas

estacionarias de una cuerda de longitud $2\pi r$, las frecuencias posibles corresponderán a longitudes de onda que sean submúltiplos de la longitud de la cuerda (es decir, $n\lambda = 2\pi r$, siendo λ la longitud de onda). La longitud de onda de una partícula en movimiento viene dada por la fórmula $\lambda = h / mv$, y por tanto $nh / mv = 2\pi r$. Reordenando términos: $nh / 2\pi = mvr$. Y como en una órbita circular el momento magnético vale $L = mvr$, obtenemos lo postulado por Bohr: $L = nh / 2\pi$.

Herramientas matemáticas

El año 1925 marca el final de la teoría cuántica antigua. Entre ese año y 1928 vieron la luz las tres principales teorías (complementarias) que constituyen los cimientos de la física cuántica moderna: la mecánica matricial, la mecánica ondulatoria y la ecuación de Dirac.

Mecánica matricial

El alemán Werner Heisenberg trabajó como asistente de Max Born en la Universidad de Gotinga, y luego con Bohr en la Universidad de Copenhague. El trabajo con tan prominentes figuras hizo que se

interesara vivamente por el problema de encontrar una nueva teoría cuántica que superara las ambigüedades y limitaciones de la anterior. Heisenberg creía que era un error intentar explicar el mundo cuántico partiendo de la visión clásica del átomo. En lugar de ello, consideraba que solo había que tener en cuenta los resultados de los experimentos y, a partir de ellos, deducir unas fórmulas matemáticas que describieran los fenómenos observados y permitieran descubrir otros nuevos.

Heisenberg elaboró un artículo que compartió con Born, quien tras estudiar las complejas ecuaciones vio que lo más adecuado era la utilización de matrices, una herramienta no utilizada en física hasta entonces. Junto a Pascual Jordan elaboró y sistematizó las ideas de Heisenberg, y finalmente los tres confeccionaron un artículo en 1925 con el que quedó definida la mecánica matricial.

Las matrices son conjuntos de números o símbolos colocados en filas y columnas en forma de rectángulo, que se utilizan en matemáticas desde hace siglos¹⁵ y tienen aplicaciones en numerosos campos. Por ejemplo, si nos interesa

¹⁴ *Recherches sur la Théorie des Quanta* (Investigaciones sobre la teoría de los cuantos).

¹⁵ Aparecen en un texto chino escrito entre el siglo X AEC y el II AEC, y fueron introducidas en Europa en el siglo XVI. La regla para multiplicar matrices se desarrolló en el siglo XIX.

estudiar la frecuencia ν de la radiación emitida por un electrón cuando salta de un nivel cuántico m a otro nivel n , y la probabilidad α de que ocurra cada uno de los saltos posibles, podemos representar ambos valores mediante sendas matrices, en las que el nivel inicial corresponde a la fila, y el final, a la columna. En un caso simple (ficticio) con tres posibles niveles podríamos tener¹⁶:

$$V = (v_{mn}) = \begin{bmatrix} 0 & 25 & 60 \\ 25 & 0 & 35 \\ 60 & 35 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = (\alpha_{mn}) = \begin{bmatrix} 0,3 & 0,02 & 0,01 \\ 0,02 & 0,3 & 0,02 \\ 0,01 & 0,02 & 0,3 \end{bmatrix}$$

Por la idea original le fue concedido a Heisenberg el Premio Nobel de Física en 1932, «por la creación de la mecánica cuántica». Probablemente se hubiera concedido el premio conjuntamente a Heisenberg, Born y Jordan de no haber sido porque este último era un activo militante del partido nazi. A Born se le concedió en 1954 «por su investigación fundamental en mecánica cuántica, especialmente por su interpretación estadística de la función de onda».

Mecánica ondulatoria

La mecánica matricial era vista por muchos físicos como una idea

demasiado abstracta y alejada de la realidad, por lo que creían necesaria una nueva teoría cuántica. Uno de los que así pensaban era el austríaco Erwin Schrödinger, quien estaba convencido de que tal teoría debía compatibilizar la dualidad onda-partícula. Se basaba en la analogía que había establecido en 1834 el físico, matemático y astrónomo irlandés William Hamilton, en la que este relacionaba el camino seguido por un rayo de luz al atravesar varios medios con el de un objeto material que se mueve en un campo de fuerzas como el gravitatorio.

El resultado de la investigación de Schrödinger, publicado en 1926, se sintetiza en su célebre ecuación de onda que describe el comportamiento mecánico de un sistema cuántico como el átomo, en forma de una función de onda $\Psi(x,y,z,t)$ cuyo valor depende del punto del espacio y del momento en que se evalúa. Por este trabajo, Schrödinger obtuvo el Premio Nobel de Física en 1933 (junto con Dirac, como luego veremos). Aquel mismo año, Born publicó un artículo en el que exponía que el cuadrado del valor de la función de onda (Ψ^2) indica la probabilidad de encontrar el sistema en cierto estado (en el caso de una partícula como el

electrón, indica la probabilidad de encontrar la partícula en aquel punto).

Ecuación de Dirac

El 28 de julio de 1925, Heisenberg dio una conferencia en Cambridge sobre las teorías cuánticas de Bohr y Sommerfeld. Entre los asistentes se hallaba el físico y astrónomo británico Ralph Fowler, profesor de matemáticas en el Trinity College de Cambridge, que era supervisor del joven Paul Dirac (a quien ya nos referimos anteriormente¹⁷). En la conferencia, Heisenberg no mencionó su reciente trabajo, que entonces aún no había sido publicado, pero a la salida lo comentó de manera informal con Fowler, quien se mostró interesado. Días más tarde, Heisenberg envió las pruebas de imprenta de su artículo a Fowler, y este las pasó a Dirac para que las estudiase.

Dirac apreció las ideas de Heisenberg, aunque no tanto su formulación, que le pareció complicada y poco clara, así como el hecho de que no tuviera en cuenta los efectos de la relatividad. Un aspecto que le llamó la atención (y que Heisenberg ya había advertido, pero creyó que era una deficiencia

¹⁶En este ejemplo, el salto del nivel 2 al 3 se produce con una probabilidad de 0,02 (2%), y la frecuencia de la onda resultante es 35.

¹⁷En la sección *Las partículas se multiplican*, apartado *La antimateria*, pág. 24.

de su teoría) fue la no conmutabilidad de la ley de multiplicación utilizada (es decir, que en ella el producto depende del orden de los factores, o expresado de otra manera, que $pq - qp \neq 0$). Tras reflexionar, llegó a la conclusión de que los datos que intervenían en la multiplicación no debían ser considerados como los valores que esperábamos observar en los experimentos, sino como las

operaciones que llevábamos a cabo para obtenerlos. De este modo, era natural pensar que el resultado final podía depender del orden en que ejecutáramos los distintos pasos.

A partir de aquí Dirac desarrolló una completa álgebra cuántica cuya expresión más representativa es la llamada «ecuación de Dirac», que puede expresarse de muy diversas –y complejas– maneras, de las cuales la más compacta y

simplificada es la que figura en una losa conmemorativa en la Abadía de Westminster (junto a otras de Newton, Maxwell, Thomson, y otros físicos): $i\gamma \cdot \delta\Psi = m\Psi$. La teoría de Dirac¹⁸, publicada en enero de 1928, no desmiente la de Heisenberg ni la de Schrödinger, sino que ambas pueden ser consideradas casos especiales de la de Dirac, y cada una de ellas resulta más adecuada para determinados entornos.

¹⁸*The quantum theory of the electron.*

Los problemas de Leonard y el gato de Schrödinger

Como el gato de Schrödinger, tu relación potencial con Leonard justo ahora puede pensarse de ambas maneras, buena y mala. Solo cuando abras la caja te encontrarás con la respuesta.

(Temporada 1, episodio 17)

Desde que Penny irrumpe en la vida de los protagonistas de *The Big Bang Theory*, la vida de Leonard se convierte en una duda permanente. Es obvio que él queda automáticamente prendado de ella, del mismo modo que es obvio que ella no lo ve a él como alguien con quien tener una relación que vaya más allá de la amistad. Esta situación trae de cabeza a Leonard, quien alberga esperanzas de que quizás en algún momento Penny va a verle de forma diferente, y mantiene la hipótesis de que es posible que ella se sienta atraído por él. Para Sheldon esta hipótesis es ridícula, porque no hay datos que la sostengan, sino que se basa únicamente en el deseo de Leonard. Así lo dice, una y otra vez, cuando este llega a casa hundido anímicamente y se deja caer en el sofá tras otra situación en la que

parecía que Penny le miraba de manera diferente y luego ha resultado no ser así.

Durante largo tiempo, Leonard no hace más que ver desfilar distintos novios de Penny mientras él sigue siendo su amigo, confirmando la tesis de Sheldon. Sin embargo, cuando finalmente Leonard se decide a declarar su amor a Penny y le pide para salir, Sheldon decidirá utilizar la ciencia a favor de su amigo y hacer que la pareja, llena de dudas, se atreva a darle una oportunidad a su relación. Lo hará a través del experimento del gato de Schrödinger, que explica primero a Penny, quien no sabe si empezar algo con Leonard y arriesgarse a perder a su amistad, y luego a él, que duda sobre si acudir a la cita con Penny por si no funciona y entonces pierde su primera y única oportunidad.

El razonamiento de Sheldon es sencillo: la relación entre ellos funciona y no funciona al mismo tiempo, y solo intentándolo podrán saber cuál de las dos opciones acaba resultando. El experimento del gato de Schrödinger, que explicaremos en las siguientes líneas, forma parte del intento de encontrar una interpretación comprensible del mundo cuántico y de las fórmulas que lo describen, que hemos tratado en el capítulo anterior, así como los principales avances tecnológicos que nos ha aportado, algunos de los cuales están cambiando de manera significativa nuestro modo de vida.

Interpretaciones (físico-filosóficas)

La complejidad de las matemáticas utilizadas en estas teorías, y los paradójicos resultados que de ellas –y de los experimentos– se desprenden, han generado interpretaciones diversas y controversias sobre la relación existente entre las fórmulas y la realidad física. En esta sección veremos algunas de estas interpretaciones y algunos experimentos que las respaldan.

La interpretación de Copenhague

Es la más comúnmente aceptada interpretación de la física cuántica. Consiste en un conjunto de ideas desarrolladas a partir de 1927 por

Bohr¹, con la colaboración de Heisenberg, Born, Pauli y von Neumann. Se la conoce como la interpretación de Copenhague porque en aquellos años el Instituto de Estudios Atómicos Niels Bohr de Copenhague era el principal centro mundial de estudios cuánticos, y a él acudían los mejores físicos mundiales en esta materia. Las ideas centrales de la interpretación de Copenhague son: 1) el principio de incertidumbre, 2) el principio de complementariedad y 3) el colapso de la función de onda.

El principio de incertidumbre

En 1927, Heisenberg vio que la no conmutabilidad del producto de la posición x y el momento p de una partícula implicaba que ambos valores no podían ser conocidos simultáneamente con exactitud, sino que el producto de sus respectivas incertidumbres siempre debía ser igual o superior a cierto valor ($\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$). Este principio de incertidumbre es aplicable a cualquier par de variables relacionadas, y establece una diferencia fundamental entre la mecánica clásica (en la que cualquier magnitud puede ser medida con toda la precisión que permitan los instrumentos) y la cuántica (en la que la precisión

alcanzable tiene un límite intrínseco que no depende de los instrumentos utilizados). Como dijo Heisenberg: «No nos es posible conocer al detalle el presente, ni tan solo en principio. Por esta razón, todo cuanto observamos no es más que una selección entre infinitas posibilidades y una acotación de lo que es posible en el futuro».

El principio de complementariedad

Como una manera de explicar (o más bien compatibilizar) la dualidad onda-partícula, aquel mismo año de 1927 Bohr estableció el principio de complementariedad, que dice que las partículas tienen un conjunto de propiedades que se complementan, y que unas u otras se manifiestan según la naturaleza del experimento realizado, pero no todas a la vez. Dicho de otra forma, la onda-partícula no es una onda ni una partícula, sino algo que se manifestará con el aspecto de onda o de partícula en función de las circunstancias (el resultado de una observación depende del método utilizado para obtenerla).

La interpretación de Copenhague implica una limitación en nuestra capacidad de conocer el mundo. El mismo Bohr dijo: «No existe ningún

mundo cuántico. Existe tan solo una descripción abstracta físico-cuántica. Es erróneo pensar que la misión de la física consiste en descubrir cómo es la naturaleza. La física solo se interesa por lo que podemos decir sobre la naturaleza».

El colapso de la función de onda

La interpretación de Copenhague afirma que la función de onda es la descripción completa de una onda-partícula (una superposición de estados), y que cuando realizamos una medición (observación) de la misma, la función de onda colapsa a un solo estado. Estas «ondas» no son tales, sino los grados de probabilidad de observar cada uno de los estados posibles.

Tal indeterminación probabilística era rechazada por Einstein, que pensaba que cada fenómeno natural debía tener una causa, y no ser un producto del azar. Ello provocó un intenso, aunque amistoso, debate entre él y Bohr, que se refleja en una carta que Einstein envió a Born en 1926, en la que le decía que «la teoría cuántica ha aportado mucho, pero no nos acerca apenas a los secretos del Anciano. Por mi parte, estoy convencido de que Él no juega a los dados»².

¹ Como punto inicial de la interpretación de Copenhague puede considerarse la conferencia que Bohr dio en Como (Italia) en septiembre de 1927.

En mecánica clásica, el estado de un sistema y la medición que de él hacemos coinciden (dentro del margen de error del instrumento de medida). El resultado de la medición nos informa del estado del sistema, y aplicando las oportunas leyes físicas podemos prever su estado posterior. En cambio, en mecánica cuántica, aunque conozcamos el estado del sistema no podemos prever el resultado de la medición, pero sí la evolución de aquel estado y, por tanto, la probabilidad de los resultados de las futuras mediciones.

El gato de Schrödinger

También Schrödinger consideraba inaceptable la idea de que el resultado de la evolución de un sistema dependiera del azar, y aún más que este resultado no tuviera lugar hasta que alguien lo observara, de modo que hasta aquel momento el sistema permaneciera en un estado indefinido. Para mostrar la absurdidad de esta interpretación, en 1935 propuso un experimento mental que desde entonces es conocido como el del «gato de Schrödinger».

Consiste en lo siguiente: en una caja completamente aislada del exterior colocamos un gato y, convenientemente protegidos de él, un átomo de una sustancia radiactiva que tiene una probabilidad de un 50% de desintegrarse en una hora, un contador Geiger, un frasco que contiene un ácido mortal y un mecanismo con un martillo. Si se produce la desintegración, el contador Geiger lo detectará, el mecanismo dejará caer el martillo que romperá el frasco, por lo que se esparcirá el ácido que matará al gato. Según la mecánica cuántica, mientras no abramos la caja el átomo se halla en un estado indefinido que incluye a la vez los sucesos «desintegrado» y «no desintegrado», por lo que el gato debe estar simultáneamente muerto y vivo. Tan solo cuando abramos la caja, el átomo –y por tanto también el gato– adoptará un estado concreto.

En la serie, Sheldon relata el experimento como una manera de explicar el estado de la relación entre Penny y Leonard, que como todavía no ha empezado tiene las mismas posibilidades de salir bien o mal. Según la mecánica cuántica, mientras la relación no empiece se

halla en un estado indefinido que incluye a la vez el suceso de una relación exitosa y una relación fracasada, por lo que la relación está funcionando y no funcionando de forma simultánea.

El experimento del gato de Schrödinger es irrealizable en la práctica, debido al fenómeno de la descoherencia cuántica, que se produce cuando un sistema interactúa con su entorno. Para poder observar los efectos cuánticos, el sistema (en este caso, el átomo radiactivo) debe estar aislado de interferencias externas, como las que producen en este caso el resto de los elementos: el contador, el frasco con el ácido, el martillo, el gato y el aire en el interior de la caja.

Aun así, los siguientes experimentos (estos sí reales) muestran que, efectivamente, el estado de un sistema cuántico mantiene su indefinición hasta que lo observamos, lo que ha producido interpretaciones tal vez más extrañas que el propio fenómeno observado. La más destacada es la de los universos paralelos³, propuesta en 1957 por el físico estadounidense Hugh Everett, que dice que cuando observamos un sistema formado por la superposición de diversos estados, lo que sucede no es que

² Esta es la cita que habitualmente se resume como «Dios no juega a los dados con el universo».

³ Que también se conoce como la de los mundos múltiples, o de los muchos mundos.

colapse en uno solo de ellos, sino que el universo se ramifica en tantas opciones como estados posibles, y todos estos universos prosiguen su camino en paralelo, ramificándose nuevamente. Es decir, todo aquello que es posible sucede en uno u otro universo.

Sheldon es un firme defensor de la existencia de universos paralelos, y durante el recorrido de la serie realiza diversas bromas sobre ello:

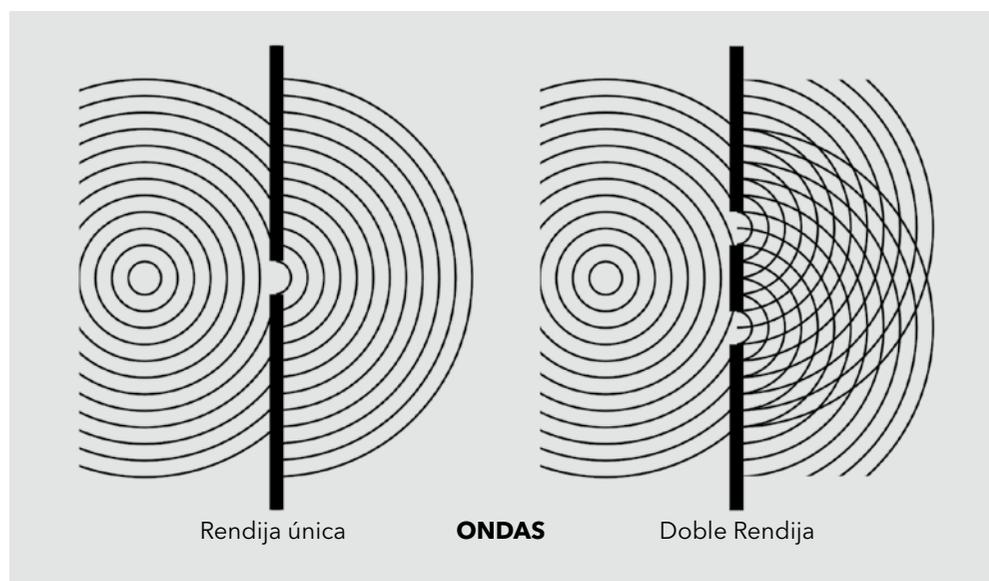
– Sheldon: Se me acaba de ocurrir una cosa: si hay un infinito número de universos paralelos, en alguno de ellos puede que haya un Sheldon que no sepa que existen universos paralelos.

– Leonard: Es probable. ¿Por qué lo dices?

– Sheldon: Por nada, es solo una de esas cosas que hace gracia a uno de mis yos (dice riendo)⁴.

Sin embargo, pone límites a las posibilidades de estos universos alternativos. Así, cuando Penny le pide que baile con él, Sheldon responde: «Aunque suscribo la teoría de los mundos múltiples que presenta un infinito número de Sheldons en un infinito número de

Figura 1. Las ondas se interfieren al atravesar una doble rendija.



universos, te puedo asegurar que en ninguno de ellos bailo»⁵.

El experimento de la doble rendija

Si dejamos caer una piedra en un estanque, desde ese punto se producen ondas que se expanden en círculos concéntricos en todas direcciones. Si a cierta distancia colocamos una plancha vertical que las frene, excepto por una rendija, esta se convierte en el origen de nuevas ondas. En el caso de que

haya más de una rendija, las ondas procedentes de cada una de ellas se suman, produciéndose unas interferencias características (fig. 1).

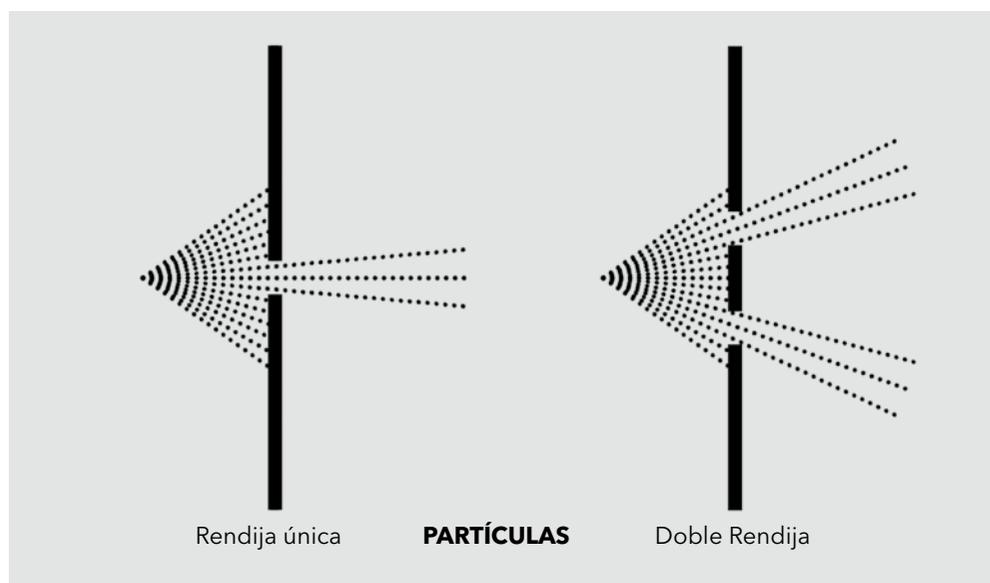
Esta es una propiedad común a todos los tipos de ondas, y por tanto también puede ser observada en las ondas lumínicas. Podemos comprobarlo haciendo pasar un rayo de luz⁶ a través de una delgada lámina opaca en la que hayamos abierto dos minúsculas rendijas. Si lo dirigimos a una pantalla situada a

⁴Temporada 4, episodio 5.

⁵Temporada 3, episodio 3.

⁶Preferentemente monocromática, porque los distintos colores tienen diferentes longitudes de onda, cosa que difumina el patrón de interferencias resultante. Nos puede servir un puntero láser como los usados en las presentaciones orales. Puede conseguirse también este efecto con un cabello en lugar de las dos rendijas.

Figura 2. La interferencia no se produce en el caso de partículas.



una distancia de 1 o 2 metros, veremos unas franjas alternativamente claras y oscuras correspondientes a la interferencia entre las ondas procedentes de las dos rendijas⁷. La principal dificultad radica en que su separación debe ser inferior a 1 milímetro, y su ancho aún menor, ya que ambos valores dependen de la longitud de onda, y la de la luz es sumamente pequeña (en el caso del estanque, la longitud

de onda suele ser del orden de centímetros o decímetros).

Si llevamos a cabo un experimento similar en el que en lugar de provocar ondas en un estanque lo que hacemos es disparar pequeñas bolitas metálicas contra una pared en la que hemos practicado dos aperturas, en lugar de la interferencia a lo largo de una amplia zona veremos que las bolas se acumularán en dos zonas

concretas, una para cada rendija o agujero (fig. 2).

Este comportamiento, distinto del de las ondas, es el que esperamos de las partículas materiales, como los electrones. Sin embargo, ya hemos visto que Davisson y Thomson demostraron que los electrones generan patrones de interferencia propios de las ondas, lo que parece una contradicción. Para intentar resolverla, se decidió investigar qué sucedería si, en lugar de enviar haces de electrones, se enviaran estos de uno en uno⁸. En efecto, podemos imaginar que una multitud de electrones actúen en conjunto de forma parecida a como lo haría una onda, pero parece imposible que un electrón solitario pueda hacerlo.

Para averiguarlo, disponemos el siguiente material: una fuente de electrones capaz de enviar un solo electrón cada vez, una placa con dos rendijas que pueden ser abiertas o cerradas por separado, y una placa detectora destinada a recibir y registrar los electrones. Con este conjunto, llevaremos a cabo dos experimentos.

⁷Tal efecto fue observado por primera vez en 1801 por el erudito (físico, médico, egiptólogo, lingüista y músico) inglés Thomas Young, por cuyo motivo este experimento es conocido como el de las franjas de Young.

⁸Esta idea nació como un experimento mental propuesto por Dirac en sus *Principles of Quantum Mechanics* y comentado por Feynman en el tercer volumen de sus *Lectures on Physics*. La comprobación real ha sido llevada a cabo de diversas formas desde 1974, y probablemente el experimento que refleja con más claridad el fenómeno (pues fue el primero que utilizó rendijas reales en lugar de biprismas) es el realizado en 2012 por Roger Bach, Damian Pope, Sy-Hwang Liou y Herman Batelaan, descrito en su artículo *Controlled double-slit electron diffraction* (publicado en *New Journal of Physics* en marzo de 2013).

Empezamos dejando abiertas ambas rendijas y emitiendo, cada cierto tiempo, un solo electrón. Los electrones que pasen por una de las dos rendijas llegarán a la placa, donde quedará registrada su llegada como un punto. Al principio, los electrones parecen ocupar posiciones aleatorias, pero a medida que pasa el tiempo y el número de electrones que han alcanzado la placa es muy grande (algunos miles), empezamos a ver que la densidad de los puntos genera el mismo patrón de interferencias que observábamos cuando enviábamos todos ellos a la vez.

Como cada electrón ha pasado por una u otra rendija, parece lógico pensar que si repetimos el experimento dos veces, una solo con la primera rendija abierta y otra solo con la segunda, y sumamos ambos resultados (o simplemente no cambiamos la placa detectora entre uno y otro paso), entonces deberíamos obtener el mismo resultado que cuando teníamos ambas rendijas abiertas. Sin embargo, no es así: no se observa ninguna interferencia, sino una distribución más intensa en el centro que va disminuyendo de manera progresiva, pero sin las franjas alternativamente claras y oscuras que veíamos cuando ambas rendijas estaban abiertas a la vez.

¿Qué ha cambiado entre el primer experimento y el segundo? ¿Es

posible que de algún modo los electrones que pasan por una ranura «sepan» que la otra está cerrada? Para comprobarlo podemos hacer lo siguiente: repetimos el experimento con ambas rendijas abiertas, pero añadimos algún tipo de detector que nos permita saber por qué rendija pasa cada electrón. Al hacerlo, sucede algo sorprendente: no se produce ninguna interferencia, los electrones se comportan como cuando cada uno solo podía pasar por una rendija porque la otra estaba cerrada. En otras palabras, y por imposible que pueda parecer, cuando observamos al electrón este deja de comportarse como una onda esparcida por el espacio y se colapsa en una partícula (la probabilidad de que la partícula se encuentre en un determinado punto viene dada por el cuadrado de la función de onda en ese punto).

El experimento de la elección diferida

Una variante del experimento anterior nos aporta resultados aún más contrarios a nuestra visión clásica del mundo. Se trata del experimento de la elección diferida, propuesto en 1978 por el físico teórico estadounidense John Archibald Wheeler, y que desde entonces ha sido llevado a cabo en varias ocasiones.

Para su realización se utiliza un interferómetro de Mach-Zehnder, un dispositivo en el que un rayo de luz es enviado a través de un espejo semitransparente que lo divide en dos haces que, tras reflejarse en sendos espejos, coinciden en un segundo espejo semitransparente que vuelve a unirlos en un solo haz. Si enviamos un solo fotón se produce un efecto parecido al de las dos rendijas: el fotón se comporta como una onda que pasa por ambos caminos y al volverse a juntar genera interferencia. Sin embargo, si quitamos el segundo espejo, cosa que nos permite conocer qué camino ha seguido el fotón, este se comporta como una partícula y no hay interferencia.

La novedad del experimento de la elección diferida se produce cuando sustituimos el segundo espejo por un mecanismo equivalente que puede ser activado o desactivado después de que el fotón ha pasado por el primer espejo (de ahí la denominación de «elección diferida») y antes de llegar al segundo. Con esta disposición, el fotón se comporta del mismo modo que antes, es decir, como una onda que ha pasado por ambos caminos si estaba activado el segundo espejo, o como una partícula que solo pasa por uno de ellos cuando este se encuentra desactivado. Es decir, el fotón sale del primer espejo comportándose según una decisión

que todavía no se ha tomado en aquel momento.

La paradoja EPR

Einstein nunca creyó que la interpretación de Copenhague fuera la explicación correcta de los fenómenos de la mecánica cuántica. En especial se mostraba contrario a la idea de que un sistema cuántico careciera de unas propiedades objetivas definidas independientemente del acto de la observación. En una conversación con el físico holandés, nacionalizado estadounidense, Abraham Pais, Einstein le preguntó si realmente creía que «la Luna existe solo cuando uno la mira». Einstein se propuso mostrar la contradicción a la que conducía tal interpretación, y junto con los físicos estadounidenses Boris Podolski y Nathan Rosen publicó en 1935 un artículo⁹ en el que mostraban que, a menos que se aceptara la posibilidad de acciones instantáneas a distancia (imposibles según la relatividad especial), las mediciones obtenidas en un sistema se deben a valores (variables ocultas) ya existentes antes de la medición.

El argumento, en esencia, es el siguiente. Supongamos una partícula

estática que se desintegra en otras dos que salen disparadas en direcciones opuestas. Por las leyes de conservación de la energía sabemos que, dado que el momento de la partícula estática era nulo, ambas partículas resultantes deben tener un momento igual, pero de signo opuesto (para que su suma sea cero). Sin embargo, este momento no está definido, sino que cada partícula se mantiene en una superposición de estados. Si al cabo de un tiempo, y cuando la distancia entre ambas partículas ha alcanzado cierto valor, medimos el momento de una de ellas, esta acción inmediatamente provocará que la otra adopte el momento opuesto. Es decir, la medición de una partícula no solo colapsa el estado de esta, sino también el de la otra, y esto sucede sin que haya ninguna posibilidad de comunicación entre ellas (debido a la limitación impuesta por la relatividad especial, que no permite superar la velocidad de la luz). Ello es conocido como la paradoja EPR, por las iniciales de los tres autores del artículo (Einstein, Podolski y Rosen).

Sin embargo, aún cabía otra posible explicación: que en el momento de separarse cada partícula fijara el valor de su momento y conservara

esta información de algún modo al que nosotros no podemos acceder (la teoría de las «variables ocultas»). ¿Había alguna manera de diseñar un experimento que permitiera confirmar cuál de las dos ideas se ajustaba a la realidad? Hubo que esperar hasta 1964 para que el físico irlandés John Bell ideara tal prueba, que se basaba en la distinta distribución estadística que producirían las supuestas variables ocultas, respecto a la que genera la superposición de estados de la mecánica cuántica.

La complejidad de la realización práctica del experimento hizo que no se consiguiera un resultado suficientemente satisfactorio hasta que en 1982 el físico francés Alain Aspect y su equipo lo llevaron a cabo en París. En este caso utilizaron fotones entrelazados que eran dirigidos a un conmutador automático aleatorio extremadamente rápido (10.000.000.000 de veces por segundo), que los dirigía a uno de dos caminos distintos. La rapidez de los cambios hacía imposible que la información de una partícula llegara a la otra, y sin embargo los resultados obtenidos mostraron la inexistencia de variables ocultas.

⁹ *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* (¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?), publicado en *Physical review*.

Conclusión

La conclusión que podemos extraer de las interpretaciones y de los experimentos comentados en esta sección es que el mundo que nos revela la mecánica cuántica no puede ser representado mediante ninguna imagen extraída de la visión que nos proporciona la física clásica. No nos queda más remedio que aceptarlo tal como es: podemos conocerlo, pero no comprenderlo (por lo menos, por ahora).

Aplicaciones prácticas

En apenas unas pocas décadas, el progreso tecnológico en el campo de la electrónica ha modificado nuestros modos de vida y las relaciones sociales de una forma que nadie había sido capaz de imaginar. Y a pesar de la rapidez y la intensidad del cambio, ha penetrado de tal modo en nosotros que se nos hace difícil imaginar un mundo en el que no podamos comunicarnos al instante con cualquier persona, esté donde esté, ni ver lo que está sucediendo ahora mismo en otras partes del mundo, ni consultar cualquier información en Internet, ni disponer de automatismos en nuestros aparatos domésticos,

ni comprar sin movernos de casa, ni disponer de un ordenador doméstico miles de veces más potente que los ordenadores de válvulas que ocupaban salas enteras, ni muchas otras facilidades que ahora nos parecen naturales.

De la válvula al transistor

El elemento que ha hecho posible y ha impulsado tal progreso es el desarrollo de la tecnología de los semiconductores (transistores, circuitos integrados, etc.). El término semiconductor fue usado por primera vez en 1911 para describir un tipo de materiales que presentaban una conductividad eléctrica a medio camino entre los conductores (metales, grafito, agua con sales u otros minerales) y los aislantes (plásticos, madera, vidrio, goma, cerámica, papel, aire, algodón). Un efecto adicional de la semiconducción fue descubierto en 1874 por el físico alemán Karl Ferdinand Braun, Premio Nobel de Física en 1909, quien observó que una punta metálica en contacto con un cristal de galena permitía el paso de corriente eléctrica en una sola dirección (cosa que se mostraría útil para la detección de ondas de radio)¹⁰.

Fue el matemático Alan Wilson quien en 1931 elaboró una teoría que explicaba el comportamiento de los materiales semiconductores según la mecánica cuántica, y que en esencia dice lo siguiente: en un átomo aislado, los electrones se distribuyen en un reducido número de capas según el principio de exclusión de Pauli, pero en cualquier pequeña cantidad de materia existe un elevado número de átomos que actúan parcialmente como uno solo. En este caso, el mismo principio de exclusión hace que los electrones se distribuyan en un número enorme de capas que se agrupan en dos bandas: la de valencia, en la que se encuentran los electrones más cercanos y ligados al núcleo, y la de conducción, más externa. Para que el material sea capaz de conducir la electricidad, los electrones de la banda de valencia deben adquirir la energía suficiente para pasar a la de conducción. Cuando ambas bandas son contiguas, el salto es fácil y el material es conductor. Cuando entre una y otra hay mucha distancia, el salto es muy difícil y el material es aislante. En el caso intermedio tenemos un semiconductor.

¹⁰En los tiempos actuales, tan tecnificados, resulta gratificante (desintoxicante) construir un sencillo receptor de radio «de galena», que solo requiere un cable de 5-10 metros que haga de antena, un circuito resonante formado por una bobina y un condensador variable en paralelo (para sintonizar la emisora), un diodo de germanio y un sencillo auricular. Sin más elementos ni fuente alguna de alimentación, este dispositivo permite recibir emisoras cercanas de onda media (en modulación de amplitud).

El desarrollo decisivo tuvo lugar entre 1945 y 1948, gracias a la investigación llevada a cabo por los físicos estadounidenses William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain. Observaron que las propiedades de los materiales semiconductores podían ser alteradas mediante su dopaje con pequeñas cantidades de impurezas. Los semiconductores más usados (el silicio y el germanio) tienen cuatro electrones en su capa de valencia. Cuando se añaden a uno de ellos átomos de fósforo o arsénico (cada uno de los cuales tiene cinco electrones en su capa exterior), uno de los electrones de cada átomo no encaja en la red cristalina del semiconductor y queda libre para circular por él (dopaje tipo N o negativo). El caso inverso se produce cuando dopamos al semiconductor con boro o galio (con tres electrones exteriores), lo que genera «agujeros» en la red, equivalentes a cargas positivas (dopaje tipo P o positivo).

Al unir un semiconductor tipo N y otro tipo P, la corriente eléctrica solo puede circular en una dirección (los electrones van de N a P), lo que reproduce un efecto similar al diodo de galena. Shockley, Bardeen y Brattain pensaron que, si de algún modo, se pudiera controlar la intensidad de esta circulación, podría obtenerse una amplificación de la

señal entrante, lo que constituye una funcionalidad esencial para la radiocomunicación y otras aplicaciones electrónicas. Lo consiguieron añadiendo una tercera capa, formando así dispositivos tipo NPN o PNP que denominaron transistores (combinación de transconductancia, o transferencia, y varistor¹¹). Una pequeña variación de señal en la capa intermedia genera una gran variación de la corriente circulante de extremo a extremo, consiguiendo así la amplificación de la señal. Por este trabajo les fue concedido conjuntamente a Shockley, Bardeen y Brattain el Premio Nobel de Física en 1956.

El transistor llegó rápidamente al gran público. En 1954, apenas 6 años después de su invención, se puso a la venta el Regency TR-1, el primer receptor de radio comercial con transistores (cuatro NPN y un diodo) equipado con una batería de 22,5 V que le permitía entre 20 y 25 horas de funcionamiento. Aquel primer receptor fue seguido a partir de 1957 por varios modelos de Sony, y en pocos años el aparato de radio dejaría de ser aquel mueble de madera alrededor del cual se reunía la familia y pasaría a ser algo que podía llevarse a todas partes para estar al corriente de las noticias o escuchar música.

Había otro campo en el que los transistores podían generar una mejora aún más significativa, y este era el de los ordenadores. Sus elementos activos hasta entonces eran las válvulas de vacío, y estos componentes presentaban diversos inconvenientes. Una válvula ocupa mucho espacio, y un gran ordenador podía requerir varios miles de ellas, por lo que necesitaba grandes salas. Además, las válvulas tienen un elevado consumo eléctrico, generan gran cantidad de calor y son muy susceptibles al desgaste y las averías (el fallo de una sola de las lámparas podía provocar el mal funcionamiento del ordenador). No es, pues, de extrañar que rápidamente se diseñaran nuevos modelos que utilizaban transistores en lugar de válvulas. El primer prototipo, en la Universidad de Manchester, entró en funcionamiento en 1953, aunque no resultó operativo hasta 1956. Sin embargo, no hubo tiempo para perfeccionar los ordenadores con transistores, pues pronto se verían superados por un nuevo avance tecnológico.

Del transistor al circuito integrado

Los transistores hacían posible construir ordenadores varias decenas de veces más potentes que otros de

¹¹ Un varistor es un componente cuya resistencia eléctrica varía según el voltaje que se le aplica.

válvulas del mismo coste, tamaño y consumo. Sin embargo, el aumento del número de componentes generaba un nuevo problema: tal cantidad de interconexiones requerían un trabajo extremadamente complejo y propenso a errores. En 1958, el ingeniero eléctrico Jack Kilby se trasladó a Dallas para trabajar en la compañía Texas Instruments, donde se le asignó a un proyecto que trataba de reducir el tamaño de los circuitos eléctricos. Kilby creía que la técnica propuesta por la compañía no era la correcta, y durante las vacaciones de sus compañeros aprovechó para trabajar en su propia idea, que consistía en producir todos los componentes sobre un mismo bloque de material semiconductor (un chip). Cuando los demás volvieron al trabajo, Kilby presentó la idea a sus superiores y les demostró que funcionaba perfectamente. Había nacido el circuito integrado¹².

De este modo, un circuito completo, con todos sus transistores, diodos, resistencias, condensadores e interconexiones, podía ser producido automáticamente, y ocupando una mínima parte de lo que requería el conjunto de los distintos componentes individuales. Por este logro fue concedido a Kilby el Premio Nobel de Física en el año

2000. Con los años, el proceso de miniaturización y fabricación ha continuado perfeccionándose hasta el punto de que un minúsculo chip de pocos milímetros cuadrados puede contener un completo procesador con cientos de millones de transistores; y el número crece de manera continua, estando hoy disponibles comercialmente chips con miles de millones de transistores.

Células fotoeléctricas y ledes

Ambos dispositivos son variantes de los diodos semiconductores. Cuando una célula fotoeléctrica como las utilizadas en las placas solares es expuesta a la luz, los fotones de la radiación solar provocan el salto de los electrones en la unión NP, generando así una corriente eléctrica. Por su parte, los ledes (del inglés LED, *Light Emitting Diode* [diodo emisor de luz]) llevan a cabo la operación inversa: al circular la corriente por la unión se desprenden algunos fotones, generando así la luz (el color de la luz obtenida dependerá del compuesto empleado en la construcción del diodo).

Ordenadores cuánticos

Un ordenador convencional trabaja con unidades de información en

forma de dígitos binarios (bits, del inglés *binary digit* [dígito binario]) que solo admiten dos estados, generalmente representados con un 0 o un 1. Mediante combinaciones de gran cantidad de bits puede representarse cualquier dato (numérico, alfabético, imágenes, sonido) o proposición lógica. El continuo progreso de la técnica de miniaturización de los circuitos integrados se manifiesta en lo que se conoce como Ley de Moore, que dice que cada año y medio se dobla el número de transistores por centímetro cuadrado que pueden incluirse en un circuito integrado. Aunque esta ley continúa cumpliéndose desde que Gordon Moore (cofundador de Intel) la observó en 1965, tiene un límite, pues por debajo de cierta dimensión los elementos individuales del circuito tendrán un tamaño de pocos átomos.

Por esta razón, ya en la década de 1970 diversos científicos propusieron la idea de crear un nuevo tipo de ordenadores que aprovecharan las peculiaridades de la física cuántica. Fue Feynman el primero que, en 1982, propuso un modelo abstracto de cómo podía utilizarse un sistema cuántico para la realización de cálculos, y en 1994 el estadounidense

¹² Parece que varias personas tuvieron la misma idea más o menos al mismo tiempo. Uno de ellos fue Robert Noyce, que trabajó en su perfeccionamiento.

Peter Shor desarrolló el algoritmo que lleva su nombre y que permite a un ordenador cuántico obtener los factores primos de un número entero.

La diferencia esencial entre un ordenador convencional y otro cuántico es que el primero, como hemos dicho, trabaja con bits que solo admiten dos estados, 0 o 1, mientras que el ordenador cuántico opera con qubits, que son superposiciones de todos los estados posibles¹³. Ello permite un sistema de resolución de los problemas completamente distinto del habitual. Así, por ejemplo, la compañía D-Wave Systems, pionera en la producción comercial de ordenadores cuánticos, lo explica con el siguiente ejemplo. Imaginemos un caminante situado en un extenso terreno montañoso del que desea encontrar el punto más bajo¹⁴. En un ordenador convencional situaríamos inicialmente al caminante en un punto cualquiera y lo iríamos desplazando sucesivamente en la dirección que desciende más rápido. Como el valor alcanzado de este modo puede corresponder tan solo a un mínimo local, deberemos

repetir el cálculo sucesivamente empezando en cada ocasión desde un lugar distinto. En cambio, el ordenador cuántico parte de que el caminante está simultáneamente en muchas posiciones distintas, y evoluciona al mismo tiempo en todas ellas.

Por el momento, el principal problema que presenta la realización práctica de los ordenadores cuánticos es cómo evitar el fenómeno de la descoherencia, por el que los qubits interactúan con su entorno y se altera su estado, y con ello los cálculos acumulados.

Criptografía cuántica

En los tiempos actuales, la necesidad de asegurar la privacidad de las comunicaciones, tanto personales como de las entidades, adquiere cada día mayor importancia. Los métodos criptográficos más usados en la actualidad se basan en el uso de claves, que pueden ser simétricas o asimétricas. En el primer caso, el emisor y el receptor de un mensaje comparten la misma clave, que sirve tanto para encriptarlo como para desencriptarlo. En cambio, en la

criptografía asimétrica la clave es doble: hay una clave pública que sirve para encriptar el mensaje y puede ser difundida ampliamente, y otra clave privada que solo conoce el propietario y sirve para la desencriptación. La clave pública y la privada están relacionadas matemáticamente mediante un algoritmo que hace sumamente difícil obtener la clave privada a partir de la pública.

Sin embargo, con el aumento continuo de la potencia de cálculo de los ordenadores, lo que ayer era «sumamente difícil» hoy puede ser solo moderadamente costoso, y mañana por completo factible, por lo que hay un gran interés en la investigación de métodos criptográficos que resulten todavía más seguros. Además, con los métodos actuales resulta imposible saber si algún mensaje (o la clave) ha sido interceptado por una tercera persona.

Las propiedades de la física cuántica ofrecen la posibilidad de solucionar este último problema, y a partir de la década de 1980 se empezó a investigar en este terreno,

¹³En mecánica cuántica, el estado de un sistema corresponde a un vector que suele representarse mediante la notación de Dirac, que utiliza un tipo de paréntesis llamado ket; por ejemplo: $|\psi\rangle$. Un qubit no solo está en la superposición de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$, sino en cualquier combinación lineal de ellos, es decir, $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, siendo α y β números complejos. De este modo, un solo qubit puede, en teoría, adoptar infinitos estados.

¹⁴Muchos problemas que dependen de diversas variables y buscan el resultado óptimo pueden ser representados por un paisaje de este tipo, en el que las coordenadas son los parámetros que podemos manipular y la altura es el valor obtenido en tal situación.

habiéndose conseguido hasta ahora algunos logros en este sentido, si bien por el momento están limitados en su realización práctica (principalmente en lo que respecta a la distancia máxima de la transmisión, que es de unos cientos de kilómetros). El proceso esencialmente consiste en el envío de fotones con ciertas polarizaciones y espines. Si en algún punto entre el emisor y el receptor alguien realiza una medición de los fotones, por las leyes de la mecánica cuántica esta acción alterará su estado, y tal alteración podrá ser detectada por el receptor, que sabrá que el mensaje ha sido interceptado.

Superconductividad y levitación magnética

El fenómeno de la superconductividad fue descubierto de manera accidental en 1911 por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes en el curso de su investigación sobre las propiedades de la materia a temperaturas extremadamente bajas, un trabajo que le valió el Premio

Nobel de Física en 1913. Era conocido que los materiales conductores presentan siempre cierta resistencia al paso de la corriente eléctrica, y que esta varía en función de ciertas circunstancias, como la temperatura a la que están sometidos. Onnes observó que por debajo de 4,2 K (-268,95 °C) la resistencia eléctrica del mercurio se hacía nula (no muy pequeña, sino 0), por lo que consideró que se trataba de un nuevo estado de la materia. Posteriormente vio que algunos metales tenían un comportamiento similar (p. ej., el plomo por debajo de 7,2 K), mientras que otros (p. ej., el cobre) no muestran tal característica.

Hubo que esperar hasta 1957 para hallar la explicación de este fenómeno, que llegó con el ya citado John Bardeen y los también físicos Leon Cooper y John Schrieffer. Su teoría, conocida como la teoría BCS por las iniciales de los tres científicos, y confirmada por las investigaciones posteriores, explica que la superconductividad se debe al acoplamiento de los electrones con

las vibraciones de la red cristalina del material, lo cual conduce a la formación de pares de electrones de modo que los distintos pares están acoplados fuertemente entre sí formando un estado conjunto superconductor. Para romper este enlace es necesario superar cierto nivel crítico de energía (temperatura). Por este trabajo conjunto, los tres recibieron el Premio Nobel de Física en 1972¹⁵.

Por debajo de su temperatura crítica, los materiales superconductores experimentan el llamado efecto Meissner, consistente en que repelen los campos magnéticos que intentan atravesarlos. Este efecto se utiliza, por ejemplo, en los trenes de levitación magnética que de este modo evitan el contacto con el suelo. El tren comercial de este tipo que alcanza una mayor velocidad operativa (431 km/h) es el Shanghai Maglev, que conecta la ciudad china con el aeropuerto internacional. Seguro que a Sheldon, gran aficionado a los trenes, le gustaría realizar un viaje en esta maravilla tecnológica.

¹⁵ Bardeen se convertía de este modo en la única persona que ha recibido el Premio Nobel de Física en dos ocasiones: en 1956 y en 1972.

Amor y desamor por la teoría de cuerdas

Voy a omitir el hecho de que es una arrogante científica del montón que realmente cree que la gravedad cuántica de bucles une mejor la mecánica cuántica con la relatividad general que la teoría de cuerdas.

(Temporada 2, episodio 2)

Durante gran parte del recorrido de *The Big Bang Theory* se ha defendido de forma constante la teoría de cuerdas, no solo por parte de Sheldon, sino también de Leonard. Mientras en otras cuestiones están en desacuerdo, aquí presentan un frente unificado y confían en la teoría de cuerdas como la que mejor unifica todos los conocimientos que tenemos sobre el universo. Están tan de acuerdo en este punto que, en una discusión sobre el tema entre Sheldon y Leslie, entonces novia de Leonard, este se posiciona tras alguna duda a favor de su amigo:

- Leslie: La gravedad cuántica de bucles es el futuro de la física.
- Leonard: Lo siento Leslie, creo que prefiero mi espacio cuerdo, no buclero.
- Leslie: Me alegra saber la verdad sobre ti antes de que esto vaya más lejos.

- Leonard: ¿Verdad? ¿Qué verdad? Hablamos sobre hipótesis no probadas. No es tan importante.
- Leslie: ¿No lo es? ¿En serio? Dime Leonard, ¿cómo criaremos a los niños?
- Leonard: Supongo que esperaremos a que tengan la edad suficiente y los dejamos elegir su propia teoría.
- Leslie: No podemos dejarles elegir, Leonard. ¡Son niños!
- Leonard: Espera, ¿a dónde vas?
- Leslie: Lo siento. Podría aceptar que nuestros niños fueran genéticamente incapaces de comer helado o de tener una buena vista de un desfile. Pero esto... Esto no se puede superar.

En esta escena, que se ríe de las tradiciones que algunos padres quieren que hereden sus hijos (como las creencias religiosas, la ideología

política o el equipo de fútbol favorito) llevándolas al terreno de la ciencia (para personajes como los de la serie esto sería más importante que otras decisiones), acaba en la ruptura de la relación entre Leonard y Leslie, siendo de las pocas veces en que Leonard ha mostrado el carácter suficiente para defender sus principios. Por ello, lógicamente, es felicitado por Sheldon, quien ha llevado a cabo una batalla permanente contra cualquiera que se oponga a sus ideas, ya sean científicas o relacionadas con sus aficiones (cómic, películas, videojuegos, etc.).

Como hemos visto, Sheldon defiende con especial ferocidad la teoría de cuerdas, puesto que es sobre la que se basan todo su trabajo y sus expectativas para acabar siendo galardonado con el Nobel. Además de ante Leslie, también lo hemos visto discutiendo sobre este tema con personajes como Dennis Kim, una joven promesa del mundo científico que había alcanzado más méritos que los que él había conseguido a su edad y que llevó a Sheldon a una pequeña crisis¹:

- Dennis Kim: La investigación que se está llevando a cabo aquí sobre la teoría de cuerdas no es más que un camino sin salida.

¹Temporada 1, episodio 17.

– Sheldon: Disculpa, esa es mi área de trabajo y para nada es un camino sin salida.

– Dennis Kim: Obviamente todavía no te has dado cuenta, pero tranquilo, que ya lo harás.

Tristemente, como saben los que están al día de la serie, al final resulta que Dennis Kim tenía razón. Tras varios años dedicándose a la teoría de cuerdas, Sheldon llega a la conclusión de que había alcanzado años antes su joven némesis y, harto de no obtener resultados con la teoría de cuerdas, decide cambiar su área de estudio² y centrarse en la materia oscura (que ya hemos tratado anteriormente). Pero antes de entrar en qué es lo que llevó a Sheldon a esta conclusión, vamos a explicar en qué consiste la teoría de cuerdas y su relación con los diferentes temas que hemos explicado hasta ahora.

Mientras el continuo progreso tecnológico de las últimas décadas ha tenido una repercusión significativa en nuestras vidas, en el mismo espacio de tiempo nuestro conocimiento sobre la estructura fundamental de la naturaleza se ha estancado. En efecto, el primer cuarto del siglo XX nos aportó dos descubrimientos (la relatividad y la mecánica cuántica) que cambiaron

nuestra visión del mundo, y que en el medio siglo posterior se consolidaron en el modelo estándar de partículas; sin embargo, las décadas finales de aquel siglo y lo que llevamos del actual no han producido más que la comprobación de algunas de aquellas previsiones (las más reciente es la detección del bosón de Higgs y la probable verificación de las ondas gravitacionales) y la elaboración de algunas teorías que no han alcanzado el grado de solidez necesario.

Entre estas últimas, la teoría de cuerdas es la más popular. Nacida en 1970, en pocos años fue considerada por muchos científicos como la principal candidata a ser la «teoría de todo» (la teoría definitiva). Pero, como una bengala que asciende rápidamente y brilla con gran fulgor durante corto tiempo, también la teoría de cuerdas languidece por falta de resultados efectivos y se ha reducido el número de físicos dedicados a ella, incluyendo, como hemos visto, al mismo Sheldon Cooper. Si quedará definitivamente abandonada en el cajón de las teorías fallidas, o resurgirá con fuerza a consecuencia de algún nuevo descubrimiento, solo el tiempo lo dirá.

¿Por qué una nueva teoría?

Tanto la teoría de la relatividad como la mecánica cuántica se habían mostrado extremadamente fiables en sus respectivos ámbitos de aplicación. Sin embargo, en algunas áreas ambas deben ser tenidas en cuenta de manera simultánea, y en tales casos la combinación de las fórmulas de una y otra conduce a resultados catastróficos (en forma de valores infinitos o incongruentes). Esto es lo que sucede al estudiar las interacciones de las partículas elementales, por lo que apenas establecidas las bases de la mecánica cuántica los principales físicos que trabajaban en ella dedicaron sus esfuerzos a tratar de compatibilizar ambas teorías.

Las cuatro interacciones fundamentales

En la física clásica, las fuerzas que actúan a distancia, como la gravedad y el electromagnetismo, habían sido explicadas de manera satisfactoria mediante el uso de campos. Podemos imaginar los campos como líneas que surgen de una masa o carga eléctrica y se expanden en todas direcciones (eventualmente combinándose con otras), o también como un espacio relleno de pequeñas flechas con una dirección e intensidad determinadas

² Temporada 7, episodio 20.

en cada punto. Se hacía necesario, pues, adaptar esta idea a la nueva realidad, y obtener una teoría cuántica de campos en la que aquellas imaginarias flechas sean ahora partículas sometidas a las leyes de la mecánica cuántica. Tal ejercicio debía realizarse para cada uno de los cuatro tipos de interacciones (o fuerzas) definidas en el modelo estándar:

- La nuclear fuerte, ejercida por los gluones. Actúa sobre las partículas (los quarks) que tienen una propiedad denominada «color» (que puede adoptar tres valores llamados rojo, verde y azul, aunque no tienen nada que ver con los colores que nosotros percibimos)³. Es tan fuerte que, en condiciones habituales, las partículas afectadas por ella existen únicamente en conjuntos de color neutro (p. ej., combinación de tres colores distintos, o de un color y un anticolor). Alrededor del 80% de la masa de la materia corriente se debe a la interacción fuerte.
- La nuclear débil, ejercida por los bosones W y Z (partículas que, a diferencia del fotón y del gravitón, tienen una masa elevada, unas 100 veces mayor que la del protón).

Actúa entre los quarks y los leptones (electrones, muones y tauones). Como su nombre indica, su intensidad es mucho menor que la de la interacción nuclear fuerte.

- La electromagnética, ejercida por los fotones. Actúa sobre partículas que tienen carga eléctrica, y muestra la particularidad de que puede ser repulsiva o atractiva, según que el signo de las cargas de las partículas sea el mismo u opuesto. En el átomo, su intensidad es intermedia entre las de la interacción fuerte y débil.
- La gravitatoria, hipotéticamente ejercida por los gravitones (nunca detectados todavía). Aunque relativamente débil, resulta la más importante a grandes distancias, puesto que las interacciones fuerte y débil tienen un alcance muy limitado (del orden de 10^{-15} y 10^{-18} m, respectivamente), y la electromagnética, por su doble sentido positivo y negativo, se compensa a grandes escalas.

Primeras teorías cuánticas de campos

El primer paso efectivo para la creación de una teoría cuántica de

campos lo dio Dirac en 1927 con un artículo⁴ en el que proporcionó un procedimiento para adaptar el cálculo de campos a las características discretas de los cuantos, y lo aplicó a la interacción electromagnética, acuñando el término «electrodinámica cuántica» (QED, del inglés *Quantum ElectroDynamics*) para la nueva teoría cuántica del campo electromagnético.

En años sucesivos, otros físicos, como Heisenberg, Pauli y J. Robert Oppenheimer, intentaron completar la teoría de Dirac sin conseguirlo, y hubo que esperar hasta después de la Segunda Guerra Mundial para que, entre 1947 y 1948, el japonés Sin-Itiro Tomonaga, el estadounidense Julian Schwinger, y Feynman, construyeran una nueva electrodinámica cuántica, probablemente la teoría que se aproxima con mayor exactitud a la realidad de cuantas se han creado (todas las verificaciones experimentales realizadas hasta el momento muestran una precisión mejor de una parte en diez millones). Por este trabajo los tres compartieron el Premio Nobel de Física en 1965.

³ Los quarks tienen una carga fraccionaria, que puede ser $+2/3$ (quark arriba o quark u) o $-1/3$ (quark abajo o quark d). Un protón está formado por dos quarks u y un quark d (carga total = $2/3 + 2/3 - 1/3 = 3/3 = +1$), y un neutrón está formado por un quark u y dos quarks d (carga total = $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$).

⁴ *The quantum theory of the emission and absorption of radiation.*

Del punto a la cuerda

Aquella situación había propiciado una corriente de opinión entre algunos físicos que pensaban que no había que imaginar cómo eran las partículas, sino limitarse a explicar su funcionamiento a partir de los datos observados en los experimentos. Para ellos, las leyes de la física debían ser consideradas como una caja negra, que denominaban «matriz de dispersión» (en inglés *scattering matrix*, o simplemente *S-matrix*), en la que se introducen unas partículas con ciertas propiedades y se obtienen otras con propiedades distintas. No sabemos qué sucede dentro, pero conocemos el estado inicial y este permite definir una tabla de probabilidades del estado final.

El físico teórico Gabriele Veneziano logró encontrar la expresión matemática que se escondía tras la matriz de dispersión en 1968, mientras pasaba unos meses en el CERN. Su fórmula es conocida como la «amplitud Veneziano», y aunque él no le daba ninguna interpretación física que supusiera una nueva visión de las partículas, la fecha de publicación del artículo en que la describía es considerada generalmente como la del nacimiento de la teoría de cuerdas (a pesar de que en el artículo no aparece en ningún momento la palabra cuerda).

La interpretación de la fórmula de Veneziano surgió en 1970 de manera independiente de la mano de tres físicos: el estadounidense Yoichiro Nambu, el danés Holger Nielsen y el también estadounidense Leonard Susskind, a los que se considera los padres de la teoría de cuerdas. Los tres observaron que la amplitud de Veneziano se correspondía con la fórmula de un oscilador armónico cuántico (un oscilador armónico es algo que vibra con movimiento periódico, como las cuerdas de un piano o un violín), y pensaron que tal idea podía ser útil para explicar la estructura de los hadrones (protones, neutrones y mesones, formados por quarks), que a diferencia de otras partículas, como el electrón, no podían ser consideradas puntuales, sino que ocupan un cierto espacio.

Según la idea de los tres físicos, un protón o un neutrón estarían compuestos por tres quarks unidos a sendas cuerdas elásticas juntadas en el centro (en el caso de un mesón solo habría un quark y un antiquark en los extremos opuestos de una única cuerda). Tal conjunto puede adquirir energía (y por tanto masa) de tres maneras: 1) por rotación del conjunto, que por acción de la fuerza centrífuga aleja los quarks del centro y extiende las cuerdas; 2) los quarks pueden variar periódicamente su distancia al

centro en un movimiento ondulatorio; y 3) las cuerdas pueden vibrar como las de un instrumento musical. Según las leyes de la mecánica cuántica, tales variaciones de energía (o de masa) solo se producen en múltiplos de unidades cuánticas, que corresponden a estados concretos de los hadrones, los que anteriormente se creía que correspondían a distintos tipos de partículas. Desde este punto de vista, la nueva teoría aportó simplicidad al modelo previamente existente.

Sin embargo, la primera teoría de cuerdas (también llamada «teoría bosónica de cuerdas», porque en ella las cuerdas ocupaban el lugar de los bosones en el modelo estándar) tenía dos importantes problemas: sus fórmulas solo funcionaban suponiendo un espacio con 26 dimensiones (25 de espacio más una de tiempo), y el resultado obtenido para las fuerzas existentes entre los hadrones era muy diferente del real, que además en 1974 ya había sido explicado satisfactoriamente mediante la cromodinámica cuántica. Para empeorar las cosas, la teoría presentaba inconsistencias y todos los intentos de combinar las cuerdas de los hadrones con las partículas puntuales fracasaron. Todo ello hizo que la comunidad científica perdiera temporalmente el interés por la teoría de cuerdas.

Dos revoluciones de supercuerdas

Entre 1984 y 1986 se produjeron diversos descubrimientos que reavivaron el interés por la teoría e iniciaron la primera revolución de supercuerdas. El prefijo «super» hace referencia a la supersimetría (o SUSY, del inglés *SUPERSymmetry*), que es una simetría espaciotemporal que relaciona dos grandes grupos de partículas elementales: los fermiones, que tienen un espín semientero (partículas de materia), y los bosones, con un espín entero (partículas de fuerza). Con ella, la nueva teoría permite describir todas las partículas elementales y sus interacciones.

En realidad, en aquellos años no deberíamos hablar de una sola teoría, sino de cinco versiones diferentes, todas con cuerdas cerradas y dos de ellas con cuerdas abiertas. Las primeras eran denominadas de tipo IIA y IIB, mientras que las segundas eran denominadas de tipo IA y IB. Ninguna de ellas se ajustó a los resultados experimentales, pero el descubrimiento posterior de la teoría de cuerdas heteróticas (con $9 + 1$ dimensiones, en lugar de $25 + 1$) reavivó las esperanzas de lograr la teoría definitiva.

Una década más tarde, en 1995, el físico teórico estadounidense Edward Witten propuso la idea de

que las cinco teorías existentes eran en realidad versiones (o soluciones) de una única teoría (con $10 + 1$ dimensiones), que denominó «teoría M», tal vez porque incorpora unos nuevos objetos, denominados p-branas (objetos similares a membranas infinitas de p dimensiones), que como las cuerdas pueden vibrar. De hecho, en la teoría M ya no se habla de cuerdas, sino de membranas de una sola dimensión. En su etapa como investigador en Caltech, Sheldon ha investigado la teoría M. Aunque no aparezca en la serie, sí se menciona que previamente había estudiado las supersimetrías. Fue a los 15 años, cuando estuvo en el Heidelberg Institute, en Alemania, como profesor invitado examinando la perturbación de las amplitudes en las teorías de supersimetrías $N = 4$.

Demasiadas teorías

En capítulos anteriores ya nos hemos referido a la constante cosmológica, un término que Einstein añadió a la fórmula de la relatividad general para que esta se ajustara a un universo estático. Tal constante equivale a una energía constante del vacío, distinta de cero y común para cualquier observador independientemente de su movimiento, que contrarresta la acción de la gravedad. Vimos también que en 1927 Lemaître, a

partir de las observaciones de la velocidad de las galaxias, afirmó que el universo está en expansión, un hecho que confirmó Hubble 2 años más tarde, concretándolo con la ley que recibe su nombre y que dice que los objetos situados fuera de nuestra galaxia se alejan de nosotros con una velocidad aproximadamente proporcional a su distancia a la Tierra. Aún más, en 1998, Perlmutter, Schmidt y Riess, al medir las velocidades de las supernovas más lejanas, descubrieron que la velocidad de expansión del universo se está acelerando, lo que indica que la constante cosmológica es todavía mayor (y que se atribuye a la energía oscura que forma el 70% del universo).

La mecánica cuántica predice la existencia de una energía en el vacío (en realidad, más que de vacío debemos hablar de estado fundamental, aquel en el cual el valor de la energía es el mínimo posible). En efecto, el principio de incertidumbre prohíbe que un estado tenga un valor completamente determinado, por lo que no puede existir un estado cuya energía valga exactamente cero, ni que sea el vacío. Sin embargo, el cálculo de la constante cosmológica según la mecánica cuántica conduce a un valor que es unos 120 órdenes de magnitud⁷ superior a los que se desprenden del grado de

incluyen ciertos valores determinados, que son las constantes fundamentales. Por lo que respecta a las fórmulas, la estructura básica del modelo estándar puede representarse de un modo sumamente compacto de la siguiente manera (la fórmula desarrollada ocuparía una página entera):

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}D\psi + \psi_i\gamma_{ij}\psi_j\varphi + \text{h. c.} + |D_\mu\varphi|^2 - V(\varphi)$$

En cuanto a las constantes fundamentales, son 26 que definen las relaciones entre los valores de las diversas propiedades de las partículas y las interacciones de estas, más la constante cosmológica. De la magnitud de todas y cada una de ellas dependen las características del universo. Si tan solo una cambiara ligeramente, las estructuras que forman los distintos componentes del mundo, desde los átomos hasta las galaxias, serían radicalmente distintas, o en muchos casos ni tan siquiera llegarían a formarse.

Las condiciones necesarias para la aparición de la vida (en especial en la forma en que la conocemos, basada en el carbono) son todavía más estrictas, y sin embargo son las que existen en el universo, cosa que ha llevado a pensar en la posible relación entre la existencia de vida y los valores de las constantes fundamentales. Tal idea es conocida

como el «principio antrópico», denominación acuñada por el físico teórico australiano Brandon Carter en una conferencia en 1973 con motivo del 500 aniversario del nacimiento de Copérnico (lo que resulta en cierto modo un contrasentido, pues Copérnico fue precisamente quien afirmó que la Tierra no es el centro del universo, con lo que los humanos abandonamos el papel preponderante que hasta entonces nos habíamos adjudicado, y sin embargo ahora Carter volvía a asignarnos un papel fundamental en la estructura de la naturaleza).

Desde entonces, el principio antrópico ha sido presentado en distintas y variadas versiones por científicos, filósofos y religiosos. Estos últimos se han valido de él para intentar demostrar que el universo ha sido creado por un ser superior (un dios) en la forma necesaria para permitir la existencia de los humanos (el diseño inteligente). Una idea similar es la que imagina nuestro universo como una simulación de ordenador llevada a cabo por una civilización mucho más avanzada tecnológicamente (la única diferencia con la anterior es que sustituimos aquel dios por los creadores de la simulación, ya que en cuanto respecta a nuestra percepción de la «realidad» sería la misma). En ambos casos, el preciso

ajuste de las leyes físicas para la existencia de los humanos se justifica porque quien diseña el universo lo hace precisamente con este objetivo.

Otra posibilidad es que la singularidad que nos otorgamos a nosotros mismos no sea más que la ignorancia de las múltiples posibilidades existentes en nuestro universo. Es decir, que la razón de que nos sorprenda la coincidencia entre los valores de las constantes fundamentales observados y los que son necesarios para nuestra existencia es que creemos que nuestras inteligencia y sentiencia son las únicas posibles. Si esto fuera así, tal coincidencia sería un hecho extraordinario, prácticamente imposible. Sin embargo, si admitimos que es posible concebir que otros tipos de universo (con otras constantes fundamentales) podrían dar lugar a otras formas de vida muy distintas de la nuestra, con unas capacidades que ni siquiera imaginamos, entonces nuestro universo pierde su singularidad.

El paisaje antrópico de la teoría de cuerdas

En el primer capítulo vimos que una de las fases del Big Bang fue la llamada época inflacionaria, en la que el universo experimentó una extraordinariamente rápida expansión. Sin embargo, en 1986, el físico teórico ruso Andrei Linde

propuso la idea de que la inflación no fue un suceso único, sino un fenómeno que puede reproducirse aleatoriamente y generar de modo continuo nuevos universos con distintas leyes físicas que permiten la realización de todas las posibilidades (lo que él denominó la «inflación caótica eterna»). Tal fenómeno puede producirse de modo natural en cualquier punto del espacio cuando se da el nivel de energía adecuado, debido a fluctuaciones cuánticas del vacío. Incluso algunos físicos especulan sobre la posibilidad de crear en el laboratorio nuevos universos, aunque, incluso en el caso de lograrlo, resultaría imposible verificar su existencia, pues inmediatamente se separarían por completo del nuestro.

Hasta el momento no disponemos de ninguna observación experimental que respalde ni desmienta la teoría de la inflación caótica eterna, pero si se correspondiera con la realidad sería la solución al problema del principio antrópico y, con él, al del paisaje de la teoría de cuerdas. Esta fue la idea que presentó Susskind en 2003¹⁰. En efecto, el gran número de

soluciones de la teoría es compatible con los casi infinitos universos generados, y no es extraño pensar que entre todos ellos haya uno, el nuestro, que reúna precisamente las condiciones que han hecho posible nuestra existencia.

Falsabilidad y paradigmas

Karl Popper, uno de los grandes filósofos de la ciencia, expuso¹¹ la idea de que la característica que separa la ciencia de la no-ciencia no es la verificabilidad, sino la falsabilidad. Es decir, para que una teoría pueda ser considerada científica, no es necesario que pueda ser verificada¹², pero sí que su estructura lógica sea tal que permita obtener deducciones que puedan ser refutadas (falsadas) por la experiencia. Como paradigma de teoría científica presenta la de la relatividad de Einstein, pues de ella se deducían consecuencias que eran sorprendentes y altamente improbables (y por ello muy susceptibles a ser falsadas), y sin embargo, las observaciones experimentales mostraron que se ajustaba a la realidad. En cambio,

las teorías del psicoanálisis de Freud le parecían construidas de tal modo que permitían ser adaptadas a cualquier situación real, por lo que no son falsables, y por tanto tampoco pueden ser consideradas científicas.

Otro gran filósofo de la ciencia del siglo xx fue Thomas Kuhn, que aportó¹³ una visión de la ciencia más relacionada con su historia y su entorno que con su posible verificación empírica. Kuhn propone que el progreso científico pasa por fases alternas, que denomina respectivamente ciencia normal y revoluciones. Durante la ciencia normal, el conjunto de teorías y herramientas adicionales se acumulan y se consolidan en un paradigma, que es un modelo del mundo (una manera de interpretarlo) aceptado generalmente. Una revolución científica tiene lugar cuando el paradigma es alterado para solucionar los problemas que habían ido apareciendo en el modelo anterior.

Estas dos diferentes concepciones de la ciencia son citadas y discutidas de modo cada vez más frecuente en

¹⁰ En su artículo *The Anthropic Landscape of String Theory* (El paisaje antrópico de la teoría de cuerdas).

¹¹ En su libro *Logik der Forschung* (La lógica de la investigación científica), de 1952.

¹² En realidad, una teoría nunca puede ser verificada por completo. Únicamente podemos decir que resulta compatible con las observaciones de que disponemos hasta el momento y dentro del margen de error de las mismas.

¹³ En su libro *The Structure of Scientific Revolutions* (La estructura de las revoluciones científicas), de 1962.

el ámbito de la física fundamental. Ello se debe a que, como afirma el filósofo, y anteriormente físico, austríaco Richard Dawid¹⁴, este campo está viviendo un periodo de confusión, debido a la confluencia de dos hechos de signo contrario. Por una parte, parece que podamos estar a punto de conseguir una teoría capaz de describir tanto lo más pequeño (los componentes elementales de la realidad) como lo más grande (los posibles múltiples universos), y por otra, cualquier teoría de este tipo escapa completamente a nuestras posibilidades de comprobación experimental, por lo menos durante largo tiempo, o tal vez para siempre.

Antes de la invención de los instrumentos ópticos, a principios del siglo XVII, la escala de magnitudes de los objetos que podíamos observar visualmente se extendía más o menos desde una décima de milímetro (10^{-4} m) hasta unos 1000 millones de kilómetros (10^{12} m)¹⁵. Desde entonces, primero los microscopios y telescopios, y más tarde los colisionadores de partículas y los radiotelescopios, extendieron este rango hasta cubrir desde los 10^{-15} m de las partículas observables

en el LHC hasta los 10^{27} m del universo observable. Sin embargo, parece que ambos extremos son el límite de lo que podemos esperar alcanzar. Para observar partículas más pequeñas necesitaríamos un acelerador mucho más potente que el gran colisionador de hadrones, lo que es inviable por razones prácticas. Y lo que haya más allá del universo observable, así como los eventuales otros universos, quedan fuera de nuestra posibilidad de detección. Tal situación obliga a plantearnos una serie de preguntas. Si la teoría de cuerdas, o cualquier otra que pretenda abarcar la misma extensión, no es falsable, ¿podemos decir que es científica? Y si, según el modelo científico de Popper, no lo es, ¿qué criterios son necesarios para que la comunidad científica consensue su validez? Y por último, de producirse tal aceptación, ¿desmerecería ello el concepto que la sociedad tiene de la ciencia?

Al finalizar el siglo XIX, el paradigma existente en el mundo de la física era que esta había alcanzado a explicar todos los fenómenos naturales. Sin embargo, la investigación de unas pequeñas anomalías llevó a la revolución de la relatividad y la

mecánica cuántica. A lo largo del siglo XX estas últimas se han desarrollado dando lugar a un periodo de ciencia normal, en el que se han abierto nuevas rendijas que esperan una nueva revolución.

Sheldon contra las cuerdas

Sheldon Cooper tiene un gran concepto de sí mismo, especialmente en lo que respecta a su capacidad intelectual y sus conocimientos científicos. Por ello, con la noticia de un descubrimiento en el colisionador de hadrones del CERN que parece invalidar la teoría de cuerdas¹⁶, a la que ha dedicado su carrera, Sheldon entra en crisis. Ya hemos comentado¹⁷ que en los primeros momentos después del Big Bang el universo experimentó una rapidísima expansión. Tal inflación habría producido unas ondas gravitacionales que deberían poder ser observadas en la radiación de fondo de microondas (CMBR). La teoría de cuerdas predice un modelo inflacionario en el que la energía de las ondas detectadas en la CMBR es mucho menor que la de otros modelos. Desde el año 2006, diversas instituciones (principalmente universidades

¹⁴En su libro *String Theory and the Scientific Method (La teoría de cuerdas y el método científico)*, de 2013.

¹⁵El orden de magnitud del diámetro de la estrella Mu Cephei, una supergigante roja que es la mayor estrella visible a simple vista.

¹⁶Temporada 7, episodio 20.

¹⁷En la pág. 41.

e institutos tecnológicos) pusieron en marcha un programa de experimentos (sucesivamente BICEP, BICEP2, Keck Array y BICEP3) con telescopios especializados en la detección de la energía de las ondas gravitacionales.

En marzo de 2014 se anunció que BICEP2 había detectado las ondas con una intensidad muy superior a la propuesta por la teoría de cuerdas. Este descubrimiento llevó a Sheldon a la decisión de romper su relación con la teoría. No sabiendo cómo gestionar tal situación, la compara con una ruptura amorosa y acaba emborrachándose y enviando mensajes a Stephen Hawking en los que le aconseja que deje su trabajo sobre los agujeros negros y se dedique a resolver crímenes con él (incluso ensalza la geología, que Sheldon normalmente considera que no es una «ciencia de verdad»).

El estilo cómico de la serie obliga a mostrar el descrédito de la teoría de cuerdas como algo que se produce de repente, pero como hemos visto en las secciones anteriores, la teoría fue perdiendo adeptos entre los físicos de modo gradual. Si acaso queremos señalar un punto de inflexión en su popularidad, este podríamos fijarlo en el año 2006, con la publicación de dos libros

escritos por sendos físicos teóricos: Peter Woit (*Not even wrong*) y Lee Smolin (*The Trouble with Physics*). El título del primero viene a decir que el problema de la teoría de cuerdas no es que no sea cierta, sino que «ni siquiera es falsa»; o dicho de otra manera, no cumple el requisito esencial que se exige a cualquier teoría que quiera ser considerada científica, es decir, que sea falsable.

Ello no impide que algún día, como ha sucedido en algunas otras ocasiones, se produzca un avance inesperado que cambie tal situación y convierta a la teoría de cuerdas en la solución al problema de la gravedad cuántica (y otorgue a quien lo consiga un merecido Premio Nobel). Esta es la esperanza que mantiene todavía a un número de físicos fieles que continúan trabajando en ella sin desfallecer por sucesos como el que provocó el abandono de Sheldon. En realidad, el descubrimiento del CERN que dejó a Sheldon «contra las cuerdas» fue desmentido meses más tarde, ya que los datos obtenidos no se debían a las ondas gravitacionales generadas durante los primeros momentos del universo, sino a la luz polarizada emitida por el polvo existente en la Vía Láctea. Incluso así, muchos físicos prefieren no

dedicar su vida a la investigación de una materia que tal vez nunca produzca resultados efectivos. La ausencia de estos resultados puede llevar a la comunidad científica al desánimo, y de hecho, Leonard sufre una crítica parecida cuando, en una entrevista radiofónica sobre su trabajo en el centro Caltech, se da cuenta de que en realidad no ha realizado ningún hallazgo relevante¹⁸.

Leonard es excesivamente honesto en la entrevista, admitiendo que la inversión que se ha realizado no ha tenido los resultados esperados. «Algunos días pienso en que hemos gastado tanto dinero... ¿Por qué no hemos encontrado nada? ¿Qué estamos haciendo?». Esta transparencia le lleva a entrar en conflicto con la universidad, que lo fuerza a elegir entre su trabajo allí o escribir una rectificación sobre sus declaraciones, cosa que le cuesta hacer porque supone traicionar lo que realmente piensa. En esta ocasión, y sin que sirva de precedente, Sheldon acaba admitiendo que está de acuerdo con él. «Hemos esperado que la supersimetría sea cierta durante décadas, y luego construimos el gran colisionador de hadrones, que se suponía que tenía que probarla encontrando estas nuevas

¹⁸ Temporada 11, episodio 2.

partículas... y no lo ha hecho. Quizás la supersimetría, nuestra última gran idea, simplemente es errónea.» A pesar de esta nota negativa, al final del episodio los protagonistas encuentran una manera de continuar

creyendo en la ciencia al visitar la tumba de Richard Feynman, al que admiraron cuando eran pequeños. Es allí cuando Sheldon recuerda al científico y dice: «Feynman solía decir que él no se dedicaba a la

física buscando el reconocimiento de los premios, sino simplemente porque se lo pasaba bien. Tenía razón. La física solo está muerta cuando dejamos de apasionarnos por ella».

Entendiendo el cerebro de Sheldon

¡Mi cerebro es el mejor de todos!

(Temporada 7, episodio 3)

No es ningún secreto que Sheldon adora a su propio cerebro. Es su órgano favorito porque es el que mayores satisfacciones le da en la vida y sobre el que giran su identidad y sus planes de futuro. Es a partir de su inteligencia como establece su relación con los demás, y también esta es la que determina las expectativas que tiene respecto a sí mismo, que no son otras que acabar siendo galardonado con el Premio Nobel. Consciente de ser muy inteligente, considera su cerebro como su gran tesoro y procura cuidarlo teniéndolo estimulado de forma permanente de distintas maneras, manteniéndolo siempre ocupado. Como las conversaciones que tiene con los demás le resultan aburridas, procura acortarlas o bien las desvía de las trivialidades hacia juegos de ingenio que pongan a prueba su capacidad, cosa que hace muy a menudo cuando Leonard le lleva en coche.

No puede evitar menospreciar y ser condescendiente con todos los que no son tan inteligentes como él (siendo Howard, Penny y los novios de esta última sus blancos favoritos), y por el mismo motivo se siente atraído hacia cerebros que percibe como iguales, tanto en el terreno de la amistad (ya hemos visto la admiración que siente hacia Stephen Hawking) como en el amoroso. Solo le hemos visto interesarse por las relaciones de pareja en dos ocasiones: con Beverly, madre de Leonard, y con Amy, su actual novia. En los dos casos se trata de neurocientíficas, cosa que explicaría parte de la atracción que siente por ellas (le gusta que adoren su inteligencia) y que ellas sienten por él (pues ellas ven en el cerebro de Sheldon unas cualidades que para los otros pasan desapercibidas).

Por supuesto, son mujeres muy inteligentes que suponen un reto para Sheldon y con las que puede

tener una conversación estimulante, y además tienen en común el desinterés por la interacción social. Esto le lleva a crear una conexión con ellas que es fundamentalmente intelectual y siempre basada en intereses mutuos.

- Sheldon: Me siento muy cómodo con usted.
- Beverly: Yo también me siento muy cómoda contigo.
- Sheldon: Me sorprende porque por lo general no me siento con... bueno, con nadie.
- Beverly: Ni yo.
- Sheldon: ¿Qué probabilidades hay de que dos individuos tan únicos como nosotros se conozcan a través de alguien tan corriente como su hijo?
- Beverly: ¿Es una pregunta retórica o calculamos las probabilidades?
- Sheldon: Me gustaría calcularlas.
- Beverly: A mí también.

Otra de las actividades que Beverly y Sheldon hacen juntos es ir al hospital para que ella le haga una tomografía computarizada a él (según Leonard, es lógico, porque a Sheldon le gusta que escaneen un apreciado cerebro y a Beverly le gusta escanear cerebros)¹. El contacto físico es inexistente entre ellos y parece que

¹ Temporada 2, episodio 15.

el desinterés por ello es mutuo, pero de hecho esta extraña relación acaba cuando Beverly besa a Sheldon y decide que no es para ella², así que en realidad sí había por su parte cierto interés en el sexo. Desde entonces, su relación sigue siendo sólida, pero es estrictamente de amistad.

La misma conexión intelectual vuelve a surgir más adelante con Amy, a quien Sheldon define como una amiga que no es su novia, destacando lo estimulante que es su conversación con ella. Está tan convencido de que ha encontrado a su igual (en términos de intelectuales) que planea tener un hijo con ella cuando ni siquiera han tenido su primera cita. Sheldon alega que con su reproducción «harían un regalo a la humanidad»³. Es Penny quien acaba desactivando estos planes, que debían llevarse a cabo mediante un procedimiento de fecundación *in vitro*, de la manera más científica y menos sexual posible. La relación prosigue, basándose en actividades intelectuales, como crear un juego en el que uno propone al otro un mundo que difiera del nuestro en un aspecto clave y luego plantea una pregunta relacionada⁴. Con el tiempo, ella

intenta llevar la relación al terreno físico, en el que está mucho más interesada de lo que parecía en un principio.

El hecho de tener permanentemente a un personaje como Amy en la serie (interpretado por la actriz Mayim Bialik, que en la vida real es doctora en neurociencia) no solo ha servido para poner a Sheldon una mujer a su nivel, sino también para introducir al espectador tramas relacionadas con la neurociencia: el estudio del sistema nervioso, incluyendo su formación, su estructura, su funcionamiento, y sus efectos, con especial atención al cerebro y a las funciones cognitivas⁵. De ser originalmente una rama de la medicina, ha pasado a multiplicar sus campos de aplicación, y hoy día está relacionada con áreas como la psicología, la psiquiatría, la computación, la educación, la lingüística, la ética y la filosofía.

La importancia de la neurociencia es uno de los motivos que pueden generar un conflicto de pareja entre Sheldon y Amy, pues el primero defiende siempre la física teórica como la disciplina superior, mientras que la segunda defiende muy bien la relevancia de su área de estudio,

hasta el punto de que puede dejar sin argumentos a Sheldon (ya hemos dicho que ella es tanto o más inteligente que él) y precipitar una reacción abrupta, como finalizar la relación.

– Amy: Comparada con las aplicaciones reales de la neurobiología, la física teórica es, ¿qué palabra busco? Mmm, linda.

– Sheldon: ¿Sugieres que el trabajo de un neurobiólogo como Babinski pudiera llegar a tener la importancia de uno de un físico como Clerk Maxwell o Dirac?

– Amy: Lo declaro rotundamente. Babinski desayuna Dirac y defeca Clerk Maxwell.

– Sheldon: Retráctate.

– Amy: Claro que no. Mis colegas y yo estamos trazando los sustratos neurológicos que sirven para procesar la información global, que es necesaria para todo el razonamiento cognitivo, incluyendo la investigación científica, haciendo mi investigación *ipso facto* prioritaria en el *ordo cognoscendi*. Eso significa que es mejor que su investigación, y por ende, claro está, que la tuya.

² Temporada 3, episodio 11.

³ Temporada 4, episodio 1.

⁴ Temporada 4, episodio 3.

⁵ No debe ser confundida con la neurobiología (la biología del sistema nervioso), que es una rama de la neurociencia.

- Leonard: Lo siento, aún... aún estoy intentando asimilar lo de defecar a Clerk Maxwell, así que...
- Sheldon: Disculpa, pero una gran teoría unificante, en lo que se refiere a que explica todo, explicará la neurobiología *ipso facto*.
- Amy: Sí, pero si tengo éxito, yo seré capaz de mapear y reproducir tus procesos de pensamiento en derivar una teoría unificada, y por lo tanto, subsumo tus conclusiones a mi paradigma.
- Sheldon: Ese es el rango de la psicología y fue revelado decisivamente como patrañas por Gottlob Frege en la década de 1890.
- Amy: Parece que hemos llegado a un callejón sin salida.
- Sheldon: Estoy de acuerdo. Propongo que nuestra relación termine inmediatamente.
- Amy: Lo segundo.

El cerebro en la antigüedad

Para entender la posición de Amy y el estatus actual de la neurología es

necesario remontarnos a los inicios del estudio del cerebro humano. El escrito más antiguo encontrado que describe la corteza cerebral y los efectos de algunas de sus lesiones es el papiro quirúrgico de Edwin Smith⁶, así llamado porque fue este traficante de antigüedades quien lo encontró en Luxor. Corresponde al siglo XVII AEC, y se cree que su autor fue el médico Imhotep, aunque probablemente es copia de otro documento más antiguo (entre 3000 y 2500 AEC). En él se incluyen instrucciones para el tratamiento de diversos tipos de lesiones (probablemente comunes durante la construcción de las grandes pirámides), entre ellas fracturas de cráneo que dejan el cerebro al descubierto, y se describen las repercusiones que las lesiones cerebrales tienen en otras partes del organismo.

Fue un discípulo de Pitágoras, Alcmeón de Crotona, el primero que hacia el año 500 AEC dejó por escrito que es en el cerebro donde radica la mente, ya que «todos los sentidos están conectados de alguna manera con el cerebro, por lo que si este sufre algún daño, aquellos se

ven afectados; la capacidad de sintetizar sensaciones hace que el cerebro sea la sede del pensamiento». Un siglo más tarde, Hipócrates refrendó la misma idea en su tratado sobre la epilepsia⁷, en el que dice que «la verdadera raíz de esta dolencia (...) está en el cerebro» y que «el cerebro es el intérprete de la inteligencia».

Sin embargo, la fuerte influencia de Platón y Aristóteles en la cultura occidental habría de retrasar la adopción generalizada de tales ideas. Platón creía que el alma estaba compuesta por tres partes: la inmortal o racional, residente en la cabeza; la superior o ejecutora, que recibe las señales de los sentidos y reside en el corazón; y la inferior o emocional, que reside en el hígado. Por su parte, Aristóteles adoptaba una visión más radical y consideraba que era el corazón el centro único de las sensaciones, la inteligencia y el movimiento.

La anatomía científica

Las primeras bases sólidas que habrían de permitir el posterior nacimiento de la neurociencia se produjeron muchos siglos más tarde.

⁶ Nacido en Connecticut en 1822, Smith se interesó por la egiptología y en 1857 se trasladó a Luxor, donde vivió hasta 1876. Allí adquirió el papiro (en dos partes que luego unió) e intentó traducirlo, aunque sin éxito. A su muerte, en 1906, su hija entregó el papiro en donación a la Sociedad Histórica de Nueva York, y actualmente se conserva en la Academia de Medicina de la misma ciudad. Mide 4,68 m de largo por 33 cm de alto, aunque se cree que su longitud original podía superar los 5 m.

⁷ *Sobre la enfermedad sagrada*.

En el siglo XVI, Andrés Vesalio inició el conocimiento científico de la anatomía humana con sus libros⁸, publicados en 1543, que están repletos de ilustraciones fruto de las numerosas disecciones que él mismo había realizado, y que constituyen los fundamentos de la anatomía moderna. En el siglo XVII, el médico inglés Thomas Willis investigó la anatomía del cerebro y el sistema nervioso en humanos, pero también en perros y otros animales, y utilizó por primera vez el término neurología⁹. El estudio del cerebro de los animales continúa siendo parte de esta disciplina, y en *The Big Bang Theory* pudimos ver a Amy haciendo pruebas con monos, a los que presenta diversas imágenes para recopilar datos sobre sus reacciones para estudiar los efectos en estos animales de la deficiencia de la enzima monoaminoxidasa¹⁰. Volviendo al estudio de Willis, este consideró que hay dos tipos de «almas»: la sensitiva, correspondiente a los impulsos instintivos, las acciones y las sensaciones; y la racional, que

genera el razonamiento, la reflexión y el juicio, y sería exclusiva de los humanos. La alteración de estas almas sería la que causaría los trastornos mentales.

En el siglo XVIII, el anatomista italiano Giovanni Battista Morgagni se opuso a la idea de que en el cuerpo humano hay cuatro humores¹¹ (es decir, líquidos), cuya combinación determina la salud y el temperamento de la persona, un concepto dominante en la medicina europea desde la Antigua Grecia. En 1761, Morgagni condensó sus resultados en una gran obra en cinco volúmenes¹², en la que afirmó que las enfermedades no se deben a desequilibrios humorales, sino al «lamento de los órganos doloridos», y aportaba numerosos ejemplos de autopsias en las que relacionaba las enfermedades que había sufrido la persona con el estado de los órganos correspondientes.

Las regiones de la mente

El cerebro humano se nos muestra como una masa gelatinosa dividida

en dos hemisferios y recubierta por una capa con numerosos pliegues (las circunvoluciones cerebrales). A simple vista no apreciamos en él distinción alguna entre unas zonas y otras (si nos referimos únicamente a los hemisferios cerebrales). Sin embargo, a lo largo del siglo XIX se fue confirmando que diversas facultades mentales están localizadas en regiones específicas de la corteza cerebral.

El primer intento en esta dirección, aunque por una vía pseudocientífica, lo emprendió el anatomista y fisiólogo alemán Franz Joseph Gall, quien elaboró la idea de que la forma del cráneo tiene relación con el grado de desarrollo de las distintas zonas cerebrales, y por tanto de ello puede deducirse qué zona está relacionada con una facultad específica. Junto con su colega, el médico alemán Johann Gaspar Spurzheim, desarrollaron la frenología, que pretendía deducir las aptitudes y las tendencias de la persona a partir del examen de la forma de su cabeza¹³.

⁸*De humani corporis fabrica* (Sobre la estructura del cuerpo humano).

⁹*Cerebri anatome* (La anatomía del cerebro).

¹⁰Temporada 7, episodio 5.

¹¹La bilis negra, la bilis amarilla, la flema y la sangre, que motivarían respectivamente los cuatro temperamentos: melancólico, colérico, flemático y sanguíneo.

¹²*De sedibus et causis morborum per anatomen indagatis* (Sobre las localizaciones y las causas de las enfermedades, investigadas desde el punto de vista anatómico).

¹³Aún hoy día es relativamente fácil encontrar algún busto (generalmente blanco, de cerámica o mármol) en el que están señaladas las distintas zonas frenológicas, y que es una reproducción de los utilizados en aquella época.

La frenología encontró el rechazo de autoridades religiosas¹⁴ y de círculos científicos institucionalizados (hasta el punto de que Gall y Spurzheim tuvieron que abandonar Viena en 1805), pero fue bien recibida en ámbitos populares y en países como Gran Bretaña y los Estados Unidos. A partir de mediados del siglo XIX, su aceptación fue reduciéndose hasta quedar limitada a núcleos pequeños, o durante periodos de tiempo limitados. La frenología presentaba el defecto de otras pseudociencias en el sentido de aceptar los resultados que concordaban con las suposiciones previas, e ignorar aquellos que las contradecían. Además, actualmente sabemos que la localización de las diversas facultades mentales nada tiene que ver con las zonas frenológicas (incluso la única de las 27 zonas propuestas por Gall que se aproximaba a su ubicación real fue cambiada posteriormente por Spurzheim).

Quien sí investigó experimentalmente la localización de las funciones cerebrales fue el médico y biólogo francés Marie Jean

Pierre Flourens. Para ello extirpó o estimuló eléctricamente partes del cerebro de animales, principalmente conejos y palomas, y observó los efectos causados por tales intervenciones. De este modo llegó a la conclusión de que, aunque el tronco del encéfalo, el cerebelo y los hemisferios cerebrales funcionan como una unidad, cada uno se encarga de funciones específicas. Sin embargo, no pudo detectar en las reducidas cortezas cerebrales de los animales estudiados zonas determinadas para funciones cognitivas específicas, por lo que creía que los hemisferios cerebrales funcionaban como un todo.

En la década de 1820, el médico francés Jean-Baptiste Bouillaud observó que en muchos casos los pacientes con afasia (incapacidad para producir o comprender el lenguaje) tenían dañado el lóbulo frontal, por lo que afirmó que este era el «principal legislador del habla». Sin embargo, el patólogo Gabriel Andral, también francés, encontró entre los pacientes del Hôpital de la Charité de París una treintena de casos en los que no se

producía tal coincidencia, por lo que durante unas décadas se mantuvo la disputa entre partidarios y detractores de la localización de las funciones en el cerebro.

El cirujano, neurólogo y antropólogo francés Pierre-Paul Broca sentía un fuerte interés por el cerebro y su evolución, lo que le impulsó a crear en 1859 la Société d'Anthropologie de París (la primera de este tipo en el mundo) y a estudiar los cráneos de nuestros antepasados y compararlos con los actuales. Creía que el tamaño del cerebro era indicativo del nivel general de inteligencia, lo que le llevaba a afirmar que las mujeres son menos inteligentes que los hombres¹⁵. En 1861 atendió y estudió a un paciente que desde hacía años había perdido la capacidad del habla, y solo podía pronunciar una sílaba, «tan», aunque siempre intentaba comunicarse. El paciente había desarrollado una gangrena y murió el 17 de abril, a los 51 años. Cuando Broca realizó la autopsia comprobó que tenía dañada cierta zona del lóbulo frontal del hemisferio izquierdo. A partir de entonces estudió otros casos similares y en

¹⁴ Cuando Gall murió, en 1828, cerca de París, le fue denegado un entierro religioso, a pesar de que una de las zonas cerebrales frenológicas era el «*órgano de la religión*», y Gall consideraba que ello probaba la existencia de Dios.

¹⁵ Broca conocía que el tamaño del cerebro está relacionado con la estatura (de lo contrario, deberíamos suponer que las ballenas y los elefantes son mucho más inteligentes que los humanos, pues tienen un cerebro varias veces más grande). A pesar de ello, no dudó en escribir que «no debemos olvidar que las mujeres, en promedio, son algo menos inteligentes que los hombres [...] Podemos por tanto suponer que el menor tamaño del cerebro femenino depende en parte de su inferioridad física, y en parte de su inferioridad intelectual».

todos ellos halló daños en la misma región, que actualmente es conocida, en su honor, como «área de Broca»¹⁶.

La afasia de Broca (o motora) afecta a la producción del lenguaje, pero hay otro tipo de afasia (sensorial) que afecta a la comprensión del lenguaje y a la capacidad de producir frases coherentes (la persona afectada puede pronunciar frases con una dicción correcta, pero sin ningún sentido). El médico, psiquiatra y neuropatólogo alemán Carl Wernicke estudió este trastorno y vio que era producido por una lesión en una zona de la parte posterior del lóbulo temporal izquierdo, que desde entonces es conocida como «área de Wernicke».

En 1870, los alemanes Gustav Theodor Fritsch y Eduard Hitzig llevaron a cabo unos experimentos con perros a los que, sin anestesia, seccionaron el cráneo para exponer la corteza cerebral, que luego estimularon eléctricamente en distintos puntos a fin de observar las reacciones que ello producía en el organismo. De tal modo determinaron qué áreas del cuerpo correspondían a cada zona cerebral.

Estos trabajos fueron ampliados después por el neurólogo escocés David Ferrier, quien no solo determinó las áreas relacionadas con los distintos movimientos corporales en perros y monos, sino que predijo la correspondencia de estas zonas con las del cerebro humano, cosa que permitió a los cirujanos deducir la localización de tumores a partir de los síntomas observados.

El sistema nervioso

Un paso importante para la comprensión del funcionamiento del sistema nervioso fue realizado por el médico, físico y filósofo italiano Luigi Galvani, quien investigó los efectos de la electricidad en el cuerpo de humanos y animales, y observó que si un músculo de una rana muerta entraba en contacto con un conductor cargado de electricidad, el músculo se contraía de la misma manera que lo haría cuando el animal vivo quisiera saltar (de su apellido viene el nombre de galvanismo para este fenómeno). Ello preparaba el camino para comprender la transmisión de señales a través de los nervios, pero la estructura del sistema nervioso no pudo empezar a ser

conocida hasta entrado el siglo XIX, gracias a la mejora de los microscopios y a la técnica de tinción.

En 1839, el fisiólogo alemán Theodor Schwann observó que el tejido animal está compuesto por unas unidades estructurales parecidas a las células¹⁷ de las plantas, lo que le hizo afirmar que «las partes elementales de todos los tejidos (vegetales o animales) están formadas por células». Fue otro alemán, el anatomista Otto Friedrich Karl Deiters, quien aisló tales células y observó que de ellas surgían dos tipos de filamentos: unos en forma de árbol con finas ramas, y otro más grueso y con muy pocas ramificaciones. De todos modos, la idea predominante en aquel tiempo era que el sistema nervioso formaba una red continua (un retículo) en la que no se distinguían elementos individuales.

En 1873, el médico italiano Camillo Golgi, firme partidario de la teoría reticular, inventó una técnica especial de tinción («la reacción negra») que impregnaba toda la célula nerviosa y producía así una imagen de ella más clara y contrastada¹⁸. El paso definitivo para el conocimiento de su

¹⁶En realidad, se halla en el hemisferio que sea el dominante para el habla en aquella persona. En general es el izquierdo, pero en algunas personas es el derecho.

¹⁷El término «célula» (del latín «*cellula*», pequeña celda) había sido introducido en el año 1665 por el científico y arquitecto inglés Robert Hooke, al observar al microscopio láminas de corcho cuya estructura le pareció similar a las celdas de una colmena.

¹⁸La reacción negra hace que las neuronas aparezcan en negro sobre un fondo amarillo anaranjado. Solo una fracción de ellas (menor del 10%) queda impregnada, pero las teñidas lo son en su práctica totalidad.

estructura real lo daría el neuroanatomista español Santiago Ramón y Cajal, quien aprovechó –y mejoró– la técnica de Golgi y la aplicó al estudio de todo tipo de tejido nervioso procedente de animales y de personas. Su innata habilidad artística le permitió reproducir precisos y detallados dibujos de cuanto veía a través del microscopio (unos dibujos que aún hoy día son utilizados).

Contrariamente a lo que defendía la teoría reticular, Cajal mostró que los filamentos que emergían del cuerpo celular no se mezclaban en una malla, sino que cada célula era una unidad independiente (autónoma), como las de cualquier otro tejido vivo. Sin embargo, su trabajo no fue reconocido (por razones geográficas y lingüísticas) hasta que lo presentó en el Congreso de la Sociedad Anatómica Alemana, celebrado en Berlín en 1889. A partir de ese momento, otros científicos refrendaron los resultados de Cajal y añadieron sus propias aportaciones, completando así la llamada «doctrina de la neurona», que puede resumirse diciendo que:

- La neurona (término sugerido en 1891 por el anatomista alemán

Wilhelm Waldeyer) es la unidad estructural y funcional del sistema nervioso. Cada neurona es una entidad autónoma que establece contacto con otras vecinas, pero no tiene continuidad con estas. Entre una y otra neurona existe un espacio intercelular que recibe el nombre de «sinapsis»¹⁹.

- La neurona consta de tres partes: las dendritas (nombre debido a William His), el axón (término acuñado por Rudolph Albert von Kolliker) y el soma (el cuerpo celular).
- La conducción nerviosa va de las dendritas a las arborizaciones del axón, pasando por el soma (y del axón a la siguiente neurona a través de la sinapsis).

El Premio Nobel de Medicina del año 1906 fue concedido conjuntamente a Golgi y a Cajal «en reconocimiento de su trabajo sobre la estructura del sistema nervioso», lo que no impidió que en la entrega del galardón se manifestaran las divergencias entre ambos. Golgi, en su conferencia de aceptación, defendió la teoría reticular a pesar de todas las evidencias en su contra, cosa que, según cuenta Cajal en su

autobiografía, «produjo un deplorable efecto en los asistentes».

Electricidad y química

Sabíamos, pues, que la actividad del sistema nervioso (central y periférico) se debe a la transmisión de impulsos a través de las neuronas, ¿pero cuál es la naturaleza de estos impulsos y cómo se propagan? Para averiguarlo, lo más adecuado era estudiar su circulación a lo largo del axón, lo que comportaba una dificultad importante: aunque los axones pueden ser muy largos (en el cuerpo humano, algunos axones del nervio ciático van desde la base de la médula espinal hasta los dedos de los pies), su diámetro es sumamente pequeño (en los mamíferos suele ser del orden de 1 a 20 micras²⁰). La solución a este problema la encontró el zoólogo inglés John Zachary Young, quien en 1934 descubrió que algunas especies de calamares tenían unos axones de hasta un milímetro de diámetro. Además, observó que tal grosor permitía una mayor velocidad de transmisión, necesaria para que el calamar escape de sus depredadores²¹.

El descubrimiento de Young permitió a los neurocientíficos británicos Alan

¹⁹ Del griego *synapsis* (unión de dos cosas).

²⁰ Una micra o micrómetro (símbolo μm) es la milésima parte de un milímetro.

²¹ El naturalista Leonard Worcester Williams había observado ya en 1909 un mayor tamaño de los axones de los cefalópodos, pero sin concretar su medida ni explicar su utilidad.

Hodgkin y Andrew Huxley idear y llevar a cabo un experimento para medir la diferencia de potencial entre el interior y el exterior del axón gigante. Publicaron sus primeros resultados en 1939, pero la Segunda Guerra Mundial interrumpió sus trabajos (y el laboratorio donde trabajaban quedó destruido por un bombardeo). Acabada la guerra, en 1946 reanudaron sus investigaciones, que culminaron en 1952 con la publicación del modelo matemático que describía el proceso mediante el cual los impulsos nerviosos se desplazan a lo largo de la membrana celular. Por tales resultados, a Hodgkin y Huxley les fue concedido el Premio Nobel de Medicina en 1963, que compartieron con el neurofisiólogo australiano John Eccles, a quien nos referiremos en las próximas líneas.

Conocíamos, pues, el mecanismo básico de transmisión del impulso nervioso en el interior de las neuronas, ¿pero cómo pasaba de una neurona a otra (o a un músculo o una glándula)? Desde mediados del siglo XIX se sabía que ciertas sustancias causaban efectos en el sistema nervioso, pero no fue hasta 1921 cuando un ingenioso experimento, realizado por el farmacólogo y fisiólogo Otto Loewi,

demostró que el propio sistema nervioso produce algunas de estas sustancias y las utiliza para enviar señales a los órganos. La idea del experimento se le ocurrió a Loewi en un sueño, y consistía en estimular el corazón de una rana mediante impulsos eléctricos para hacerle bombear un nutriente, y luego transferir este fluido a otro corazón, que empezó a actuar igual que el primero. Loewi recibió el Premio Nobel de Medicina en 1936 junto con el farmacólogo y fisiólogo inglés Henry Dale, quien amplió la comprensión del papel de la acetilcolina en la transmisión de los nervios a los órganos.

Aún quedaba por saber si también la comunicación entre neuronas seguía un mecanismo similar. John Eccles opinaba que la transmisión interneuronal en el interior del cerebro debía ser eléctrica, ya que la química es mucho más lenta, mientras que Dale defendía la idea contraria. Se inició un intenso y prolongado debate entre los partidarios de ambas teorías, que fue conocido como «la controversia entre la sopa y las chispas» (es decir, la química, liderada por Dale, y la eléctrica, liderada por Eccles), que se correspondía con los puntos de vista y los intereses gremiales de

neurofisiólogos y bioquímicos²². La controversia terminó cuando el propio Eccles comprobó que, al alcanzar la señal nerviosa el final del axón, este libera acetilcolina en el espacio sináptico, lo que provoca la apertura de los canales de sodio de la segunda neurona y genera un potencial de acción en ella (este es el trabajo por el que se le concedió el Premio Nobel). De todos modos, aunque la mayoría de las conexiones sinápticas del sistema nervioso humano son químicas, también existen sinapsis eléctricas en zonas donde se requiere mayor velocidad (p. ej., para sincronizar la acción de grupos de neuronas).

La acetilcolina fue el primer neurotransmisor conocido, descubierto en 1914 (los neurotransmisores son «mensajeros químicos» que transmiten los impulsos nerviosos a través de las sinapsis). En la actualidad conocemos unos 100 neurotransmisores con funciones variadas en la actividad corporal, el funcionamiento cerebral y la vida emocional. El descubrimiento de los neurotransmisores y de su funcionamiento ha revolucionado el mundo de la psicofarmacología y la psiquiatría, permitiendo la obtención de medicamentos para trastornos

²² Cabe decir que el debate entre Eccles y Dale, a pesar de su intensidad, tenía un carácter amistoso y constructivo, en pro de la ciencia, y ambos investigadores compartían el resultado de sus respectivos estudios.

diversos (p. ej., los populares inhibidores selectivos de la recaptación de serotonina [ISRS] para el tratamiento de la ansiedad y la depresión).

Imagenología

El descubrimiento en 1895 de los rayos X por el ingeniero y físico alemán Wilhelm Röntgen, premio Nobel de Física en 1901, abrió el camino a obtener un método que permitiera visualizar el cerebro de una persona, por ejemplo para conocer la ubicación de un tumor y poder proceder a su eliminación quirúrgica. El primer procedimiento que utilizó la nueva técnica para la inspección del cerebro fue la neumoencefalografía, introducida en 1919 por el neurocirujano estadounidense Walter Dandy y abandonada hacia 1970 por ser extremadamente dolorosa, causar efectos secundarios y presentar riesgos, incluso de muerte. En el año 1927, el médico y neurólogo portugués Egas Moniz ideó y desarrolló la angiografía, un método que permite visualizar radiológicamente los vasos sanguíneos mediante la inyección de un contraste.

Las imágenes obtenidas por medios radiográficos no permitían aislar una zona concreta del interior del cerebro, sino que esta se confundía con las que estaban delante y detrás de ella en la trayectoria de los rayos.

En 1930, el radiólogo italiano Alessandro Vallebona construyó el primer aparato que utilizaba la técnica actualmente conocida como tomografía (él la denominó estratigrafía), que hace que la fuente de rayos X y la película sensible giren simultáneamente en un círculo cuyo centro es la región que interesa examinar. De este modo, solo la zona de interés queda definida, y el resto aparecen difuminadas.

La disponibilidad de los primeros ordenadores electrónicos comerciales en 1951 abrió nuevas posibilidades para la técnica tomográfica. Hacia 1957, el físico sudafricano Allan M. Cormack desarrolló los métodos de cálculo que debían permitir obtener las imágenes de las distintas secciones del cuerpo, y durante la década siguiente el ingeniero inglés Godfrey Hounsfield diseñó y construyó el aparato que lo llevó a la práctica. Por estos logros les fue concedido conjuntamente el Premio Nobel de Medicina en 1979.

Aproximadamente al mismo tiempo que se desarrollaba la tomografía, surgió una nueva técnica que permitía obtener imágenes del cuerpo humano mediante la utilización de un principio descubierto en 1938 por el físico estadounidense de origen austrohúngaro Isidor Isaac Rabi, premio Nobel de Física en 1944: la resonancia magnética nuclear, un

fenómeno por el cual los núcleos de los átomos sometidos a campos magnéticos absorben y reemiten señales de radio. El físico estadounidense Raymond Damadian observó que el tejido canceroso y el normal tenían respuestas diferentes a la resonancia magnética, por lo que esta podía ser útil para el diagnóstico de los tumores. En 1977 realizó el primer escaneo de un cuerpo humano mediante esta técnica, que desde entonces sería conocida como imagenología por resonancia magnética, o IRM (se eliminó el adjetivo «nuclear» para evitar sus connotaciones).

Mientras las técnicas descritas hasta aquí producen imágenes de la estructura del cerebro, hay otras dos que permiten conocer la actividad en sus distintas zonas. La primera de ellas es la tomografía por emisión de positrones (más conocida por sus siglas en inglés: PET), que se basa en la detección de las emisiones producidas por una sustancia radiactiva de corta vida que se introduce en el organismo. La sustancia se acumula en las áreas más activas, que de este modo producen mayor radiación. Los primeros escáneres PET operaron en 1973. La segunda de las técnicas a la que nos referíamos es una variante de la IRM, la resonancia magnética funcional (RMf, o fMRI en inglés), introducida en 1993, que detecta la distribución de la intensidad del flujo sanguíneo.

Suele utilizarse para la investigación de los procesos mentales.

El camino hacia el futuro

A la continua mejora de las herramientas tecnológicas antes descritas, en las últimas décadas se han unido otras nuevas, como el nanoscopio y la optogenética. El nanoscopio es un microscopio que utiliza la fluorescencia de moléculas para superar la máxima resolución posible en los microscopios ópticos tradicionales, que es de 0,2 micras. De este modo es posible observar la interacción de las distintas moléculas en el interior de las células. El descubrimiento de esta técnica se debe a los estadounidenses Eric Betzig y William E. Moerner, y al alemán Stefan W. Hell, que por este motivo fueron galardonados

juntamente con el Premio Nobel de Química en 2014.

La optogenética es una técnica que combina la óptica y la genética para controlar y monitorizar la actividad de neuronas individuales de seres vivos, permitiendo incluso que estos puedan moverse libremente. Aunque se basa en ideas y trabajos de diversas personas, su descubrimiento se atribuye a los neurocientíficos Edward Boyden, Feng Zhang, Ernst Bamberg, Georg Nagel y Karl Deisseroth, quienes lo publicaron en el año 2005.

Todo ello ha coincidido (y probablemente ha propiciado) la puesta en marcha en diversas partes del mundo de cuatro proyectos de gran envergadura destinados al estudio del cerebro: el *Human Brain*

Project (en Europa), la *BRAIN Initiative* (en los Estados Unidos), el *Brain/MINDS* (en Japón) y el *China Brain Project* (en China). El objetivo de estos proyectos es alcanzar un conocimiento profundo de la estructura y el conexionado del cerebro, así como de su formación y desarrollo, con el fin de comprender los trastornos neurológicos para mejorar su tratamiento, y estudiar la relación del funcionamiento cerebral con el carácter y el comportamiento de la persona. Todo ello deberá proporcionarnos una nueva visión de lo que es el ser humano, tal vez con unas repercusiones que ahora no podemos imaginar. En el futuro, es posible que incluso Sheldon se vea obligado a admitir la importancia de la neurología y tenga que dar la razón definitivamente a Amy.

Más allá de la ciencia

– Howard: Si fueras un robot, y yo lo supiera y tú no, ¿querrías que te lo dijera?

– Sheldon: Depende. Cuando descubra que soy un robot, ¿podré asumirlo?

– Howard: Puede, aunque la historia de la ciencia ficción no está de tu parte.

(Temporada 1, Episodio 3)

No solo la ciencia ocupa las mentes de los protagonistas de *The Big Bang Theory*. Tienen muchas otras aficiones: la ciencia ficción, los superhéroes, los videojuegos, etc., que hace que sean calificados como *nerds*, una etiqueta que aceptan con orgullo. Esta autenticidad explica en gran parte la estima que la audiencia tiene hacia los personajes, comparta o no unas aficiones que son referenciadas de forma constante en la serie. Muchas de ellas tienen elementos que pueden ser analizados desde un punto de vista científico: en *Star Wars*, la legendaria nave de Han Solo es capaz de superar la velocidad de la luz, y los viajes en el tiempo son posibles en *Star Trek*, por mencionar dos de las ficciones que mayor pasión despiertan en nuestros

protagonistas y que más se citan (incluso con actores apareciendo como estrellas invitadas¹ o como personajes recurrentes²). En este último capítulo vamos a continuar tratando temas científicos, pero esta vez a través de estas ficciones que gustan tanto a Sheldon y compañía, así como a millones de espectadores.

Y es que sentimos una fascinación especial por las narraciones que nos permiten imaginar que superamos nuestras limitaciones y nos trasladamos a otros tiempos o a mundos remotos. ¿Pero son tales empeños un sueño inalcanzable, algo que nos está vedado por las leyes de la naturaleza? ¿O por el contrario cabe esperar que algún día sea posible viajar al pasado o al

futuro, y alcanzar los confines del universo? Analicémoslo a la luz de los conocimientos científicos actuales.

El espacio-tiempo

Intuitivamente, viajar en el tiempo nos parece algo muy distinto a hacerlo en el espacio. Nuestra experiencia nos muestra ambos conceptos como completamente distintos: mientras que gozamos de cierta libertad de movimientos en el espacio, nos vemos obligados a seguir el progreso constante del tiempo, sin ni siquiera poder alterar su velocidad. Solo tenemos a nuestra disposición el fugaz presente, mientras que el pasado es tan solo un conjunto de recuerdos que lentamente se desvanecen, y el futuro, meros propósitos que en su mayoría nunca se llevarán a cabo. Tal es la visión del tiempo conjugado, llamado así porque su estructura coincide con la de los tres tiempos verbales: presente, pasado y futuro³.

Sin embargo, desde la relatividad sabemos que el espacio y el tiempo que percibimos como escenarios estáticos constituyen realmente una

¹ Leonard Nimoy, George Takei, Brent Spiner y LeVar Burton, por parte de la franquicia *Star Trek*, y James Earl Jones (la voz de Darth Vader) por parte de *Star Wars*.

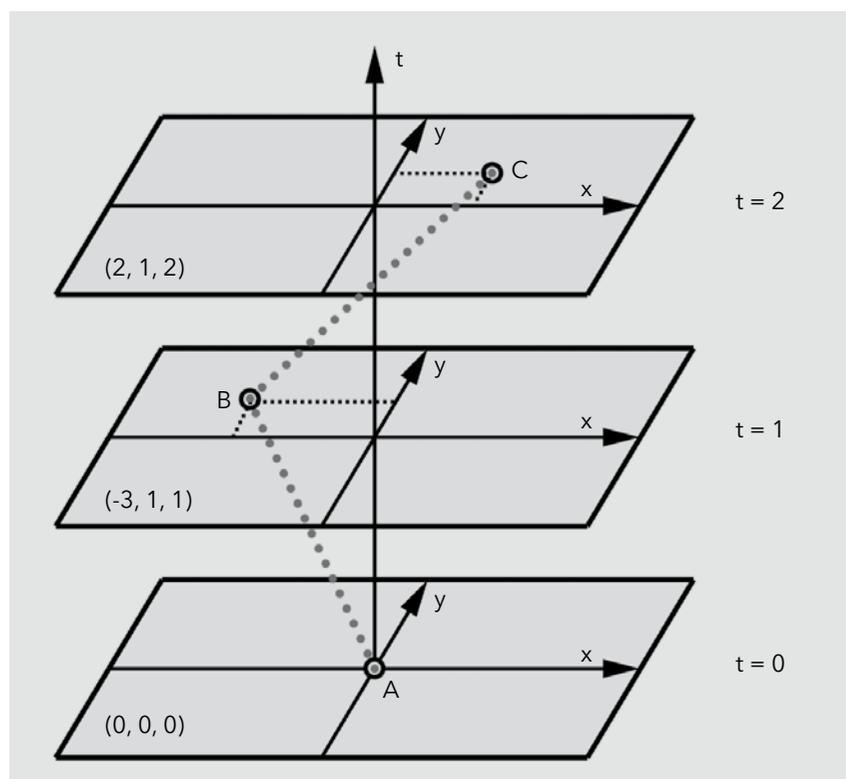
² Whil Wheaton, que hizo por primera vez de sí mismo en el quinto episodio de la tercera temporada y desde entonces ha participado en un total de 13 episodios de la serie.

única entidad modelada por los objetos que la ocupan, y relativa a cada uno de ellos. En este espacio-tiempo, un observador ve cada suceso en un punto definido por tres coordenadas espaciales (x , y y z) y una temporal (t), pero tales coordenadas serán distintas para otros observadores en diferentes sistemas de referencia. Así, puede suceder que dos sucesos A y B sean simultáneos para cierto observador, pero no para otros (o que para el primero A suceda antes que B, mientras que para el segundo sea a la inversa). Consecuentemente, no tiene sentido hablar del presente como un tiempo común a todos los observadores. Lo que es presente para unos puede ser pasado o futuro para otros.

Los conos de luz

Cualquier partícula, o por extensión cualquier objeto o cualquiera de nosotros, en cada momento está situado en un punto del espacio-tiempo que define su presente, aquello que le está sucediendo en ese momento (por ello, en física relativista a estos puntos se les denomina «sucesos»). El conjunto de puntos ocupados a lo largo del tiempo dibuja una trayectoria en el

Figura 1. Trayectoria espaciotemporal de una partícula que se mueve sobre una superficie horizontal.

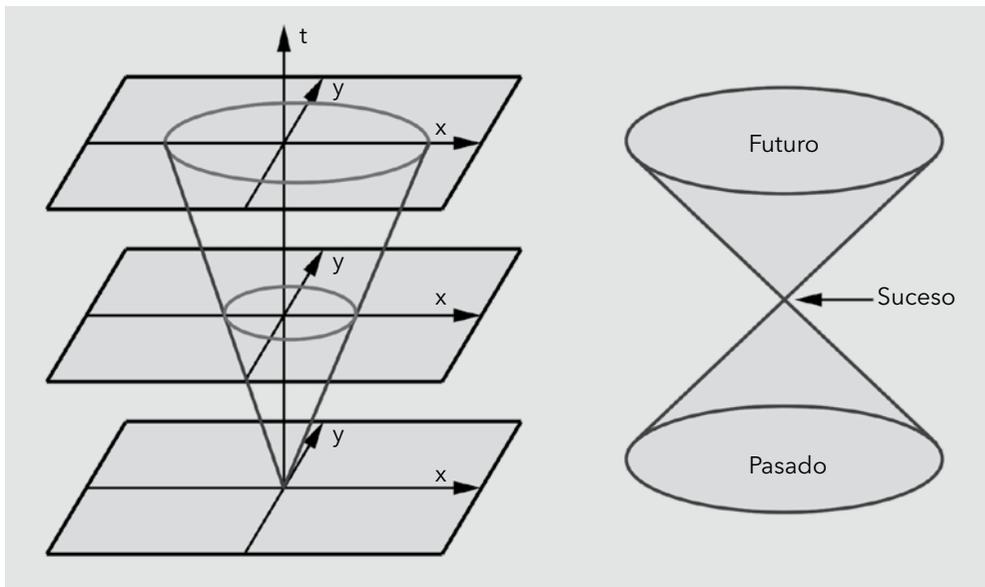


espacio-tiempo (una especie de mapa del recorrido). Como resulta difícil visualizar la trayectoria en un espacio de cuatro dimensiones, habitualmente se utiliza el recurso de eliminar una de las coordenadas espaciales, dejando solo x e y (horizontales), y añadiendo el tiempo t como coordenada vertical. Por

ejemplo, en la figura 1 vemos (de abajo arriba) la trayectoria espaciotemporal $A \rightarrow B \rightarrow C$ que sigue una partícula que se mueve sobre una superficie horizontal partiendo del centro de coordenadas $(0, 0)$, luego se desplaza tres unidades a la izquierda y una hacia adelante $(-3, 1)$, y

³El filósofo inglés John M.E. McTaggart publicó en 1908 un artículo titulado *La irrealidad del tiempo*, en el que consideraba dos distintas concepciones del tiempo: la serie A, que se corresponde con el tiempo conjugado, y la serie B, en la que simplemente hay un ordenamiento de los sucesos.

Figura 2. Conos de luz futuro y pasado (conjunto de puntos accesibles desde un suceso).



finalmente se mueve cinco unidades a la derecha para llegar a $(2, 1)^4$.

Este tipo de representación resulta útil porque nos permite visualizar la parte del espacio-tiempo accesible desde un suceso, o dicho de otra manera, qué sucesos espaciotemporales pueden influir o ser influidos desde determinado punto espaciotemporal. Para ello debemos tener en cuenta que la velocidad máxima posible es la de la luz, por lo que, partiendo de A, las posiciones alcanzables en $t = 1$ estarán contenidas en un círculo de

radio 299.792.458 m (el espacio recorrido por la luz en un segundo), y de radio doble en $t = 2$. Es lo que se representa en la parte izquierda de la figura 2. El cono que vemos, conocido como el «cono de luz futuro», contiene todas aquellas zonas del espacio-tiempo que pueden ser alcanzadas o afectadas por el suceso. En el cono simétrico (a la derecha), o «cono de luz pasado», se encuentran todos los sucesos que pueden afectar al suceso presente. Es decir, todo cuanto está fuera de los conos de luz es como si no existiera para el observador

situado en aquel punto (cada observador tiene su propio cono de luz que depende de su ubicación, de su velocidad y de la curvatura del espacio-tiempo en esa zona).

La flecha del tiempo

Aunque en las figuras anteriores las coordenadas espaciales están dibujadas en determinada dirección y sentido, la realidad es que en el espacio no hay ningún punto ni dirección preferente. No sucede lo mismo con el tiempo, que presenta una clara asimetría. Para cada observador, el tiempo transcurre en una sola dirección (la llamada «flecha del tiempo»), desde un punto de vista tanto subjetivo (recordamos el pasado, pero no el futuro) como físico (las causas preceden a los efectos, la entropía global aumenta, el colapso de la función de onda es irreversible, podemos encontrar evidencias del pasado pero no del futuro, las ondas electromagnéticas se expanden desde el punto de emisión pero no retornan a él).

Además, la fluencia del tiempo se produce de un modo regular, tanto desde el punto de vista subjetivo (si dejamos de lado variaciones en función del estado anímico) como

⁴Las coordenadas espaciotemporales de los puntos A, B y C se obtienen añadiendo como tercera coordenada la correspondiente al tiempo, con lo que obtenemos $A = (0, 0, 0)$, $B = (-3, 1, 1)$ y $C = (2, 1, 2)$.

también objetivamente mediante los relojes y otros procesos físicos. Tales ritmos, subjetivo y objetivo, son siempre los mismos en cualquier sistema de referencia, pero son vistos como distintos por observadores situados en otros sistemas. Vimos algunos ejemplos de ello en las secciones dedicadas a la relatividad especial y general. Estos ejemplos nos muestran un método efectivo para viajar en el tiempo, si bien solo hacia el futuro (es decir, respetando la flecha del tiempo). Dado que el tiempo se dilata cuando la velocidad o la gravedad son muy grandes, una manera de viajar al futuro es enviar una nave espacial tripulada a efectuar un recorrido de ida y vuelta a una velocidad próxima a la de la luz, o que pase cerca de un agujero negro (ambos retos quedan muy lejos todavía de nuestras capacidades tecnológicas). Según la velocidad alcanzada o la gravedad soportada, tras unos pocos años de viaje los pasajeros pueden regresar a la Tierra cientos o miles de años en el futuro.

El viaje al pasado

En las obras de ciencia ficción a menudo se presenta el viaje al pasado como un modo de cambiar el curso de la historia. La contradicción lógica que ello produce suele ejemplarizarse con la llamada «paradoja del abuelo», en la que una persona viaja al pasado y

mata a su abuelo antes de que pueda conocer a la que habría sido su abuela. Ello impedirá que el viajero nazca, por lo que no podrá viajar al pasado y matar a su abuelo, de modo que sí nacerá... y así sucesivamente.

En *The Big Bang Theory* hay un episodio en el que nuestros protagonistas compran una reproducción de la máquina para viajar en el tiempo de una de sus películas favoritas, un filme de los años 1960 que protagonizó Rod Taylor y que estaba basado en *La máquina del tiempo*, la novela de H.G. Wells. A pesar de que inicialmente están muy contentos con la adquisición, que Leonard consigue en una subasta *online*, más tarde este llega a la conclusión de que nunca conseguirá conquistar a una chica como Penny mientras siga haciendo cosas como comprar máquinas del tiempo. Desanimado y triste, reflexiona sentado en la máquina del tiempo cuando Sheldon le sorprende:

- Sheldon: ¿Por qué configuraste la máquina para viajar a anteaer?
- Leonard: Porque quiero regresar y evitar comprar una máquina del tiempo.
- Sheldon: No puedes, si fueras a evitarte comprarla en el pasado, no la tendrías disponible en el presente para viajar al pasado y evitarte comprarla, ergo aun la

tendrías. Es un clásico error de viajero en el tiempo novato.

- Leonard: ¿Puedo regresar y evitarte explicármelo?
- Sheldon: Misma paradoja. Si fueras a viajar en el tiempo y, digamos, dejarme inconsciente, no tendrías la conversación que te irritó, motivándote a regresar y dejarme inconsciente.
- Leonard: ¿Y qué sucede si te dejo inconsciente ahora?
- Sheldon: No cambiaría el pasado.
- Leonard: Pero haría el presente mucho más agradable.

Los dos personajes siguen hablando, y Sheldon le demuestra que la tesis que lo ha llevado a desear no tener la máquina del tiempo no es válida, ya que la adquisición de la máquina no tiene relación directa con el hecho de que Leonard no consiga conquistar a Penny. En cambio, Leonard insiste en que debe cambiar sus aficiones para poder gustar a Penny. Para Sheldon (y el tiempo le dará la razón) esto no es necesario. Pero volvamos ahora a la cuestión de las paradojas.

En algunas obras de ciencia ficción se intenta evitar la paradoja temporal haciendo que los viajeros sean solo observadores o evitando que efectúen cambios importantes en el pasado (este es uno de los problemas que tiene Marty McFly en la trilogía *Regreso al futuro*), pero el efecto mariposa nos muestra que

incluso ínfimos cambios pueden causar con el paso del tiempo grandes alteraciones, como reflejan algunas historias del género, por ejemplo el cuento *El ruido de un trueno*, del escritor estadounidense Ray Bradbury, en el que los viajeros en el tiempo adoptan medidas para no alterar el pasado, pero accidentalmente uno de ellos aplasta con su bota una mariposa y al regresar al presente descubren que este ha cambiado significativamente)⁵.

La teoría de los universos paralelos, que vimos en el capítulo sobre el gato de Schrödinger, ofrece una posible solución a la paradoja del abuelo (y otras relacionadas), ya que, según esta interpretación de la mecánica cuántica, cuando el viajero mata a su abuelo lo que hace es crear una nueva rama temporal en la que él no llega a nacer, paralela al universo en el que sí existe (en realidad, la división se produciría ya en el mismo momento en que el viajero llegara al pasado).

En ciencia ficción los viajes en el tiempo son posibles generalmente gracias a artefactos de diversos

tipos: cabinas telefónicas en *Doctor Who*, automóviles en *Regreso al futuro*, una rueda congelada en *Perdidos*, giroscopios en *Terminator*, etc. Estas máquinas suelen estar diseñadas para transportar al viajero (con o sin la máquina, según el caso) a determinada fecha, pero suelen obviar un problema. La Tierra gira de modo continuo sobre sí misma y alrededor del Sol, que a su vez sigue la rotación de la Vía Láctea, la cual también se desplaza con respecto al promedio de otras galaxias cercanas. Por tanto, si la máquina de tiempo envía al viajero a otro tiempo, pero en el mismo lugar del espacio, aquel acabará en el vacío sideral. Para evitarlo, la máquina debería calcular con total precisión las coordenadas espaciales del punto de la Tierra en el momento exacto de destino.

Incluso así, existe otro problema. Parece razonable pensar que el desplazamiento espaciotemporal, como cualquier desplazamiento, se producirá de modo continuo, es decir, las coordenadas espaciotemporales variarán de modo progresivo de la posición

inicial a la final (dicho de otra manera, el viajero no se desmaterializará repentinamente en un lugar para materializarse instantáneamente en otro). Ello implica que, aunque el desplazamiento sea muy rápido, en los yoctosegundos⁶ iniciales el viajero compartirá parcialmente la ubicación que ocupaba antes de partir, por lo que se producirá una violenta colisión consigo mismo que le destruirá.

Paradojas al margen, una idea que en ocasiones se propone como una posible manera de viajar al pasado es superar la velocidad de la luz. Una manera intuitiva de verlo es la siguiente. Cuando voy a pie o en coche, mi velocidad no es muy distinta de la del resto de las personas, por lo que no me veo afectado apreciablemente por el efecto relativista de la dilatación del tiempo. Una hora de mi vida se corresponde con una hora de la vida del resto de las personas. Si voy en avión, la dilatación temporal que experimento ya podría ser medida con un reloj atómico, pero resulta todavía insignificante. Si

⁵El cuento de Bradbury fue publicado en 1952, dos décadas antes de que el matemático y meteorólogo estadounidense, pionero de la teoría del caos, Edward Lorenz, popularizara el concepto «efecto mariposa» en su conferencia *Predictability: Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?* (Previsibilidad: ¿Puede el aleteo de una mariposa en Brasil provocar un tornado en Texas?).

⁶Un yoctosegundo es un cuatrillonésimo de segundo (10^{-24} s). Otros prefijos del Sistema Internacional para cantidades muy pequeñas son nano (10^{-9}), pico (10^{-12}), femto (10^{-15}), atto (10^{-18}) y zepto (10^{-21}).

podiera viajar en una nave espacial a 0,866 veces la velocidad de la luz, cada día en la nave se correspondería con 2 días en la Tierra, y a medida que la velocidad de la nave se acercara a la de la luz, mi tiempo transcurriría cada vez más lentamente, hasta el punto de que si pudiera alcanzar la velocidad de la luz mi tiempo se detendría (como sucede a los fotones). Entonces, si la «velocidad» de mi tiempo ha ido disminuyendo a medida que aumentaba la velocidad de la nave, hasta llegar a cero, ¿qué cabría esperar si la nave superara la velocidad de la luz? Que mi tiempo pasara a ser negativo, es decir, que yo empezaría a viajar hacia atrás en el tiempo.

Por ahora tal idea está más cerca de la ficción que de la ciencia, y la idea generalizada entre los científicos es que la velocidad de la luz es un límite que es imposible superar. A pesar de ello, en 1967 el físico Gerald Feinberg propuso la existencia de los taquiones, unas partículas hipotéticas más rápidas que la luz. Tales partículas deberían permitir enviar información al pasado, pero su existencia no ha sido nunca detectada.

La navegación espacial

Desde que el 12 de abril de 1961 el cosmonauta ruso (soviético) Yuri Gagarin se convirtiera en el primer humano en orbitar la Tierra, los viajes espaciales tripulados han ido siendo algo habitual, hasta el punto de que la estación espacial internacional ya lleva ocupada permanentemente más de 16 años⁷. De hecho, *The Big Bang Theory* ha tenido a uno de sus personajes en el espacio a través de la trama de Howard Wolowitz, que formó parte en la ficción de la Expedición 31 de la Estación Espacial Internacional acompañado de un astronauta real, Mike Massimino⁸. Aunque la experiencia es retratada como desastrosa para el personaje, que es víctima de bromas pesadas de sus compañeros y siente como si regresara a sus años de instituto en el espacio, a su regreso irá recordando constantemente a los demás que él es el único que ha viajado en el espacio⁹, cosa que dice mucho de la mística heroica que envuelve en nuestra cultura a la figura del astronauta.

Hay personas que están dispuestas a pagar grandes cantidades de dinero por formar parte de esta mística, lo que explica que, entre 2001 y 2009, hubo siete personas que pagaron

entre 20 y 30 millones de dólares para ser turistas espaciales de la compañía privada (Space Adventures) que los envió en diversos vuelos orbitales. Parece que viajar al espacio pueda estar al alcance de todos y que los viajes a otros astros son tan solo cuestión de ampliar la capacidad y la potencia de las naves utilizadas, pero la realidad no es tan simple. Antes que nada, conviene que repasemos unos conceptos básicos de mecánica aplicada a la navegación espacial:

- Un objeto no sometido a ninguna fuerza externa continuará indefinidamente en su estado de reposo o movimiento. Es decir, si una nave está situada en una zona del espacio alejada de perturbaciones gravitatorias, continuará moviéndose a la misma velocidad sin que sea necesario ningún tipo de propulsión. Ello contrasta con lo que sucede en la Tierra, donde los vehículos necesitan el funcionamiento constante de un motor para mantener su velocidad, debido a que el rozamiento con el aire y con el suelo genera una fuerza que los frena.
- Si aplicamos una fuerza F a un cuerpo de masa m , este experimenta una aceleración a

⁷En el momento de redactar este texto (junio de 2017).

⁸Temporada 5, episodio 24.

⁹Temporada 6, episodio 5.

directamente proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a su masa, según la fórmula

$$a = \frac{F}{m}.$$

- Dos cuerpos de masas m_1 y m_2 separados por una distancia r experimentan una atracción mutua F que viene dada por la fórmula

$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

en la que G es la constante de gravitación universal. Esto es lo que genera los campos gravitatorios alrededor de los astros. En el caso de la Tierra, un objeto en su superficie a nivel del mar (en el vacío, para evitar el rozamiento del aire) caerá con una aceleración constante de $9,81 \text{ m/s}^2$.

- Un cuerpo que gira con una velocidad v alrededor de un punto (p. ej., una bola de masa m sujeta a uno de los extremos de una cuerda de longitud r cuyo otro extremo se mantiene fijo) experimenta una fuerza centrípeta F (que tira de la cuerda) que viene dada por la fórmula

$$F = \frac{mv^2}{r}.$$

- En un satélite u otro objeto que gire alrededor de la Tierra en una órbita circular estable, ambas fuerzas (la atracción gravitatoria y la fuerza centrípeta) se contrarrestan, lo que nos permite igualar las dos fórmulas y ver que el radio r de la órbita y la velocidad v de desplazamiento están ligados por la ecuación

$$v = \sqrt{\frac{G \times M}{r}},$$

siendo M la masa de la Tierra ($5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$). A cada radio le corresponde una determinada velocidad. Por ejemplo, los satélites geoestacionarios (que giran a la misma velocidad angular que la Tierra, por lo que desde la superficie terrestre los vemos como si estuvieran inmóviles¹⁰) deben hallarse todos a una altura de 35.786 km sobre el nivel del mar (que corresponde a un radio orbital de 42.164 km).

- Para llevar una nave espacial a su órbita es necesario, pues, por una parte, elevarla hasta la altura correspondiente venciendo la fuerza de la gravedad, y por otra proporcionarle la velocidad

tangencial que requiere la órbita de aquella altura (en la práctica, ambas operaciones se combinan produciendo una inclinación progresiva para minimizar el combustible necesario). La energía necesaria será la suma de ambos trabajos¹¹ y se expresa, de modo aproximado, por la fórmula que el ruso-soviético Konstantin Tsiolkovsky, pionero de la teoría astronáutica, desarrolló en 1897 para los cohetes:

$$\delta v = v_e \ln\left(\frac{m_0}{m_1}\right),$$

siendo δv el incremento de velocidad alcanzado, v_e la velocidad de expulsión de los gases (que depende del tipo de propulsor químico utilizado), y m_0 y m_1 las masas inicial y final del cohete (la masa final corresponde a la carga útil que llegará a destino, mientras que la masa inicial en su mayor parte corresponde al combustible necesario para el viaje).

- Una vez que la nave se halla en su órbita, no requiere más combustible que el necesario para eventuales ajustes en la trayectoria

¹⁰Ello resulta útil para la transmisión de televisión directa a los hogares (satélites Astra, Intelsat y otros), ya que basta una antena parabólica orientada de modo fijo al punto del espacio en el que está el satélite cuya señal deseamos captar.

¹¹Las órbitas más usadas suelen estar a unos 640 km de la superficie terrestre, que corresponden a una velocidad orbital de unos $7,5 \text{ km/s}$. Dado que la Tierra gira sobre sí misma con una velocidad tangencial de 466 m/s en el ecuador, para aprovechar esta velocidad y disminuir así el combustible necesario generalmente se producen los lanzamientos en dirección al este y desde una zona no demasiado alejada del ecuador.

o para compensar la fricción de las capas altas de la atmósfera.

Si en la fórmula de Tsiolkovsky despejamos la masa inicial, obtenemos

$$m_0 = m_f e^{\frac{\Delta v}{v_e}},$$

es decir, el combustible necesario es proporcional a la masa de la carga útil m_f , pero crece de modo exponencial con los incrementos de velocidad Δv necesarios para la trayectoria deseada. Ello nos plantea el primero de los dos grandes problemas a los que debemos enfrentarnos si queremos realizar viajes espaciales de larga distancia: el coste. Por ejemplo, actualmente, para enviar tres astronautas a la estación espacial internacional que orbita la Tierra se usan cohetes Soyuz de 175 t (toneladas), pero para enviar el mismo número de personas a la Luna fue necesario el Saturno V, de 2.800 t (16 veces más). Resulta, pues, necesario determinar para cada viaje la trayectoria que minimice el consumo de combustible. Las dos técnicas más utilizadas para los viajes interplanetarios son las órbitas de transferencia de Hohmann y la asistencia gravitacional (u honda gravitacional).

Una órbita de transferencia de Hohmann es una órbita elíptica

cuyos vértices pasan tangencialmente por las órbitas del planeta de origen y el de destino, y tiene la propiedad de que es la trayectoria que requiere la mínima energía para ir de uno a otro planeta (únicamente el impulso inicial necesario para pasar de la órbita terrestre a la de transferencia, y otro al final para dejar esta y entrar en la órbita del planeta de destino). Evidentemente, debe calcularse el momento de partida de manera que el planeta de destino se encuentre en la posición adecuada para coincidir con la llegada de la nave. La figura 3 lo explica de un modo gráfico.

La maniobra conocida como asistencia gravitacional (u honda gravitacional) aprovecha la atracción gravitatoria de un cuerpo celeste para variar la dirección y la velocidad de una nave. Fue ideada en 1962 por el matemático estadounidense Michael Minovitch, que entonces era estudiante de la Universidad de California, en Los Ángeles. El mejor ejemplo de aplicación de esta técnica es el viaje de las dos naves Voyager, lanzadas ambas en 1977, aprovechando determinada posición planetaria, y que actualmente prosiguen su viaje más allá del sistema solar (la Voyager 1 está actualmente¹² a más de 21.000

Figura 3. Órbita de transferencia de Hohmann entre la Tierra y Marte.

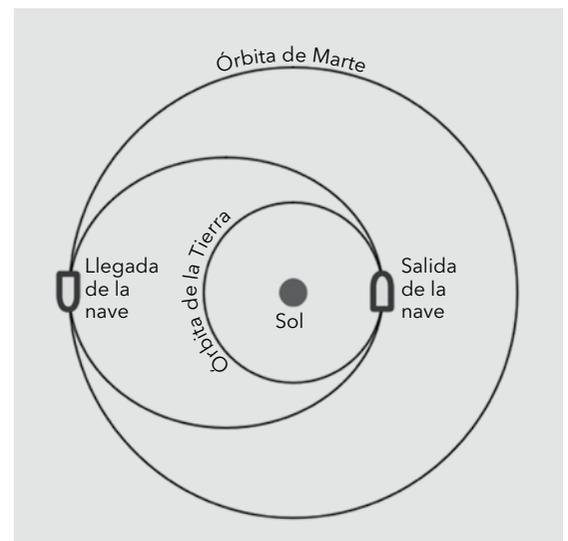
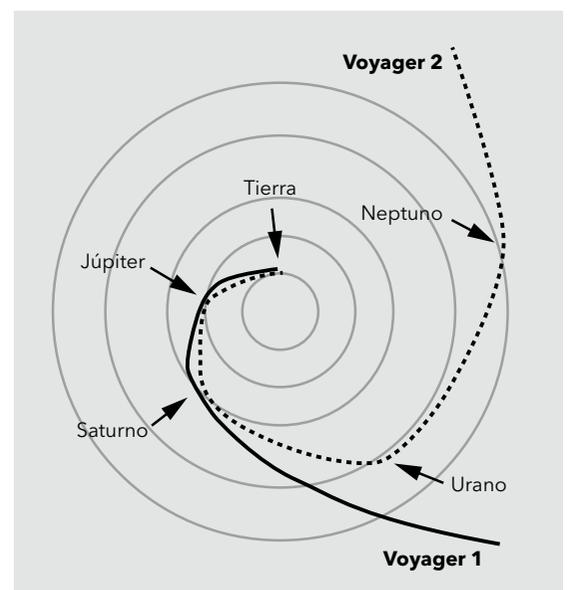


Figura 4. Asistencia gravitatoria usada por las naves Voyager 1 y Voyager 2.



¹²En el momento de redactar este texto (junio de 2017).

millones de km del Sol, y la Voyager 2 a unos 17.000 millones de km, mientras que Neptuno, el planeta más alejado, está a una distancia media de solo 4500 millones de km). La figura 4 muestra la trayectoria de ambas naves y cómo aprovecharon su paso cerca de Júpiter, Saturno y, en el caso de la Voyager 2, también Urano y Neptuno.

Aunque el viaje de las naves Voyager se inició hace 40 años, no han recorrido siquiera la milésima parte de la distancia a la que se encuentra la estrella más cercana a la Tierra (Proxima Centauri, a 4,2 años luz), lo que nos conduce al segundo de los problemas a que nos referíamos: el tiempo necesario para llegar a otros sistemas estelares (nuestra galaxia, la Vía Láctea, tiene un diámetro de unos 100.000 años luz, y otras galaxias se hallan a millones de años luz). Aun suponiendo que dispusiéramos de la capacidad técnica y económica para construir una nave que pudiera llevar a un grupo de astronautas y mantenerlos con vida, un viaje de miles de años no parece una idea muy atractiva para los pasajeros ni para el resto de la humanidad.

La primera solución aparente es el aumento de la velocidad de la nave.

Supongamos que deseamos enviar una expedición al sistema planetario de la estrella TRAPPIST-1, situada a unos 39 años luz en la constelación de Acuario, que contiene algunos planetas con características similares a las de la Tierra, con vistas a su posible colonización. Para reducir el tiempo del trayecto, la mayoría del viaje se realiza a una velocidad del 87% de la de la luz (alcanzada tras 300 días de aceleración a 1 G)¹³, con lo que el recorrido dura unos 46 años terrestres (debido al efecto relativista, para los navegantes y los relojes de la nave solo transcurren 23 años). Aun así, los primeros resultados de la expedición no llegarían a la Tierra hasta 85 años después del lanzamiento (46 años de viaje de la nave más 39 años de las señales de radio con los informes).

Agujeros de gusano

Según lo que llevamos visto en este capítulo, parecería que nuestras posibilidades de viajar por el espacio están limitadas a pequeñas excursiones por nuestro entorno inmediato. Sin embargo, olvidamos que el espacio-tiempo no es el escenario estático y uniforme que percibimos con nuestros sentidos, sino algo muy distinto. Es disculpable caer en este error, ya

que incluso el mismo Einstein escribió en su autobiografía: «¿Por qué fueron necesarios 7 años para construir la relatividad general? La razón principal radica en el hecho de que no resulta fácil librarse de la idea de que las coordenadas deben tener un significado métrico inmediato». Es decir, las coordenadas espaciotemporales no determinan directamente las distancias entre dos puntos.

Las ecuaciones de la relatividad general publicadas por Einstein en 1915 establecen relaciones (ecuaciones en derivadas parciales) entre la curvatura del espacio-tiempo y la masa y la energía que en él se encuentran, así como la variación de estos valores. Tales ecuaciones permiten diversas soluciones que muestran tipos de fenómenos que pueden producirse en el espacio-tiempo. La primera de estas soluciones fue descubierta aquel mismo año por el alemán Karl Schwarzschild, y describía la geometría espaciotemporal en la proximidad de una masa (tal solución constituiría la base de los agujeros negros). Al año siguiente, el austriaco Ludwig Flamm, basándose en el trabajo de Schwarzschild, desarrolló otra solución simétrica a la anterior (un agujero blanco) y posibilitaba cierto tipo de conexión entre estas

¹³ La aceleración a 1 G tiene la ventaja adicional de que genera en el interior de la nave un efecto similar al de la gravedad terrestre.

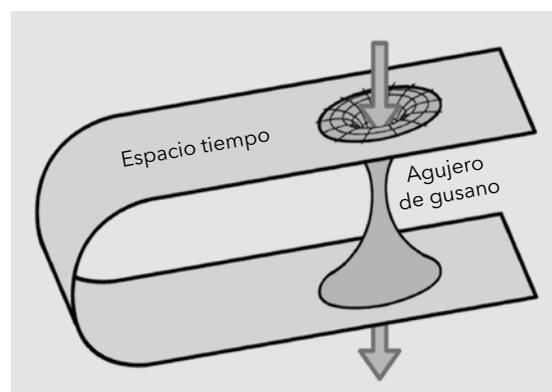
dos singularidades, pero su trabajo pasó desapercibido.

En el capítulo dedicado al gato de Schrödinger vimos que Einstein no creía que la interpretación de Copenhague para la mecánica cuántica fuera la correcta, especialmente en lo relativo a la acción a distancia entre partículas entrelazadas, y que trabajó con Nathan Rosen para explicarla por otras vías. En un artículo de 1935 firmado por ambos¹⁴ propusieron que un sistema de muchas partículas puede ser representado por una solución de las ecuaciones relativistas que corresponde a dos láminas idénticas unidas mediante puentes (atajos entre dos puntos del espacio tiempo). Fue John Archibald Wheeler quien en 1957 introdujo el término «agujero de gusano» para denominar a estos hipotéticos túneles (fig. 5), y los físicos Michael Morris, Kip Thorne y Ulvi Yurtsever quienes en 1987 publicaron dos artículos en los que proponían su utilización para desplazamientos a grandes distancias, e incluso viajes en el tiempo.

Cuando Howard y Raj descubren que Sheldon tiene un proyecto secreto que realiza en una pequeña habitación, deciden espiarlo a través

de una cámara. Así es como descubren que Sheldon ha logrado crear un agujero de gusano: lo ven abriendo el agujero y echando un vistazo a su interior para luego ser atacado por un alienígena. En realidad, se trata de una broma de Sheldon que, celoso de su intimidad, ha cambiado la fuente del vídeo de la cámara para realizar esta broma¹⁵. Y es que, aunque los agujeros de gusano han sido utilizados en muchas obras de ciencia ficción, incluso en el caso de que correspondan a una posibilidad real, las dificultades que comporta su utilización parecen insuperables. El principal problema es que un agujero de gusano es extremadamente inestable y se colapsa en menos tiempo del que necesita un rayo de luz para atravesarlo. También la introducción de una ínfima cantidad de materia bastaría para destruirlo, lo que imposibilita su uso para el viaje espacial. Se ha planteado que una posible solución a estos problemas sería el uso de ingentes cantidades de materia exótica con energía negativa (ambos son conceptos teóricos cuya existencia real no se ha demostrado). Incluso solucionando estos problemas, hay que tener en cuenta las extraordinarias fuerzas a las que estarían sometidos los viajeros.

Figura 5. Desplazamiento a través del espacio tiempo en un agujero de gusano.



Superhéroes

En general, las obras de ciencia ficción suelen revestir sus elementos fantásticos con una capa de ciencia real que provoca en sus destinatarios la sensación de estar asistiendo a algo que, si bien no es real en el momento actual, puede llegar a serlo en un futuro más o menos lejano. Por el contrario, los poderes de los superhéroes (aunque a veces sean considerados también como ciencia ficción) son fantasías alejadas de las leyes de la naturaleza. El autor y crítico estadounidense Orson Scott Card lo expresó así¹⁶: «La ciencia ficción trata de lo que podría ser, pero no es; la fantasía trata de lo que no puede ser». Hablar de la ciencia de los superhéroes es, pues, exponer

¹⁴The particle problem in the General Theory of Relativity.

¹⁵Temporada 6, episodio 8.

las incongruencias a las que nos conducen sus superpoderes.

Flash

El personaje de Flash pertenece a ese grupo de superhéroes que originalmente era una persona con unas características normales y en un determinado momento, por una circunstancia accidental, adquiere una capacidad extraordinaria, en este caso la de moverse a elevadas velocidades. En los cómics, tal capacidad es atribuida a una «fuerza de la velocidad», un concepto algo confuso que vendría a ser un campo de fuerza extradimensional al cual solo algunos superhéroes tienen acceso. En realidad, la fuerza de la velocidad es un intento de explicar las evidentes contradicciones que se producen al presentar a un humano viajando a las velocidades de Flash.

Veamos un ejemplo que se reproduce con variaciones en diversos lugares del cómic. Un ciclista es atropellado por un vehículo y lanzado al aire. Flash, que en el instante del impacto se halla a unos 100 metros de distancia, se dirige a toda velocidad al lugar del accidente y atrapa al ciclista en el aire para dejarlo en lugar seguro. Incluso aceptando el superpoder de Flash, ¿podría realizar tal hazaña?

El tiempo máximo de que dispone Flash para ello es del orden de unas tres décimas de segundo, y en este tiempo debe recorrer los 100 m acelerando de modo continuo. La fórmula del movimiento acelerado nos dice que

$$e = \frac{1}{2} a \times t^2,$$

y por tanto la aceleración necesaria es

$$a = \frac{2e}{t^2} = \frac{2 \times 100}{0,3^2} \cong 2200 \frac{m}{s^2}.$$

Supongamos que Flash lleva un excelente calzado con suela de goma adherente, que presenta un coeficiente de rozamiento con el suelo de valor 1, por lo que puede proporcionar una fuerza de agarre aproximada de

$$Fr = \mu \cdot m \cdot g = 1 \cdot 100 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cong 1000 \text{ N}.$$

Esta fuerza será la máxima que podrá imprimir Flash, pues, de superarla, sus zapatillas simplemente resbalarían, lo que determinará la aceleración máxima que puede alcanzar:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1000 \text{ N}}{100 \text{ kg}} = 10 \frac{m}{s^2},$$

que es 220 veces inferior a la requerida para salvar al ciclista.

No acaba ahí la cosa. La velocidad final de Flash cuando alcanza al ciclista es:

$$v = a \cdot t = 2200 \frac{m}{s^2} \cdot 0,3 \text{ s} = 660 \frac{m}{s} \cong 2400 \frac{km}{h},$$

y por tanto el impacto que el ciclista recibirá será unas 40 veces más fuerte que el golpe con el vehículo. El propio Flash no saldrá mejor parado. Durante las tres décimas de segundo, su organismo está sometido a una aceleración de $2200 \text{ m/s}^2 \cong 220 \text{ G}$, y ningún cuerpo humano puede resistir una aceleración superior a 80G, ni que sea por un tiempo tan breve como este. Flash podría evitar la brutalidad del choque con el ciclista dividiendo su recorrido en dos partes, acelerando en la primera mitad y frenando en la segunda, a fin de que en el momento del contacto su velocidad fuera cero. Sin embargo, ello doblaría la aceleración necesaria (y el posterior frenado). Además, al superar los 1230 km/h Flash generaría una explosión sónica.

Habría también otros aspectos que tener en cuenta si una persona se desplazara a tal velocidad. Por ejemplo, si una pieza de la bicicleta ha salido disparada en el accidente y Flash choca con ella a 2400 km/h, el impacto podría ser fatal. Además, la rapidez de reacción que se necesita para esquivar los

¹⁶ En su libro *How to write Science Fiction and Fantasy* (Cómo escribir ciencia ficción y fantasía).

obstáculos y llegar al punto justo está por encima de la velocidad de transmisión de los impulsos nerviosos en el organismo humano. Ello hizo que la idea de la fuerza de la velocidad se fuera modificando a lo largo de los años para intentar explicar este y otros aspectos. Así, la fuerza no solo proporciona velocidad, sino también unos reflejos extraordinarios (Flash puede tomar decisiones en una fracción infinitesimal de segundo); también crea un aura que protege al superhéroe del mundo exterior (aura que se extiende a la persona a la que está ayudando), rápida recuperación de las heridas y muchas otras características.

Probablemente la mayor velocidad alcanzada por Flash se produjo cuando salvó a 532.000 personas en Corea del Norte. Según cuenta el cómic en tres viñetas, a las 13:57 h una cabeza nuclear explotó en la ciudad de Chongjin, pero sus 532.000 habitantes aparecieron, sanos y salvos, una cienmilésima de microsegundo más tarde en lo alto de una colina a más de 50 km del lugar de la explosión. Flash los había llevado allí, de uno en uno y a veces de dos en dos, con su supervelocidad.

Esto representa unos 350.000 viajes de ida y vuelta de unos 110 km cada uno, con un total de 38.500.000 km completados en 10^{-11} s. Incluso suponiendo una aceleración infinita

(es decir, que Flash adquiere su velocidad máxima instantáneamente), obtenemos una velocidad de $3,85 \times 10^{18}$ km/s, que equivale a 13 billones de veces la velocidad de la luz.

Por supuesto, los protagonistas de *The Big Bang Theory* son perfectamente conscientes de que las habilidades de sus superhéroes favoritos son en su mayoría imposibles desde un punto de vista científico. Pero como son su válvula de escape, un entretenimiento con el que disfrutan y se lo pasan en grande, no les exigen un gran rigor en este sentido. Podríamos decir que, en el momento en que miramos a los superhéroes de esta manera, los que fallamos somos nosotros. Hay ámbitos en los que hay que dar rienda suelta a la fantasía y disfrutar de las historias tal como son.

De todos modos, Sheldon, Leonard, Howard y Raj a menudo se enzarzan en divertidas discusiones en las que hablan de los superhéroes en términos científicos, uniendo así sus dos pasiones. Un análisis parecido al que nosotros hemos hecho sobre la velocidad de Flash ellos lo hicieron sobre las habilidades de Supermán:

– Leonard: Si no tienes otros planes, ¿quieres venir con nosotros... a una maratón de comida Thai y películas de Supermán?

– Penny: ¿Una maratón? ¿Cuántas películas de Supermán hay?

– Sheldon: Estás bromeando, ¿verdad?

– Penny: Me gusta esa en que Lois Lane cae del helicóptero y Supermán vuela y la atrapa. ¿Cuál era esa?

– Sheldon, Leonard y Howard (a la vez): La uno.

– Sheldon: ¿Te das cuenta de que esa escena está plagada de inexactitudes científicas?

– Penny: Sí, ya sé que los hombres no vuelan.

– Sheldon: No. Supongamos que pudieran. Lois Lane está cayendo con un índice de aceleración de 10 metros por segundo, cada segundo. Supermán vuela hacia ella para salvarla extendiendo sus dos brazos de acero. La Srta. Lane, que está cayendo aproximadamente a 200 km por hora, choca con ellos y es inmediatamente cortada en tres partes iguales.

– Leonard: A no ser que Supermán se ajuste a su velocidad y desacelere.

– Sheldon: ¿En qué espacio, señor? Ella está a 60 cm del suelo. Francamente, si él la amara, la habría dejado estrellarse en el pavimento. Habría sido una muerte más piadosa.

- Leonard: Perdóname, pero todo tu argumento se apoya en el supuesto de que el vuelo de Superman es una proeza de fuerza.
- Sheldon: ¿Te estás oyendo? Está claramente establecido que su vuelo es una proeza de fuerza. Es una extensión de su capacidad para saltar grandes edificios, una capacidad que obtuvo de la exposición al sol amarillo de la Tierra.
- Howard: ¿Y cómo vuela de noche?
- Sheldon: Por una combinación de la reflexión solar de la Luna y la capacidad de las células cutáneas kryptonianas para almacenar energía.
- Penny: Me voy a duchar.
- Leonard: Tengo aquí 2600 cómics de Superman. Te desafío a encontrar una sola referencia a las células cutáneas kryptonianas.
- Sheldon: Desafío aceptado.¹⁷

¹⁷Temporada 1, episodio 2.

Cuadernos de la Fundación Dr. Antoni Esteve

Puede solicitar los cuadernos a través de www.esteve.org.

1. Guardiola E, Baños JE. Eponimia mèdica catalana. Quaderns de la Fundació Dr. Antoni Esteve, N° 1. Barcelona: Prous Science; 2003.
2. Debates sobre periodismo científico. A propósito de la secuenciación del genoma humano: interacción de ciencia y periodismo. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 2. Barcelona: Prous Science; 2004.
3. Palomo L, Pastor R, coord. Terapias no farmacológicas en atención primaria. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 3. Barcelona: Prous Science; 2004.
4. Debates sobre periodismo científico. En torno a la cobertura científica del SARS. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 4. Barcelona: Prous Science; 2006.
5. Cantillon P, Hutchinson L, Wood D, coord. Aprendizaje y docencia en medicina. Traducción al español de una serie publicada en el British Medical Journal. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 5. Barcelona: Prous Science; 2006.
6. Bertomeu Sánchez JR, Nieto-Galán A, coord. Entre la ciencia y el crimen: Mateu Orfila y la toxicología en el siglo XIX. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 6. Barcelona: Prous Science; 2006.
7. De Semir V, Morales P, coord. Jornada sobre periodismo biomédico. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 7. Barcelona: Prous Science; 2006.
8. Blanch LI, Gómez de la Cámara A, coord. Jornada sobre investigación en el ámbito clínico. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 8. Barcelona: Prous Science; 2006.
9. Mabrouki K, Bosch F, coord. Redacción científica en biomedicina: Lo que hay que saber. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 9. Barcelona: Prous Science; 2007.
10. Algorta J, Loza M, Luque A, coord. Reflexiones sobre la formación en investigación y desarrollo de medicamentos. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 10. Barcelona: Prous Science; 2007.
11. La ciencia en los medios de comunicación. 25 años de contribuciones de Vladimir de Semir. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 11. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2007.
12. Debates sobre periodismo científico. Expectativas y desencantos acerca de la clonación terapéutica. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 12. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2007.
13. González-Duarte R, coord. Doce mujeres en la biomedicina del siglo XX. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 13. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2007.
14. Mayor Serrano MB. Cómo elaborar folletos de salud destinados a los pacientes. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 14. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2008.
15. Rosich L, Bosch F, coord. Redacción científica en biomedicina: El que cal saber-ne. Quaderns de la Fundació Dr. Antoni Esteve, N° 15. Barcelona: Fundació Dr. Antoni Esteve; 2008.
16. El enfermo como sujeto activo en la terapéutica. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 16. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2008.
17. Rico-Villademoros F, Alfaro V, coord. La redacción médica como profesión. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 17. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2009.
18. Del Villar Ruiz de la Torre JA, Melo Herráiz E. Guía de plantas medicinales del Magreb. Establecimiento de una conexión intercultural. Cuadernos de la Fundación

- Dr. Antonio Esteve, N° 18. Barcelona: Fundació Dr. Antonio Esteve; 2009.
19. González-Duarte R, coord. Dotze dones en la biomedicina del segle xx. Quaderns de la Fundació Dr. Antoni Esteve, N° 19. Barcelona: Fundació Dr. Antoni Esteve; 2009.
 20. Serés E, Rosich L, Bosch F, coord. Presentaciones orales en biomedicina. Aspectos a tener en cuenta para mejorar la comunicación. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 20. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2010.
 21. Francescutti LP. La información científica en los telediarios españoles. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 21. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2010.
 22. Guardiola E, Baños JE. Eponímia mèdica catalana (II). Quaderns de la Fundació Dr. Antoni Esteve, N° 22. Barcelona: Fundació Dr. Antoni Esteve; 2011.
 23. Mugüerza P. Manual de traducción inglés-español de protocolos de ensayos clínicos. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 23. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2012.
 24. Marušić A, Marcovitch H, coord. Competing interests in biomedical publications. Main guidelines and selected articles. Esteve Foundation Notebooks, N° 24. Barcelona: Esteve Foundation; 2012.
 25. De Semir V, Revuelta G, coord. El periodismo biomédico en la era 2.0. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 25. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2012.
 26. Casino G, coord. Bioestadística para periodistas y comunicadores. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 26. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2013.
 27. Carrió M, Branda LA, Baños JE, coord. El aprendizaje basado en problemas en sus textos. Ejemplos de su empleo en biomedicina. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 27. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2013.
 28. El científico ante los medios de comunicación. Retos y herramientas para una cooperación fructífera. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 28. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2013.
 29. Giba J. Developing skills in scientific writing. Esteve Foundation Notebooks, N° 29. Barcelona: Esteve Foundation; 2014.
 30. Bigorra J, Bosch F, coord. Filantropía en investigación e innovación biosanitaria en Cataluña. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 30. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2014.
 31. Francescutti LP. Los públicos de la ciencia. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 31. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2014.
 32. Casino G, Fernández E, coord. Epidemiología para periodistas y comunicadores. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 32. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2014.
 33. Gallego Borghini L. La traducción inglés-español del consentimiento informado en investigación clínica. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 33. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2015.
 34. Casino G. Escepticismo. Una mirada escéptica sobre la salud y la información. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 34. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2015.
 35. De la Torre T, coord. La Medicina en las series de televisión. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 35. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2016.
 36. Hernández I, coord. Definición de prioridades en políticas de salud. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 36. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2016.
 37. Mayor Serrano MB. El cómic como recurso didáctico en los estudios de Medicina. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 37. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2016.
 38. Guardiola E, Baños JE. Eponímia mèdica catalana (III). Quaderns de la Fundació Dr. Antoni Esteve, N° 38. Barcelona: Fundació Dr. Antoni Esteve; 2016.
 39. Claros Díaz MG. Ideas, reglas y consejos para traducir y redactar textos científicos en español. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 39. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2016.
 40. Revuelta G, Morales P, coord. Debate sobre periodismo científico. El tratamiento informativo del

- brote epidémico del virus del Ébola. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 40. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2016.
41. Valls R, Bigorra J, coord. Philanthropy in research and innovation in biosciences. Esteve Foundation Notebooks, N° 41. Barcelona: Esteve Foundation; 2017.
 42. De la Torre T, coord. Medicine in Television Series. Esteve Foundation Notebooks, N° 42. Barcelona: Esteve Foundation; 2017.
 43. Lumbreras B, Ronda E, Ruiz-Cantero M^a T, coord. Cómo elaborar un proyecto en ciencias de la salud. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 43. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2018.
 44. Francescutti P. La visibilidad de las científicas españolas. Cuadernos de la Fundación Dr. Antonio Esteve, N° 44. Barcelona: Fundación Dr. Antonio Esteve; 2018.

Conceptos que convierten a la serie
de Sheldon Cooper en una potente
herramienta de divulgación científica.

