

ÁTOMOS AL DESNUDO

Una visión íntima de la estructura de
la materia... y de quienes la develaron

ÁTOMOS AL DESNUDO

Una visión íntima de la estructura de
la materia... y de quienes la develaron

Miguel García Guerrero

Colección
**Por las
dudas**
•••••



*Átomos al desnudo. Una visión íntima de la estructura
de la materia... y de quienes la develaron*

Primera reimpresión, 2013

© Contenido

MIGUEL GARCÍA GUERRERO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

© Características gráficas

TEXERE EDITORES SA DE CV

Edición

JUDITH NAVARRO

MAGDALENA OKHUUSEN

Revisión técnica

BERTHA GUADALUPE MICHEL SANDOVAL

DAVID ARMANDO CONTRERAS SOLORIO

Diseño de forros

MAYRA VALADEZ ESTRADA

ISBN: 978 607 8028 18 4

Esta investigación fue arbitrada por pares académicos
propuestos por el autor.

*A NORMA,
Mi musa, mi compañera,
el amor y la mayor conquista de mi vida*

Agradecimientos

Muchas personas me apoyaron para escribir este libro; en vez de mencionarlas a todas con riesgo de omitir a alguien, prefiero aprovechar para agradecer especialmente a un trío fundamental para mi carrera como divulgador:

Toño (Antonio Villarreal): creaste un Museo en que jugué de niño y ahora, además de darme empleo, me permite ser totalmente feliz con mi profesión. Por si eso fuera poco, entre muchas otras enseñanzas, me iniciaste en el gran valor de la historia para la ciencia y su divulgación.

Octavio Campuzano: me invitaste a ser divulgador cuando yo ni siquiera tenía muy claro de qué se trataba eso. Además, lograste hacerme entrar a un mundo fascinante cuando pusiste en mis manos el primer texto que leí sobre la historia de la teoría cuántica, el mismo que me inspiró a escribir este libro.

Tita (Bertha Michel): hace doce años que me ayudaste a involucrarme en la divulgación escrita, con la paciencia de irme guiando a lo largo de mis primeros esfuerzos. A la par de eso, me motivaste a leer de verdad; algo fundamental para cualquiera que se quiera poner a escribir. Te la jugaste conmigo cuando muy pocos creían en mí, me diste oportunidades, consejos y estímulos que me han ayudado a llegar a ser quien soy en la divulgación. Gracias por todo esto; gracias por ayudarme a revisar, corregir y mejorar significativamente este libro; gracias por hacer el prólogo pero, sobre todo, gracias por ser Athos, Gandalf y Rutherford para mí.

Contenido

Prólogo	11
Bertha Michel Sandoval	
Introducción	15
Se hizo la luz	31
Ámbar y magnesia	51
Rayos	68
Y la energía se hizo pedazos	86
Emisiones y transformaciones	107
El átomo parchado	138
Buena onda	170
La eminencia gris	201
Dúo dinámico	236
Epílogo: del modelo estándar, el LHC y algunas ideas locas	276
Referencias	285

Prólogo

Desnudar un átomo es una tarea ardua. De hecho, desnudar cualquier cosa requiere, cuando menos, de una buena dosis de audacia.... y mucho, mucho cuidado. Hay quien arranca los atuendos sin mayor delicadeza, y aunque el objetivo de develar el misterio se cumpla, la experiencia no es siempre placentera. A pesar de que a menudo se olvide —especialmente cuando se escribe sobre ciencia—, el arte de contar historias tiene que ver con el placer, aún antes que con la transmisión de conocimientos. Entonces, desnudar átomos conlleva, por lo menos en este libro, un proceso de seducción.

El contador de historias tiene en sus manos un montón de eventos, es su responsabilidad ordenarlos y exponerlos de manera que formen un mundo que uno quiera conocer; cuando, además, escribe sobre historias reales el trabajo se puede complicar, ya que la realidad no siempre nos presenta su trama de novela.

La mayoría de los historiadores, llevados por un afán de exactitud, se limitan a exponer hechos y fechas del modo más escueto posible. El contador de historias no puede darse ese lujo, pues las historias necesitan de ciertos condimentos para hacerse apetecibles. No se trata de inventar hechos o fantasear con el pasado, sino de una particular visión del universo que lo hace amable —es decir, digno de ser amado—, con sus vueltas y revueltas, con sus bondades y sus defectos.

Átomos al Desnudo nos ofrece un paseo a lo largo de la historia de la ciencia, deteniéndose concretamente en los

sucesos que construyeron la imagen que hoy tenemos de los componentes fundamentales de la materia.

Este es un libro sobre conquistas y descubrimientos, un libro de aventuras que se adentra en las fronteras de lo inédito, nos lleva a parajes inexplorados e ilumina misterios de territorios desconocidos. También es un libro de ciencia o, para ser más exactos, de historias de la ciencia.

Los aventureros y exploradores que aquí encontrarán no son precisamente el estereotipo de los que uno se encuentra en los relatos; no transitan por el mundo armados hasta los dientes, ni se enfrentan a innumerables peligros en selvas exuberantes o yermos congelados. Sus escenarios cotidianos son laboratorios y oficinas, si acaso los jardines de una universidad. Y no pelean más que contra un solo monstruo: la ignorancia.

Si no se lo imaginan por el nombre, aquí hay un protagonista que sobresale a todos los demás: el átomo. Aunque supusimos su existencia desde hace mucho, mucho tiempo, los entresijos de su forma y su comportamiento permanecieron ocultos para todos. Así pues, esta es la historia del átomo. O mejor, es la historia de cómo hombres y mujeres se dedicaron a escarbar en el corazón mismo de la materia hasta desnudar sus más íntimos secretos.

Esto no es cosa nueva —me dirán—, hay como chorrocientos mil libros acerca de ello. ¿Qué hace que este sea especial?

Ante todo, aquí se nos ofrece la historia filtrada a través de los ojos de un escritor verdaderamente enamorado de aquello que se gesta alrededor del hecho científico. Acostumbrados como estamos a ver a los hacedores de la ciencia como sujetos lejanos, aislados del mundo que los rodea, es refrescante un tipo de lectura que, sin pomposas pretensiones, nos los presenta como seres de carne y hueso, con vida más allá del laboratorio y el centro de investigación.

Los científicos de este libro, desde Newton hasta Feynman, se despeinan, se pelean, se enamoran, engañan y sorprenden; son esencialmente humanos y el retrato que nos encontraremos aquí nos hará apreciarlos más allá de sus contribuciones científicas.

Para profundizar, hay que hablar del autor. Miguel García es un divulgador de la ciencia con una enorme experiencia, lo cual puede resultar paradójico, puesto que es una persona muy joven, pero se ha dedicado a ello desde los 15 años. Durante su carrera, ha participado en actividades de divulgación de la ciencia con decenas de miles de niños y jóvenes, a los que ha tenido que mantener entretenidos en talleres, juegos y conferencias; esto, en sí mismo, representa un entrenamiento intensivo para un contador de historias.

Toda esa práctica se refleja en el libro cuando nos cuenta, desde su muy particular punto de vista, los ives y venires del trabajo científico que rodea el descubrimiento de la estructura y el comportamiento interno del átomo. La voz de Miguel tiene la extraordinaria cualidad de hacernos compartir su entusiasmo; con su tono desenfadado, se las arregla para hacernos partícipes de cómo ve él a sus científicos. Y los ve siempre con optimismo y benevolencia. Benevolencia, no como una complicidad ciega con todo lo científico, sino —parafraseando a Antonio Machado— con la voluntad de ver la bondad en el trabajo de los que pueblan estas páginas.

De lo que Miguel a lo mejor no se ha dado cuenta, es que un libro, y la forma de escribirlo, es también un retrato del autor; así que a medida que los lectores vayan pasando las hojas de este volumen y se enteren de los amores secretos de Marie Curie, de las aventuras extramaritales de Schrödinger o de la afición a los bongós y los clubes de strippers de Feynman, también podrán echar un vistazo al interior de un hombre genuinamente interesado

en compartir el conocimiento científico. Los que conocemos a Miguel desde hace tiempo sabemos que es una experiencia que vale la pena.

Bertha Michel Sandoval

Introducción

Imagina que te invitan a la casa de uno de los científicos más grandes y reconocidos de la historia, ganador del Premio Nobel y quién sabe cuántos reconocimientos más. Estás encantado de la vida por la oportunidad de conocerlo y platicar con él por unos instantes, saber cómo vive, cómo piensa e incluso qué cosas nuevas está haciendo. Tantas ideas importantes en tu cabeza se pierden en un instante, todo se va por un tubo con una sola imagen. Al cruzar la puerta de entrada no puedes creer lo que ves: clavada en un muro junto a la entrada encuentras una herradura.

¡Santos protones! Algo anda mal, no puede ser que Niels Bohr sea un supersticioso. En cuanto lo encuentras tienes que sacar el tema a colación, una duda como esa no puede quedarse en tu cabeza. Te acercas al gran hombre y le dices: «Profesor, no pude evitar notar que usted tiene una herradura para la buena suerte en su casa, ¿acaso usted cree en esas cosas?» Voltea hacia ti y esboza una leve sonrisa antes de responder: «No te equivoques, no creo en esas cosas, pero me han dicho que funcionan aunque uno no crea en ellas».

Interesante situación, ¿verdad? Cuenta la anécdota, tirando a leyenda, que algo así le ocurrió a un visitante en casa de Bohr. Probablemente estos hechos jamás ocurrieron pero el relato nos sirve para ilustrar un punto importante de la física cuántica, dedicada al estudio de objetos tan pequeños que no es posible observarlos directamente.

Con frecuencia, los cálculos predicen cosas tan descabelladas que ni sus autores las consideran reales, pero —con todo y eso— hacen funcionar sus teorías. El investigador puede no creer en ellas pero, a pesar de ello, dan resultado.

Así le pasó a Max Planck con la cuantización de la energía y a Murray Gell-mann con los *quarks*; ni ellos mismos creían del todo en las predicciones hechas por sus trabajos. Más adelante entraremos en los detalles de cómo se le presentaron las cosas a cada uno, pero por ahora les puedo decir que otras personas tuvieron que ofrecer demostraciones —teóricas y experimentales— para ratificarles la validez de sus propias propuestas, o sea, tuvieron que venir pruebas exteriores para que los incrédulos autores aceptaran que sus teorías se acercaban muy bien a explicar el comportamiento de la naturaleza.

Y es que, aunque la ciencia parece la pura verdad, en realidad no todo es tan absolutamente cierto como parece. Los científicos no descubren la esencia del funcionamiento de la naturaleza de forma directa, sino que constantemente construyen propuestas para explicar diferentes fenómenos naturales.

La clave para un buen investigador radica en desarrollar ideas que ayuden a dar buenas explicaciones, las cuales podrán estar vigentes hasta que lleguen propuestas mejores que, a su vez, serán sustituidas por otras aún más efectivas, en un proceso interminable. No podemos pensar que se están descubriendo conocimientos definitivos; parafraseando a Paul Feyerabend, la única verdad absoluta en la ciencia es que en la ciencia no existen verdades absolutas. Aunque esto suena a contradicción, es cierto que la base esencial para construir conocimiento científico es que todo puede ser cambiado o mejorado. Nada se encuentra establecido para siempre.

Diantre. Después de siglos de trabajo, de miles de científicos quemándose las pestañas, de preguntarse un montón

de cosas y dar lo mejor de sí para encontrar respuestas, ¿puede ser que la ciencia no haya llegado a la verdad?

Precisamente ese es el punto: no hay una verdad a la cual llegar. No hay un conocimiento esencial que simplemente podamos buscar, sacar de su escondite y mostrar a todos para cubrirnos de gloria. Lo que existe es la realidad física, la ventana por la que nos asomamos a la naturaleza. También encontramos nuestro esfuerzo por conocerla y explicarla. Hablando a muy grandes rasgos, de eso se trata la ciencia. Con ayuda de nuestra imaginación desarrollamos ideas para explicar lo que sucede; buscamos entender diferentes fenómenos y hacer predicciones. Entonces, no nos limitamos a saber lo que ha pasado, también se busca saber lo que vendrá.

Por ejemplo, la Ley de Gravitación Universal de Newton explica —entre otras cosas— el movimiento de los planetas alrededor del Sol; justifica las posiciones que de ellos hemos observado pero también nos ayuda a saber dónde estarán en el futuro.

Con las predicciones, además de proveer cierto conocimiento y control sobre los fenómenos a nuestro alrededor, las teorías nos permiten verificar qué tanto sirven para explicar las cosas; al comparar el pronóstico y lo que sucede en la práctica, se puede establecer la efectividad de la idea.

Volviendo a la gravedad, si al observar los planetas su posición no coincidiera con lo que nos dice la teoría, tendríamos que hacer cambios en ella. Esto puede conducir a una revisión de posibles errores en los cálculos o a un cambio total de las ideas, el cual deja atrás el planteamiento original. En todo caso, una característica muy buena de la ciencia es que —salvo pocas excepciones— las teorías que no funcionan tienden a descartarse de forma natural.

Las ideas más efectivas son siempre las que prevalecen. Poco a poco son aceptadas y sirven como base para explicar más cosas, para hacerse más generales. Se considera

que una teoría es mejor entre más fenómenos se explican con ella. Esa fue una de las grandes victorias de la gravedad: explica desde la caída de los cuerpos en la Tierra hasta el movimiento de la Luna e incluso la formación de galaxias.

Pero los científicos son insaciables, capaces de arreglar hasta lo que no está descompuesto. Puede darse el caso de que ya exista un planteamiento bastante bueno para explicar y predecir lo que sucede, pero llega otro mejor —más exacto, completo o sencillo— y lo reemplaza de manera parcial o total.

Si bien la Ley de Gravitación de Newton fue ama y señora de las explicaciones del movimiento planetario por más de 200 años, la Teoría General de la Relatividad de Einstein ha demostrado ser más exacta. Para los objetos muy grandes —o sea, de planetas para arriba— la relatividad se ha establecido como la nueva reina. Sin embargo, la gravedad newtoniana sigue siendo útil para estudiar los fenómenos que podemos observar en la Tierra.

Vemos que no importa lo buenos o profundos que sean los conocimientos alcanzados en relación con algún aspecto del comportamiento de la naturaleza, siempre habrá personas que busquen ir más allá. Nunca de los nuncas se puede considerar la ciencia como una obra terminada.

Por si esto fuera poco, la información a nuestro alcance no es de primera mano, la naturaleza no entrega los datos directamente: se limita a inspirarnos; su comportamiento con nosotros es como el de una linda dama: nos estimula a acompañarla y conocerla pero nunca se entrega completamente. Siempre reserva y guarda un poco para sí, manteniéndonos motivados para indagar más y más en ella; esto puede ser con fines didácticos (aprender como estudiantes), lúdicos (jugar como niños), prácticos (mejorar nuestras vidas) o románticos (por el puro placer de experimentar, disfrutar su compañía y conocerla a fondo).

Podríamos decir que la persona dedicada a la ciencia está enamorada de la naturaleza, o al menos de un aspecto muy específico de ella. El científico se le entrega con una visión muy superficial de su realidad, poco a poco va acomodando sus ideas para entenderla mejor y, finalmente, si tiene suerte, termina por conocerla a fondo y aceptarla tal cual es.

Siempre existe el riesgo de que llegue alguien que le hable más bonito —o sea, plantearle mejores preguntas, conocerla mejor— para crear una idea más exacta de cómo funciona y predecir con mayor exactitud su comportamiento. Quien tiene tal logro se convierte en la persona más cercana a la naturaleza en el aspecto específico estudiado.

Richard Feynman (un científico del que hablaremos a fondo más adelante) relató en sus conferencias una gran historia en este sentido. Resulta que Arthur Eddington, uno de los científicos que descubrieron de dónde viene la energía con la cual las estrellas nos mandan radiación (o sea, luz, calor, ultravioleta, etcétera), se encontraba con su novia un día después de que le «cayó el veinte que la energía procede de procesos nucleares. Ella dijo: «mira qué bonito brillan las estrellas» y él contestó: «sí, y en este momento soy el único hombre en el mundo que sabe por qué brillan». Aunque quizá la frase no obtuvo el impacto romántico esperado, la expresión no deja lugar a dudas del singular orgullo causado al científico por su cercanía con la naturaleza: la sentía suya.

Pero el mejor candidato no siempre se distingue de manera automática, ni es elegido directamente por la naturaleza. Aunque la realidad física generalmente pone todo en su lugar, con frecuencia los «enamorados predilectos» (digo, los investigadores más acertados) son determinados por la misma comunidad científica.

Normalmente las batallas por lograr el reconocimiento de la autoridad científica son tanto o más encarnizadas

que las que buscan la preferencia romántica. Y no es de extrañar, con tanto en juego. Van de por medio años de trabajo, así como la credibilidad y estabilidad académicas de todas las personas involucradas. Hay debate y argumentación, pero también entran grillas, descalificaciones y hasta referencias familiares. En la guerra y en el amor todo se vale; a la hora de buscar el reconocimiento, la ciencia pareciera la combinación de la guerra contra la teoría rival y el amor por la naturaleza y su conocimiento.

Ahí tenemos el caso de Ludwig Boltzmann, un físico vienés del siglo XIX que le apostó todo a la teoría atómica cuando aún no era del todo aceptada. Aunque la mayoría de los químicos ya daban por hecho la existencia de los átomos como unidades indivisibles de los elementos que forman todas las sustancias conocidas, para muchos físicos se trataba de una idea sacada de la manga sin ningún sustento.

Hay que aceptar que en ese entonces realmente no había pruebas para corroborar la existencia de los átomos. Eso no le importó mucho a Boltzmann, él estaba convencido de sus ideas y trabajó muy duro para hacerlas funcionar. En su planteamiento se consideraba que todas las cosas están hechas de moléculas, partículas pequeñísimas que a su vez son formadas por grupos de átomos. Las propiedades de los objetos a nuestra escala —el aire dentro de un globo, agua dentro de un vaso o cualquier cosa que se les ocurra— serían resultado del movimiento de las moléculas. Por ejemplo, entre mayor fuera su energía cinética (movimiento) sería mayor la temperatura del objeto.

Pero eso parecía complicar mucho las cosas. De acuerdo a la mecánica clásica, para predecir el comportamiento futuro de las cosas tendría que saberse lo que va a ocurrir con cada una de las moléculas que las conforman. ¡Habría que estudiar miles de trillones de partículas! Eso llevaría la vida entera de un ejército de científicos.

Ah, pero don Ludwig no era ningún tonto: se dio cuenta de que podía realizar el trabajo de forma estadística. No habría que conocer los datos específicos de cada una de las moléculas, sino que era posible sacar conclusiones válidas a partir de su comportamiento promedio. Sería algo parecido a lo que hacen las compañías de seguros para establecer los costos de sus pólizas: toman datos promedio de millones de personas en vez de tratar de predecir lo que sucederá en cada caso individual. De esta manera, Boltzmann empezó a obtener resultados muy interesantes para factores como volumen, presión y temperatura de un sistema.

Pues resulta que a muchos físicos no les hizo gracia la propuesta estadística/atómica de Boltzmann. Las críticas a su trabajo no se hicieron esperar, obligándolo a dedicar mucho tiempo y energía para defenderse. Para acabarla de fregar, uno de sus principales detractores, Ernst Mach, trabajaba con él en la Universidad de Viena. Mach era un positivista de hueso colorado: según él, solamente era posible creer lo que se podía ver, y por aquel entonces no había forma de ver o detectar los átomos. Para él no podían existir, y lo hizo saber con brutal franqueza.

Desde antes, Boltzmann era propenso a las depresiones —incluso se dice que era bipolar— y los diferentes ataques a su trabajo acabaron de hacerle la vida de cuadritos. Así, con la combinación de su agobio académico y desequilibrio emocional, acabó por suicidarse el 5 de septiembre de 1906; se ahorcó mientras estaba de vacaciones en la ciudad de Duino, en Italia. Murió sin recibir el reconocimiento que merecía y sin saber hasta qué grado —como veremos en el cuarto capítulo— su trabajo, enriquecido con los aportes de Max Planck y Albert Einstein, ayudaría a cambiar nuestra forma de ver la materia y la energía.

Afortunadamente, no todos los enfrentamientos científicos son tan duros o dramáticos, pero generalmente

demandan un gran esfuerzo por parte de los investigadores; preparándose para enfrentar estas situaciones, dedican mucho tiempo a recopilar datos de su área para apoyar las ideas con que quieren explicar las cosas. Revisan su trabajo una y otra vez antes de publicarlo porque nunca existe una garantía de éxito para una teoría específica. No hasta que se pone a prueba.

La clave es que, como sucede con el comportamiento del sexo opuesto en una situación romántica, en la naturaleza uno nunca está seguro de lo que pasa realmente con sus mecanismos internos. No importa cuánto se especule, en privado o en público, la validación no llega hasta contrastar las predicciones derivadas de nuestras ideas con los datos obtenidos experimentalmente. De esta manera es posible establecer si el planteamiento funciona o tiene algún error.

Ya dijimos que la naturaleza no entrega datos directamente. Debemos plantearle las preguntas adecuadas de forma indirecta, a través de nuestra ventana para conocerla: la realidad. En vez de esperar pacientemente a que suceda un fenómeno relacionado con nuestra predicción, con los experimentos es posible obtener información sobre lo que queremos saber. Los colegas se encargan de verificar si las preguntas realizadas son las correctas y las respuestas en realidad dicen lo que el científico creyó escuchar.

Y es que muchas veces los científicos, llevados por la pasión que sienten por sus ideas, pueden llegar a engañarse, a sentirse falsamente correspondidos. Ocurre lo mismo que con muchos de los enamorados cuando «encontramos» en un simple saludo o una cordial sonrisa la «evidencia contundente» del amor que la dueña de nuestros suspiros siente por nosotros. Existen muchos investigadores que llegan a engañarse, pero eso no es culpa de los experimentos, más bien se debe a su afán por estar en lo cierto o a la emoción causada por lo que creen encontrar en sus resultados.

Se requiere un análisis objetivo para establecer si los datos obtenidos realmente corroboran las ideas en cuestión. Puede ser que la información se haya interpretado mal, o hasta que la pregunta planteada, con la ayuda del experimento, no sea adecuada para obtener conclusiones firmes en el asunto.

Como quiera que se vea, las pruebas prácticas son un elemento fundamental de la investigación científica y también del romance. La mejor forma de obtener información de una persona que nos interesa es interactuar con ella; inicialmente uno puede generarse muchas ideas sobre la chica (o el chico) de su interés, pero solamente mediante la experimentación directa se puede saber si la teoría sirve o no.

Hay quienes preparan su abordaje de forma teórica: obtienen información a distancia y suponen cosas sobre la persona de su interés (o el aspecto de la naturaleza). Así dan forma a conjeturas y a un plan de acción. Generalmente, en el afán de conquista del ser amado hasta los más abstraídos acaban lanzándose al ruedo; sin embargo, en la investigación de la naturaleza muchos se quedan en el puro plano teórico.

Einstein es el ejemplo clásico de este caso. Siempre basaba sus teorías en datos obtenidos por otras personas y las desarrollaba en los planos formal y conceptual. Una vez concluidas, sus teorías arrojaban predicciones útiles para contrastar con los fenómenos naturales y así comprobar su validez. Sin embargo, él nunca movió un dedo para hacer mediciones; parece que Einstein se sentía satisfecho con la elegancia de su teoría y su capacidad para predecir lo que sucedería.

En la ciencia, los experimentales se limitan a veces a comprobar las predicciones de los teóricos. Sin embargo, con frecuencia también logran detectar fenómenos completamente nuevos o aprovechar la información con que

cuentan para realizar y comprobar sus propias conjeturas. Prefieren actuar directamente, tomar el toro por los cuernos y sacar cuanto se pueda de la experimentación. Quizá no funcione a la primera, ni a la segunda o tercera, pero tarde o temprano su acción les permite enterarse de cosas importantes y hasta predecir de forma exitosa nuevos sucesos.

Ernest Rutherford personifica la perfección del experimentador que puede sin problemas meterse a la elaboración de teorías. Fue capaz de aprovechar todos los recursos técnicos a su disposición para plantearle buenas preguntas a la naturaleza y, además, tenía una mente hábil para interpretar la información obtenida en los experimentos. Fue, sin duda, uno de los científicos experimentales más prolíficos, productivos y reconocidos del siglo XX.

Es preciso notar que, mientras Rutherford obtuvo los datos y él mismo supo crear una idea para explicar los resultados, Einstein necesitó de otras personas para verificar las predicciones de su teoría, la cual no hubiera llegado a ser reconocida sin el trabajo de un científico experimental. Es más común encontrar experimentales que también la hacen de teóricos, que teóricos que se animan también a entrarle a la experimentación. El hecho ineludible es que toda teoría necesita experimentos para ser validada, y que no hay experimento que nazca sin algo de teoría por debajo.

Actualmente existen muchos planteamientos científicos bastante interesantes pero que, aunque en teoría no parecen tener fallas, aún no pueden comprobarse en la práctica. Esto sucede porque no han logrado hacer predicciones o las que han hecho no pueden ser medidas de modo suficientemente preciso con la tecnología actual.

A final de cuentas, por muy bonita que sea una idea para explicar tal o cual fenómeno, si los datos no cuadran a la hora de contrastarla con la realidad, el planteamiento

debe cambiar. No importa si la teoría era simple y elegante, o si a todos les gustaba; tampoco importa si incluía un regalo sorpresa; se debe de acomodar de acuerdo con los resultados y no al revés. De otra forma, acabaríamos «cuchareando» la información y las ideas planteadas no explicarían la realidad.

Afortunadamente para la ciencia, los científicos se han hecho mucho mejores para estudiar la realidad que los hombres para estudiar a las mujeres. Las predicciones se han hecho cada vez más profundas, específicas y precisas. Esto también puede ocurrir porque actualmente tenemos más científicos activos que todos los que existieron antes en la historia, ¡juntos! Tenemos todo un ejército indagando al Universo en sus diferentes escalas, adentrándose cada vez más en las intimidades de la realidad. Además, se cuenta con los aportes de todas las personas que alguna vez se han enamorado de la naturaleza. Con tantos hombres y mujeres metidos en un estudio tan profundo, hemos logrado un amplio conocimiento de las cosas.

Vista desde afuera, la ciencia pareciera un gigantesco monumento, prácticamente terminado e inmutable. Da la impresión de que una vez que alguien logró meter un tabique en él ya estará ahí para siempre y no será alterado. Nada más lejano de la realidad. En cualquier dirección que volteemos, las teorías están siendo revisadas, completadas, profundizadas o de plano reemplazadas.

Por todos lados, la ciencia sigue siendo una obra inconclusa y, en vez de acercarnos a terminarla, nos damos cuenta de que falta más por hacer. Pero, ¿cómo puede ser esto posible?, si la ciencia nos ha ayudado a explicar un sinnúmero de fenómenos y a construir un sistema tecnológico espectacular. Ha avanzado tanto y, ¿cada vez nos falta más por hacer? Bueno, en un sentido estricto no es que falte más por hacer, sino que entre más aprendemos nos enteramos que hay más detalles por develar, más aspectos

que desentrañar y más fenómenos extraños que explicar.

Es como cuando Sócrates dijo: «Yo solo sé que no sé nada»; no fue un acto de humildad. Él quiso establecer cómo al saber tanto se daba cuenta de que su conocimiento no era nada comparado con todo lo que era posible conocer. Parafraseando al escritor inglés Terry Pratchett, cada vez que se descubren cosas nuevas lo que se hace es ampliar los límites de la ignorancia.

Precisamente eso ocurrió cuando los físicos empezaron a adentrarse en el mundo del átomo a inicios del siglo XX. Nos abrieron las puertas a un mundo fascinante y mostraron que había un gran número de cosas en sus entrañas de las que no teníamos la más mínima idea. Además, conforme se conoció su interior un poco mejor, el átomo se convirtió en uno de nuestros aliados más útiles para el desarrollo de tecnología. Al estudiarlo, junto con las partículas que lo componen, hemos podido «conquistarlo» y lograr que sirva a nuestros propósitos. Así se han creado dispositivos como la televisión, el transistor, el láser, la celda fotoeléctrica, el led, el teléfono celular, la cámara digital y los reactores nucleares, por mencionar algunos.

Parece, entonces, que ese átomo es todo un estuche de monerías; resulta lógico preguntarnos a quién se le ocurrió la genial idea de investigarlo. La inspiración viene de hace mucho tiempo, tanto, que entonces no había medio alguno para realmente estudiar un objeto tan pequeño. Hace más de 2,400 años, en Grecia, a Demócrito se le ocurrió que debería existir algo tan pequeño que ya no pudiera dividirse: el mentado átomo. Según su planteamiento, habría diferentes tipos de estas partículas, las cuales darían forma a todas las cosas que conocemos. Fuera de los átomos solamente existiría el vacío.

Además de que en su época no existía la tecnología para obtener información empírica al respecto, Demócrito era teórico y ni siquiera intentó indagar de forma

práctica sus interesantes concepciones. Realmente, solo estaba especulando, adivinando. La idea quedó como un planteamiento interesante pero que no parecía tener una aplicación concreta.

El aporte fue retomado hace poco más de doscientos años en Inglaterra. A inicios del siglo XIX, John Dalton le dio nueva vida a la teoría atómica con el apoyo del trabajo de dos químicos franceses: Lavoisier y Proust. El primero había conseguido recopilar importante información para identificar las sustancias que no podían ser descompuestas en otras más sencillas: los elementos. Proust estableció que todos los compuestos cuentan con proporciones bien definidas de los elementos que los conforman. Dalton usó una idea sencilla para explicar la Ley de Proust: los elementos debían de estar formados por partículas indivisibles. Como todo estaría hecho de estos bloques fundamentales, se encontró una gran semejanza con las ideas de Demócrito y se les llamó átomos. De esta manera, como dice Jorge Flores (destacado físico nuclear mexicano), «Dalton logró la unión de Demócrito con Lavoisier».

Aunque los átomos llegaron para quedarse, les duró poco el gusto de ser fieles a la definición que les da nombre. Casi 90 años después de su «reaparición», J.J. Thomson demostró que es posible dividirlos: en su interior se encuentran unas partículas miles de veces más ligeras, las cuales recibieron el nombre de electrones.

Luego —en 1912— llegó Rutherford y descubrió que el átomo tiene un núcleo diminuto. Estableció que tiene partículas con carga eléctrica positiva a las que llamó protones. Unos veinte años después, su alumno James Chadwick descubrió unas partículas sin carga que también se encuentran en el núcleo: los neutrones. En la década de 1930 parecía que estas tres partículas (protones, neutrones y electrones) serían los nuevos átomos. Pero la cosa no paró ahí. Años después se formó la familia de

los leptones con el descubrimiento de dos hermanos más pesados del electrón; el muón y el tau.

Además, vendría Murray Gell–mann a decirnos que los protones y neutrones tampoco son partículas fundamentales, sino que están hechos de unos componentes más pequeños, los *quarks*. Se trata de partículas muy «sociables» que nunca están solas, generalmente los encontramos de tres en tres. Hasta la fecha se han identificado seis «sabores» de *quarks*, los cuales tienen nombres que no son muy originales pero resultan fáciles de recordar: *up* (arriba), *down* (abajo), *top* (cima), *bottom* (fondo), *charm* (encanto) y *strange* (extraño).

Aún hay más. Hasta ahora parece que toda la materia conocida está formada por *quarks* y leptones. Sin embargo, en condiciones de muy altas energías apareció un nuevo «personaje» que ha sido una abundante fuente de inspiración para la ciencia ficción: la antimateria. Resulta que cada una de las partículas antes descubiertas tiene su antipartícula y que, al encontrarse unas con otras se aniquilan, dejando solamente energía detrás de ellas.

Hoy en día, los datos obtenidos nos hacen creer que los *quarks* y los leptones, así como sus antipartículas, son indivisibles; sin embargo, no se trata de algo definitivo. En realidad no tenemos la tecnología para darnos cuenta si hay algo más. Ni siquiera podemos establecer con precisión el tamaño de las partículas conocidas. Como diría Bertha Michel (mi patrona, Directora del Museo de Ciencias de la Universidad Autónoma de Zacatecas): solamente sabemos que «son tan pequeños que no sabemos qué tan pequeños son». Lo más pequeño que nuestra tecnología puede medir es 1×10^{-18} m (0.000000000000000001 metros, o sea la billonésima parte de la millonésima parte de un metro), y sabemos que los *quarks* y los leptones son más pequeños aún, pero no sabemos qué tanto.

Realmente no es posible saber si el asunto va a parar ahí o podremos indagar más, descubrir que estas partículas están hechas de otros componentes. Cada vez que la ciencia logra aprender algo nuevo sobre la estructura de la materia se acaban planteando más preguntas de las que se responden; nos damos cuenta de que lo que creíamos que era el fondo de las cosas es solamente un paso más para llegar a quién sabe dónde.

La recapitulación que acabamos de realizar, acerca de lo que se sabe de la estructura de la materia, ha sido rapidísima. Es como saber solamente el marcador de un encuentro deportivo sin poder ver las mejores jugadas a ambos lados de la cancha. Faltan muchos elementos para agarrarle sabor al asunto: tener una mejor idea de la forma en que se acomodan las partículas fundamentales, así como de qué manera hemos logrado conocerlas y aprovecharlas.

También están ausentes muchas de las personas que desarrollaron ideas para explicar el comportamiento de algo que no vemos ni podremos ver nunca. Falta meternos en el lado humano de la ciencia atómica, conocer más de quienes se dedicaron a estudiar la composición de la materia, saber cómo trabajaban e incluso los chismes a su alrededor. Y es que sus vidas no solamente fueron fascinantes desde el punto de vista científico, también tuvieron grandes emociones y divertidas historias que bien merecen ser compartidas.

Finalmente, no podemos dejar de lado el principal motivo que dimos para acercarnos al átomo: sus aplicaciones. Por la forma en que realizamos el recorrido —desde las primeras ideas de Demócrito hasta el conocimiento de los *quarks* y leptones—, no nos detuvimos a explicar la utilidad de cada hallazgo. A lo largo de las siguientes páginas también ilustraré para qué sirven hoy en día muchos de los descubrimientos atómicos.

Venga pues, vamos a embarcarnos en un recorrido para acercarnos a lo que podríamos llamar la vida de la ciencia del átomo, sus anécdotas y los aspectos en que sus productos han cambiado para siempre nuestra forma de vivir.

Se hizo la luz

Una de las preguntas más comunes que recibes cuando estás en la universidad es: «¿qué estudias?» A todo mundo parece interesarle tu formación profesional; el cuestionamiento llega una y otra vez en diferentes situaciones: cuando acabas de conocer a alguien, al encontrarte un viejo amigo o al ser abordado por tus tías en una reunión familiar.

En mi caso, al responder «física», aparecían con frecuencia respuestas como «¿educación física?», o «¿eso qué es?» Muchas personas ni siquiera la ubican como un área de la ciencia y menos tienen claras las cosas que estudia. La falta de reconocimiento inicial nunca afectó mi ánimo, normalmente me las arreglaba para explicar que me preparaba para ser físico–matemático. La cosa cambiaba un poco, con expresiones como «pero eso es cosa de genios» o «ah, entonces eres un cerebritito». Estas afirmaciones, en vez de acercarse a la verdad, solo ayudaban a inflar más mi ego.

Y es que sucede que los de física somos de los estudiantes más engreídos que se pueden encontrar.¹ Basta con asomarse a los primeros años de una escuela de física para ver cómo todos los alumnos se consideran parte de una especie superior, potenciales ganadores del premio Nobel. En realidad, no hay porque sentirse la cereza del pastel, se trata de una carrera como cualquier otra con la diferencia de que pocas personas realmente entienden

1. Claro que se recibe buena pelea de los que se forman en otras disciplinas científicas.

qué hacemos los físicos, cómo lo hacemos o para qué servimos.

Lo digo con conocimiento de causa. Hasta los 14 años, cuando entré a la preparatoria, yo no tenía una idea muy clara de qué era la física. Sabía que se trataba de un área de la ciencia y que incluía cosas como los vectores, el movimiento, los imanes y la gravedad, pero hasta ahí llegaba; tenía una perspectiva más clara de otras áreas de la ciencia como la química o la biología. Cabe aclarar que en ese entonces yo estaba convencido de que mi futuro estaría en una carrera vinculada a la computación.

Con el avance de mis clases en la prepa y mi participación en el Museo de Ciencias² de la Universidad Autónoma de Zacatecas, me fui haciendo una mejor idea de las cosas estudiadas por la física. No solamente esto, me agradaron tanto que acabé estudiando en la universidad eso que poco tiempo antes no podía identificar de forma clara. Y se trata de algo realmente simple; hasta parecía increíble que me tardara tanto en darme cuenta.

En términos muy prácticos podríamos decir que la física estudia la materia y la energía, aderezadas con algo de espacio y tiempo.³ Son elementos tan amplios como sencillos; dan lugar a aspectos fundamentales del conocimiento de la naturaleza y, de hecho, ofrecen las bases para el trabajo de las otras áreas de la ciencia. La razón por la cual no siempre vemos con facilidad la esencia del asunto es porque varios aspectos involucrados son difíciles de visualizar.

Materia y espacio no representan mucho problema; es posible observarlos de forma cotidiana, por lo que ya los tenemos muy masticados. Estamos acostumbrados

2. Donde empecé como un chamaco en cursos de ciencia y le tomé un gusto tan grande a las actividades que luego ya no me pudieron sacar. Ahora tengo la fortuna de trabajar ahí como divulgador científico.

3. O más bien de espacio-tiempo, pero eso generalmente es relativo y mejor lo veremos más adelante.

a manipular diferentes objetos, los cuales representan la materia. Asimismo, nos movemos hacia adelante, atrás, izquierda, derecha, arriba y abajo, es decir, nos desplazamos por el espacio.

Sin embargo, energía y tiempo son cuestiones más complejas. Todos tenemos una noción intuitiva de lo que es el tiempo, pero a la hora de establecer las cosas en forma específica nos quedamos en blanco; normalmente nos conformamos con una idea, un tanto borrosa, derivada de los periodos en que lo dividimos conforme transcurre: años, meses, días, horas, minutos, segundos, etcétera. El tiempo es algo tan abstracto que ni los más grandes científicos han logrado definirlo⁴ de forma clara.

A primera vista, la energía pareciera no quedarse atrás. Todos la aprovechamos, e incluso la sentimos, pero es difícil delinear un concepto claro. El diccionario no ofrece mucha ayuda al respecto, se limita a decirnos que «es la capacidad de realizar un trabajo»⁵ pero resulta muy llano si comparamos esta idea con todas las facetas conocidas del concepto. Para conocerla un poco mejor sería bueno meternos en las cosas que hace: la energía mueve el mundo y el Universo, nos da calor y la vida misma. Son tan variadas las formas en las cuales la encontramos que —por eso mismo— es complicado definirla de forma clara. Hay energía en un balón de fútbol que viaja rumbo a la portería, así como en la órbita de la Luna alrededor de la Tierra, en una taza de café caliente o en los procesos nucleares del Sol, en una batería eléctrica y en un rayo, en el llanto de un bebé o en la estridente música de un concierto de *rock*. Así, haciendo un esfuerzo por generalizar, lo más normal es encontrarla como movimiento, calor o electricidad.

4. Newton, por ejemplo, no llegó más lejos que establecer que «tiempo» es lo que medimos con un reloj.

5. No se trata de conseguir chamba. En física se realiza un trabajo cuando llevamos un objeto de un lugar a otro o cambiamos el volumen de un cuerpo.

Ups, momento, paremos ahí; parece que nos olvidamos de un aspecto clave. Además de todos los ejemplos mencionados, nos falta una forma casi pura de energía que es, sin duda, la más fácil de ver: la luz. Podríamos llamarlo el agente energético por excelencia y, al mismo tiempo, es un fenómeno que ha despertado curiosidad en los seres humanos mucho antes de ser objeto de investigación de la ciencia. Aunque pareciera que el conocimiento de la luz solamente es un actor secundario en el panorama de la energía —y la física—, su estudio nos ha ayudado a aprender cada vez más de la estructura de la materia y el Universo mismo. Ha asumido un papel importantísimo para la ciencia: es la punta de un iceberg fundamental para la forma en que entendemos la naturaleza. Así, parece necesario encontrar respuesta a preguntas como ¿Qué es la luz?, ¿De dónde viene?, ¿Cómo funciona?

Pero, como diría Jack «El Destripador», vamos por partes. Empecemos por revisar un poco la historia, por enterarnos de cómo llegó la luz a asumir un lugar tan importante en la escena científica y quiénes fueron las personas que lograron ubicarla en esa posición privilegiada.

Hasta mediados del siglo XVII no existía una buena explicación para darnos idea de la naturaleza y origen de la luz. Siendo muy cínicos, el conocimiento más aceptado de la época en la materia se resumiría en: «Dios dijo: «Hágase la luz» y la luz se hizo». Se trataba de una caja negra; en aquel entonces, el estudio de la luz solamente había permitido conocer sus principales propiedades, es decir, los fenómenos que podíamos observar en ella. La reflexión fue probablemente el primero en descubrirse; se observa cuando superficies planas y cristalinas (como espejos, vidrios o incluso agua) muestran una réplica de la imagen que se encuentra frente a ellas.

También se conocía la refracción; se sabía que un rayo se desvía al pasar de un medio a otro diferente, por

ejemplo, del aire al agua. El grado de desviación en un material transparente específico depende de la velocidad de la luz en el medio y recibe el nombre de índice de refracción. Esto sirvió para explicar el comportamiento de las lentes que permiten ampliar o reducir una imagen, con las cuales ya se había logrado construir telescopios y microscopios. Una última propiedad que se tenía identificada en ese entonces era la difracción: la capacidad de la luz de doblar las esquinas, de ampliar gradualmente el tamaño de su haz (aunque en el proceso disminuye su intensidad). Después de que la luz pasa por un pequeño orificio, el área iluminada aumenta entre más lejos se encuentre la pantalla con que choca, se va abriendo.⁶

El detalle es que en aquella época nada más se conocía el comportamiento de la luz, pero no había explicación alguna sobre por qué se comporta así. El primer paso para cambiar esto lo dio un inglés flojo y rebelde, al menos así lo consideraban sus familiares y compañeros de estudio, respectivamente. Un chico que a sus 22 años poseía un prodigioso conocimiento de las matemáticas, quien sin embargo no era capaz de hacer nada productivo por la granja de su madre y —debido a la peste bubónica— tampoco podía seguir estudiando en la Universidad de Cambridge: se trataba de Isaac Newton.

Así como en 2009 la Influenza AH1N1 obligó a cerrar escuelas en muchos países para evitar la propagación del virus, en la Inglaterra de 1665 se vivió una gran epidemia, pero mucho más mortífera. La peste bubónica llegó a matar miles de personas por semana y obligó a las autoridades a evitar cualquier aglomeración. Esto incluyó el cierre de universidades, enviando a muchos estudiantes de regreso a sus casas. El joven Isaac no fue la excepción,

6. Esto permite el funcionamiento del cine; originalmente, el cuadro del cual sale la luz es muy pequeño, pero acaba formando una imagen enorme en la pantalla.

regresó al campo con su familia, aunque en realidad no le tenía mucho apego (ni al campo ni a la familia). Tampoco es que le hayan tenido especial afecto al genio en ciernes; en ambas direcciones la relación era bastante problemática.

Desde la llegada de Newton al mundo, el 25 de diciembre de 1642, las cosas ya se veían bastante deprimentes. Su padre falleció tres meses antes y el recién nacido era tan enfermizo que a muchos les sorprendió que se mantuviera con vida. Tres años más tarde, su madre Hannah, quien al parecer era de buen ver, encontró nuevo galán y se casó. El detalle es que —según contaban las malas lenguas de la época— el pequeñín era bastante feo y su padrastro no tenía intención de hacerlo parte de su familia; se las arregló para dejarlo con sus abuelos en la granja que ellos poseían. Aún con el dolor de su corazón, su madre lo dejó atrás para formar un nuevo hogar, al cual llegarían un niño y dos niñas.

El rechazo materno marcó de por vida a Newton y desarrolló en él un carácter hostil, cargado de resentimiento. Durante sus años mozos nunca encajó bien con sus compañeros, en parte porque era un bravucón hecho y derecho, en la escuela abusaba con frecuencia de los niños más débiles; además, como él mismo recordó más tarde, llegó a amenazar con prenderles fuego a su madre y a su padrastro. Era un rebelde total.

Al llegar la pubertad se presentó un reencuentro con la figura materna, pero no fue muy provechoso. Su padrastro falleció —el mismo año de la muerte de su abuelo— y su mamá regresó a la granja. El nuevo orden familiar, con su madre, abuela y hermanos, no le sentó muy bien al que fuera un niño abandonado. Le pegó un berrinche monumental que nadie quiso aguantar; lo mandaron a estudiar a 8 kilómetros de casa, a la escuela de Grantham.

Luego de un lustro de estudios lejos de los suyos, el muchacho de 17 años regresó a su natal Colsterworth.

Entonces, ya sea con la idea de reconciliarse o por la necesidad de alguien que se hiciera cargo de la granja, a Hannah se le ocurrió asignarle a su hijo un lugar importante en la administración del patrimonio familiar. Grave error. Aunque para ayudarlo a ser un gran hombre de campo le pusieron como tutor a un experimentado trabajador, nuestro héroe resultó un fiasco, al grado que pronto le rogaron que se mantuviera alejado de las actividades de la granja. En retrospectiva, este suceso resultó ser uno de los fracasos más afortunados para la historia de la ciencia: se perdió un mal granjero y se ganó uno de los científicos más grandiosos de la historia.

La familia patrocinó la continuidad en los estudios⁷ del joven Isaac, aunque no con la plenitud que sus recursos realmente podían permitir; tenía una especie de beca que lo obligaba a hacerla de mandadero de un estudiante acaudalado. Para su fortuna, se trataba de un primo lejano al que, como buen bravucón, atemorizó rápidamente y se libró de sus penosas obligaciones de sirviente. Otra ventaja es que pudo estudiar en el Trinity College de Cambridge, una de las mejores instituciones de su época, que contaba con un impresionante acervo matemático.

Durante sus estudios universitarios, Newton devoró todas las matemáticas disponibles en la biblioteca, las cuales eran prácticamente las que existían en la época; día y noche se dedicaba a transcribir los libros, de una forma tan obsesiva, que lo llevó a convertirse en el mejor matemático del mundo, aunque entonces muy poca gente lo supiera.

Justo cuando concluyó sus estudios y estaba alcanzando un gran ritmo en su trabajo científico, la peste llegó a Inglaterra. Volvió a la granja y, estando ahí, se dedicó a lo

7. Seguramente sentían que una formación universitaria para Isaac le sería de gran utilidad a la granja, sobre todo porque lo mantendría a 100 kilómetros de ella. Mucho ayuda el que no estorba.

que mejor sabía hacer. ¿Y qué era eso? Su familia seguro habría afirmado que era holgazanear, pero la historia ha mostrado que entre 1665 y 1666 logró desarrollar ideas que lo ubican como uno de los grandes genios en la historia de la humanidad.

El estudio universitario le había sido de gran utilidad, pues le ofreció las bases para convertir sus ideas de este periodo en grandes teorías. Y vaya que fueron grandes. Desarrolló las leyes del movimiento que llevan su nombre y la Ley de Gravitación Universal, con el apoyo del trabajo de Galileo y Kepler. También dio seguimiento a la labor matemática que inició en la universidad para avanzar en la creación de lo que sería el cálculo.⁸ Por si lo anterior fuera poco, abrió la puerta para un mayor conocimiento de la luz.

En uno de tantos días libres, en el interior de una habitación oscura, Isaac realizó un experimento que se volvería clásico: hizo pasar un fino haz de luz blanca a través de un prisma de vidrio y logró proyectar en una pared los colores del arcoíris. Con esto, Newton demostró que la luz blanca contiene todos los colores, los cuales se separan —ayudados por la forma del prisma— por tener velocidades ligeramente distintas en el vidrio. A la banda cromática obtenida la llamó «espectro», que significa imagen o aparición.

Con esto ofreció por primera vez una explicación para la formación del arcoíris, dio a conocer que las gotas de lluvia se portan como pequeños prismas que separan los colores. A la par de esto afirmó que la luz está hecha de una «granizada de corpúsculos luminosos», lo que actualmente llamaríamos un haz de partículas. Construyó así la primera propuesta sobre la naturaleza de la luz.

8. De forma independiente, también Leibniz logró desarrollar esta útil herramienta matemática.

Pero no se crea que inmediatamente todo este trabajo causó un revuelo espectacular; en realidad, la comunidad científica no se enteró inmediatamente de los fabulosos avances que Newton había realizado en sus forzadas vacaciones. Temeroso de la crítica o de la posibilidad de que le robaran sus ideas, a Isaac le llevó un buen rato darlas a conocer. Poco a poco se abrió de capa y su grandeza quedó manifiesta, ganándose un lugar estelar en la escena científica de la época. Y no era para menos, se trataba de un gran investigador con la extraña cualidad de ser genial en los tres aspectos más importantes para la ciencia: teórico, matemático y experimental. Pocos en la historia han alcanzado tal proeza, ni siquiera Galileo o Einstein lo lograron.⁹

Curiosamente, en su época coincidió la aparición de otro «charro completo», quien sería el rival científico más grande de Newton: Christiaan Huygens. Además de competir en términos académicos, realmente se caían mal a nivel personal. No podía ser de otra manera, fuera de su genio científico casi no tenían nada en común,¹⁰ las diferencias marcadas de estas dos luminarias los llevaron a un choque de titanes.

Huygens era hijo de un diplomático holandés, fue educado en casa por los mejores instructores privados, entre quienes se incluía un buen amigo de su familia: René Descartes.¹¹ Christiaan era cortés y cosmopolita, además poseía un carácter sumamente agradable, todo un estuche de monerías.

Científicamente, fue un pionero en el estudio de la probabilidad, realizó aportes al conocimiento de la fuerza

9. Nadie es perfecto; al italiano le faltaba lo matemático, mientras que al alemán lo experimental.

10. Entre otros detalles, coincidieron en el hecho de que ninguno se casó, lo que ha dado lugar a numerosas especulaciones sobre sus preferencias sexuales.

11. El mismo creador del plano cartesiano con los ejes x, y.

centrífuga y estableció el principio de conservación de las fuerzas vivas, antecedente del de conservación de la energía. También adquirió fama por construir un excelente reloj de péndulo —el primero que realmente funcionaba bien— y telescopios de gran calidad, con los que pudo descubrir los anillos de Saturno y la mayor de sus lunas, Titán.

Pero, sin duda, el aporte por el que se le recuerda más es el mismo que lo enfrentó con Newton: propuso la idea de la luz como una onda. Así nació *El Debate*: ¿es la luz una onda o un corpúsculo? ¿Energía o materia? Se trata de una de las disputas más célebres en la historia de la ciencia, con repercusiones que llegaron más lejos de lo que cualquiera de sus protagonistas pudo siquiera sospechar.

Para realmente tomarle sabor al asunto es necesario hacer una pequeña pausa, detenernos a revisar qué es una onda. Se trata de una perturbación que viaja a través de un medio transportando energía o, dicho de otra forma, una onda es energía viajando de un lugar a otro. El ejemplo clásico aparece cuando tiramos una piedra a un estanque y se forman pequeñas olas que van desde el punto donde cayó hacia afuera. El agua que es golpeada por la piedra al caer no llega hasta la orilla del estanque, solo transmite la energía a la que está a un lado y la perturba con una oscilación; esta, a su vez, la pasa a su vecina y así sigue el viaje hasta el borde. La perturbación solamente hace que el agua suba y baje de manera continua; la que viaja no es la materia sino la energía, y es esta la que hace oscilar el líquido del estanque en su trayecto.

Existen dos tipos de ondas: transversales y longitudinales. En las primeras, la oscilación se lleva a cabo atravesando la dirección en que se propaga, como en el caso de la piedra. Las longitudinales realizan la perturbación en la misma dirección de propagación; como el sonido, que al viajar en el aire lo aprieta y estira en el mismo sentido en

que se desplaza. A la parte superior (o más apretada) de una onda se le llama cresta, mientras que a la inferior (o estirada) se le conoce como valle. La longitud de onda es la distancia que existe entre una cresta y la siguiente, o un valle y el siguiente; es el tamaño de un ciclo completo. Al número de ondas completas por unidad de tiempo se le llama frecuencia y normalmente se mide en ciclos por segundo. Si multiplicamos la longitud de la onda por su frecuencia siempre se obtiene la velocidad a la cual está viajando.

Volviendo con el buen Huygens: resulta que planteando la luz como una onda transversal logró explicar la existencia de los colores; señaló que cada color resulta de la frecuencia de su onda. Además, pudo explicar a las mil maravillas los fenómenos de reflexión, difracción y refracción. Con su teoría corpuscular, Newton podía explicar el reflejo de la luz como un rebote y la refracción a partir de un hipotético giro de las partículas, pero tenía argumentos muy pobres para el caso de la difracción.

Aunque los argumentos del buen Christiaan eran excelentes, sus ideas no lograron imponerse. Su error no solo fue «ponerse con Sansón a las patadas»,¹² sino que en su encarnada disputa llegó a cuestionar uno de los aportes más reconocidos del temperamental Newton: la Ley de Gravedad. Por poner en entredicho una teoría de validez probada se echó la soga al cuello, y muchos científicos ya no tomaron en serio la eficaz propuesta ondulatoria. Al menos en apariencia, Newton salió triunfante.

Pero solamente era el primer *round*, todavía faltaba mucho desarrollo a esta pelea entre las ideas de onda y las de partícula. El segundo encontronazo fue organizado por un médico inglés, Thomas Young, a inicios del siglo XIX, mucho tiempo después de la muerte de los dos genios. Aunque Young era un cuate bastante inteligente, formado

12. Al momento del debate, Newton ya era considerado como toda una eminencia y contaba con numerosos seguidores.

en las mejores escuelas, no tenía muchos pacientes. Era muy malo expresando sus ideas, generalmente parecía estar hecho bolas y eso le daba muy poco crédito entre su potencial clientela. Como había heredado una fortuna considerable, el dinero no le preocupaba mucho y podía darse el lujo de pasar sus días observando y realizando experimentos en la Royal Society.¹³

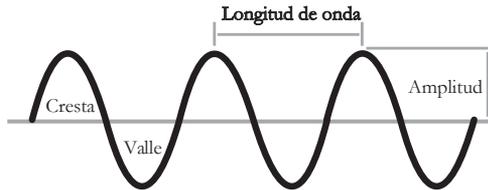
Generalmente, sus presentaciones eran un bodrio total, estaban entre las más aburridas que se podían encontrar. Pero después de muchos intentos, 38, para ser exactos, el desafortunado médico dio en un clavo que le permitió pasar a la historia: el experimento de la doble rendija, mejor conocido como «experimento de Young». Consiste en colocar una fuente de luz —como el Sol, una vela o una lámpara— y frente a ella una barrera que tiene dos pequeñas rendijas; a través de ellas pueden pasar los rayos luminosos y llegar hasta una pantalla que se encuentra del otro lado. Las aperturas son muy finas y se deben encontrar realmente cerca una de la otra, a menos de un milímetro.

A partir de las ideas de Newton, sería lógico pensar que al realizar el experimento la luz formaría dos manchas en la pantalla —correspondiente cada una a las partículas que pasaran por las respectivas ranuras. Pero no fue así. En realidad se mostraba una serie de franjas claras y oscuras a lo largo de la pantalla, era un patrón de interferencia. ¿Un qué?

Cuando dos ondas se cruzan hacen más que empalmarse: interfieren entre ellas. Si en la interferencia coinciden una cresta con otra, o un valle con otro, la onda se

13. Se trata de una de las principales instituciones científicas de toda la historia, pionera como espacio de intercambio académico y escenario de demostraciones empíricas. Ahí se reunían científicos consumados y aficionados para compartir ideas, conocimientos o, simplemente, para divertirse con experimentos. Tanto Huygens como Newton fueron miembros de la Royal Society; de hecho, el inglés llegó a presidirla.

Características de las ondas



Ciclo: es una oscilación completa, con una cresta y un valle.
Frecuencia: número de ciclos completos por unidad de tiempo.

Interferencia de ondas

Cuando dos ondas se superponen, se genera una onda resultante, que tiene mayor o menor amplitud según el acomodo.

Constructiva: las ondas están en fase, se refuerzan y aumenta la amplitud.

Destructiva: ciclos desfasados, se anulan y disminuye la amplitud.



Diagrama del experimento de Young

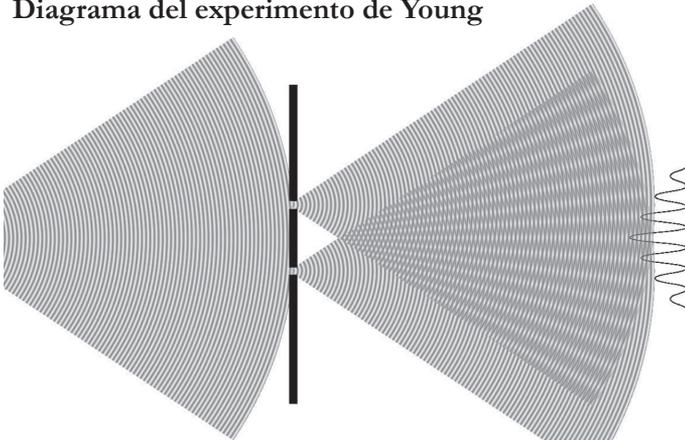


Imagen tomada de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fentes_young.jpg
usuario: Tatoute crédito: *l'expérience des fentes d'Young*

refuerza y aumenta su intensidad. Por el contrario, cuando se encuentran una cresta y un valle, la interferencia es destructiva, las ondas se anulan y la luminosidad disminuye o desaparece.

Después de pasar por las rendijas, la luz se difracta, empieza a abrirse hasta llegar a la pantalla y a cubrir áreas considerablemente mayores a las de las aperturas. Hay un área donde la proyección de los dos haces coincide y precisamente es donde se encuentra el patrón de secciones claras y oscuras.

Como cada rayo recorre una distancia ligeramente diferente para llegar a la pantalla, el tiempo de viaje cambia y la fase de la onda varía en cada caso (unas veces llegan crestas, otras valles y también puntos intermedios). Hay lugares donde las ondas provenientes de una ranura refuerzan a las de la otra para mostrar una franja de gran luminosidad; en otros se anulan y aparece una raya oscura.

Con este resultado, Young demostró que la luz es una onda, le dio la razón a Huygens de la única forma en que podía realmente hacerse: con evidencia experimental. Aunque algo tarde, le llegó el reconocimiento a la teoría del holandés y todo mundo, aun los más apasionados seguidores de Newton, reconocieron como válida la visión ondulatoria.

Solo que quedó en el aire una pregunta latente: la luz es una onda, pero ¿una onda de qué? Cuando lanzamos la piedra al estanque, la onda se forma con la perturbación en el agua, al hablar perturbamos el aire y el sonido viaja en todas direcciones. Entonces, ¿cuál es el medio en el cual se propagan las ondas de luz?

El cuestionamiento era especialmente válido si se trataba de explicar cómo podía llegar hasta nosotros la luz del Sol, pues aparentemente no existía ningún medio material entre nuestra estrella y la Tierra. Los científicos se sacaron de la manga el medio necesario para la existencia

de las ondas luminosas: el éter, una sustancia hipotética que estaría en todos lados, aún en el espacio, y sería muy escurridiza; no importaría si se saca todo el aire de un recipiente con una bomba, aún estaría lleno de éter. Sin embargo, aunque contaba con un gran número de seguidores, la del éter no dejaba de ser una propuesta sin ningún fundamento experimental.

Aún vendrían más descubrimientos importantes, sobre todo referentes al espectro luminoso. Prácticamente en la misma época de Young se realizaron dos nuevos hallazgos que ayudaron a enriquecer el conocimiento de la luz.

El primero corrió a cargo de William Herschel, un músico alemán radicado en Inglaterra a quien la pasión por la astronomía lo llevó a convertirse en un talentoso científico aficionado. Era sumamente hábil para fabricar telescopios, construyó los mejores de su tiempo y con ellos pudo explorar el cielo como nunca antes se había hecho. Su salto a la fama se dio por el descubrimiento del planeta Urano.¹⁴

Originalmente, Herschel lo bautizó como *Georgius Sidus* (El Planeta de Jorge) en un esfuerzo por hacerle la barba al Rey Jorge III de Inglaterra, quien acababa de perder las colonias americanas¹⁵ (Estados Unidos). Ser lambiscón valió la pena, pues Su Majestad le otorgó un puesto con derecho a sueldo en la Royal Society. Más tarde llegó a ser el Astrónomo Real de la Corte, lo cual le garantizó ser constantemente patrocinado por el Rey. Siguió realizando descubrimientos astronómicos con ayuda del telescopio de 1.2 metros que él mismo construyó y que fue, durante 50 años, el más grande del mundo.

14. Nombre del padre de Saturno y abuelo de Júpiter en la mitología romana, que en inglés tiene un poder alburero impresionante.

15. Como dice Tita Michel, qué le importaba perder unas tristes colonias si ahora tenía un planeta para el solito. Sobre todo, un planeta más grande que la Tierra.

El aporte que nos interesa no tiene que ver directamente con sus estudios celestes. Corría 1800 cuando, a sus 63 años, a William se le ocurrió hacer estudios sobre el calor. Uno de ellos tenía que ver con el espectro de la luz; armado de un termómetro, se dedicó a establecer cuál es el color más caliente. El violeta resultó ser el más frío de todos y la temperatura mostró un aumento gradual conforme pasó por el azul, verde, amarillo y rojo. Cuál sería su sorpresa cuando colocó el termómetro al lado de éste último color: donde no se veía nada, la temperatura aumentó aún más. Tenía que haber algo ahí, una forma de luz invisible. El rojo es el color con la frecuencia más baja, y como el nuevo componente del espectro tendría que ser menor, se le llamó infrarrojo.

Un año más tarde llegó Johann Ritter a decirnos que existían también rayos invisibles del otro lado del espectro. Se encontraba trabajando en los efectos de la luz sobre sales de plata, parecidas a los materiales usados después para hacer fotografías. De forma semejante a lo hecho por Herschel, trató de ver los efectos de cada color y se dio cuenta de que junto al violeta había algo desconocido hasta entonces: el ultravioleta.

Se trata de rayos con mayor frecuencia, o sea, con más energía que los de la luz visible. Es precisamente esa energía la que los hace dañinos. Ojo, chicas y metrosexuales: el 80% de las arrugas que las personas desarrollan en su vida son por culpa del ultravioleta; asimismo, es el causante de cáncer en la piel. Por eso es una muy buena idea protegernos —con filtros (cremas) y ropa— de la exposición a estos rayos que el Sol nos manda todo el tiempo.

Coincidió que en la misma época, en 1803, para ser más precisos, John Dalton planteó su teoría atómica. Propuso que todos los elementos químicos están formados de partículas indivisibles —los átomos— y que estas son características de cada elemento. El hidrógeno, oxígeno, oro

y carbón, así como todos los demás, tendrían un tipo diferente de átomo cada uno. En apariencia, la idea planteada por Dalton no tenía nada que ver con la luz, pero pronto aparecerían puntos de coincidencia.

En 1814, el vidriero alemán Joseph Von Fraunhofer realizó experimentos combinando un telescopio con un prisma y realizó una observación inédita: se le apareció algo en el espectro. No era una presencia fantasmal, pero sí algo inexplicable. El cambio entre las franjas de colores no se realizaba de forma continua, como se creía hasta entonces, sino que había líneas oscuras en diferentes partes. ¿Qué significaba esto?

Ya sabemos que la luz es una onda, también nos damos cuenta de que los colores del espectro corresponden a diferentes frecuencias. La más baja es la del rojo y, conforme aumenta la frecuencia, va apareciendo la gama cromática. Fraunhofer descubrió la ausencia de algunas frecuencias. Esto sucedía con la luz del Sol, pero ¿qué sucedería si aplicaba el mismo estudio a los rayos procedentes de otros astros? Lo aplicó a la Luna y el resultado era idéntico, lo mismo sucedió con los planetas; así, corroboró que la luz que nos llega de estos cuerpos es reflejo de la luz del Sol. Cuando aplicó el procedimiento a otras estrellas, las líneas siguieron apareciendo, pero ya no estaban en el mismo lugar. ¿Quién se estaba robando los colores? ¿Y por qué en unos casos tomaba unos y en casos diferentes otros?

Sucede que cuando la luz pasa a través de un medio, las ondas no lo atraviesan por completo: los átomos de la sustancia absorben parte de los rayos, cada elemento absorbe diferentes frecuencias. En el caso del Sol, en el núcleo se produce un espectro continuo pero, al salir, parte de la luz no pasa y se queda en los átomos de las capas exteriores de gas. Entonces, los átomos de esa parte del Sol son los ladrones que se quedaron con las frecuencias desaparecidas.

Cuando se analiza el espectro de las otras estrellas, se encuentran líneas en otras posiciones porque están hechas de gases diferentes. Sus átomos absorben frecuencias distintas. Esto quiere decir que cada elemento absorbe una parte del espectro diferente a la que retienen todos los demás. ¡Fraunhofer descubrió la huella digital de los elementos químicos!

Aunque lo de huella digital suena genial, el nombre científico de las franjas observadas es «espectro de absorción». Algunas décadas después, nos dimos cuenta de que existe lo contrario: hay también un «espectro de emisión». Los átomos no son unos rateros, después de todo; así como a veces se roban las frecuencias también llegan a devolverlas.

Esto lo descubrieron Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen con experimentos sumamente interesantes, por no decir divertidos. Se dedicaron a quemar diferentes materiales y a hacer pasar la luz emitida por un espectroscopio.¹⁶ Los espectros obtenidos estaban invertidos: solamente tenían algunas líneas de color sobre un fondo oscuro. El gran descubrimiento fue que, para cada elemento, las frecuencias emitidas al calentarlo coincidieron exactamente con las que habían sido absorbidas al pasar la luz por él. La cosa empezaba a embonar.

Luego de identificar las características de muchos elementos y descubrir algunos nuevos, fueron incluso capaces de identificarlos a distancia; en el incendio de una bodega, ubicada a quince kilómetros de su laboratorio, lograron saber qué tipo de material se estaba quemando con base en las líneas espectrales. De igual manera fue posible identificar los elementos que conforman las estrellas y establecer que son los mismos encontrados en la

16. Una versión más refinada del arreglo creado por Fraunhofer, dedicado específicamente a la observación de las líneas existentes en los espectros.

Tierra. Debe haber sido muy emocionante demostrar que todo el Universo está hecho de los mismos materiales; recordemos que antes de este hallazgo no había nada que lo probara.

A finales del siglo XIX, animados por la serie de descubrimientos espectrales, muchos científicos se dedicaban a estudiar las líneas de absorción y emisión de los diferentes átomos. Se les conocía cada vez mejor e incluso se logró construir fórmulas para intentar predecir el comportamiento de los elementos más ligeros.

En 1885, el maestro suizo Johann Balmer hizo alarde de su capacidad matemática, así como de su tiempo libre, al crear una ecuación que predice la longitud de onda¹⁷ de las líneas en la serie del hidrógeno —después llamada serie de Balmer—. Además de ajustarse a las líneas conocidas, logró predecir con éxito otras que se encontraron poco después.

Si bien se llegó a conocer a fondo el comportamiento de cada elemento en cuanto a la absorción y emisión de luz, nadie lograba explicarlo. Era un misterio cómo cada átomo podía emitir ciertas frecuencias específicas y no otras. Además, se había notado que unas líneas eran mucho más intensas que otras, pero tampoco había quien ofreciera una explicación de tal suceso.

Más adelante entraremos a estos asuntos, esenciales para la física del siglo XX, pero antes vamos a conocer a fondo el árbol genealógico de la luz. Aunque ya hemos presentado al infrarrojo y al ultravioleta, nos falta conocer a la mayor parte de su familia. Es hora de la aparición en escena del espectro electromagnético.

17. En el estudio de la luz, decir frecuencia y longitud de onda resulta equivalente; no porque sean lo mismo, sino porque con una podemos obtener la otra. Para sacar la frecuencia de un color basta dividir la velocidad de la luz entre la longitud de onda y viceversa. A Balmer le fue más fácil hacer su ecuación con longitudes de onda y por eso está en esta forma.

Ámbar y Magnesita

Se fue la luz. Ah, qué cosa tan molesta. Estaba por sentarme a ver un juego de mi equipo favorito — los gloriosos Pumas de la UNAM— pero la televisión no prendió. Revisé el refrigerador, el microondas, la computadora y ninguno encendía. No había luz en la casa... ¡carajo, se me olvidó pagarla! Ni hablar, nada de juego y vamos a la Comisión a ponernos a mano para recuperar el preciado servicio.

Al hacer fila para pagar en el cajero automático me puse a reflexionar en dos cosas. En primer lugar, aparentemente yo no era el único despistado a quien le cortaron el servicio, y segundo: ¿qué tiene que ver la luz con aparatos como la tele, la licuadora o una computadora?

Digo, si no prenden por falta de luz, entonces bastaría con sacarlos a que les dé el Sol y así podrían funcionar. Ajá, seguro que eso va a funcionar. Aunque proviene de ideas que escuchamos con frecuencia, la propuesta es bastante ridícula. Debe haber por ahí una confusión de términos.

Sucede que muchos de nosotros al referirnos a «la luz» en realidad hablamos de la energía que recibimos mediante cables conectados a nuestras casas; la que hace funcionar los aparatos que tenemos en ellas. Si bien una gran parte de esa energía sirve para hacer funcionar focos, en realidad lo que llega no es luz.

Se trata de electricidad, lo que alimenta nuestros aparatos, la chispa que hace posible el funcionamiento de la tecnología que empapa nuestras vidas: celulares, cámaras,

computadoras, televisores, refrigeradores, reproductores de música y video, planchas, relojes, lámparas, consolas de videojuegos, termómetros, ventiladores, hornos, cafeteras, controles remotos, tostadoras, fotocopiadoras, impresoras, carros y una larga lista de etcéteras.

La electricidad es sin duda una maravilla. Nada más y nada menos. Hace miles de años que los humanos nos sentimos fascinados con ella; desde el inicio ha atraído poderosamente nuestra atención, aún cuando no teníamos la menor idea de cómo aprovecharla. Existen referencias de su estudio desde la antigua Grecia: cuentan que Tales de Mileto —hace unos 2600 años— se dio cuenta que cuando frotaba una barra de ámbar¹ con lana podía atraer objetos livianos.

Aunque no todos tenemos este material en nuestras casas, no lo necesitamos para experimentar con la electricidad de forma directa.² Basta frotarse el cabello con un globo inflado para observar el efecto de la electricidad: nos deja «los pelos parados». Con un poco más de observación se puede notar que el globo atrae pedazos de papel, pelusas y otros objetos ligeros. Tanto el cabello como el globo están cargados.

Esto no quiere decir que tengan mucho peso encima, o municiones en su interior —como un arma cargada— sino que se han electrificado. La carga eléctrica de los cabellos hace que se rechacen unos a otros, lo cual los separa y los mantiene erizados. De igual forma, si acercamos dos globos cargados también ejercen una fuerza repulsiva entre ellos y se separan. En cambio, si acercamos un globo cargado al cabello, hay una atracción mutua.

1. Siempre me dio la impresión de que el término electricidad habría surgido de algo muy sofisticado o avanzado, pero viene, precisamente, del ámbar, una resina amarilla de origen fósil, cuyo nombre en griego es *elektron*.

2. ¡No!, no me refiero a meter los dedos a un enchufe. Sí es una forma de experimentar, pero no la recomiendo en lo más mínimo, es peligroso y muy desagradable... me han dicho.

Lo anterior se debe a la existencia de dos tipos de electricidad, a una se le llama positiva y a la otra negativa. Las cargas iguales se rechazan, mientras las diferentes se atraen. Esa misma atracción se encarga de mantener un equilibrio; toda la materia tiene la misma cantidad de cada tipo de carga y por eso, en condiciones normales, no percibimos su efecto. Para lograr separar las cargas necesitamos aplicar una fuerza, esto comúnmente se hace mediante frotación; en el proceso, la carga negativa se desprende de un objeto y pasa al otro. Así, el que la suelta queda positivo y el que la recibe, negativo.

Los cuerpos no se mantienen cargados por mucho tiempo, la electricidad tiende a nivelarse y el exceso de carga pronto pasa a los objetos que tienen menos. La electricidad, en este sentido, es una de las cosas más equitativas del mundo.³

Por eso es común darnos «toques»⁴ con otras personas. Cuando alguien está cargado eléctricamente y toca a otro individuo, la carga se distribuye; en el momento en que pasa de un cuerpo a otro sentimos una descarga. Esto no solo aplica con personas, también sucede con objetos; un rayo es básicamente el proceso en que una nube le da toques a la Tierra. También la Tierra puede darle toques a la nube; los rayos no siempre van de arriba hacia abajo. Una nube con carga positiva induce —es decir, atrae— carga negativa en una región cercana del suelo y, cuando se acumula suficiente electricidad, ocurre una descarga de abajo hacia arriba.

3. Cuando una persona tiene mucho dinero, su fortuna no se distribuye automáticamente en su entorno; de hecho, generalmente sucede lo contrario. Asimismo, alguien con muchos conocimientos no los comparte de forma automática con su entorno (hay quienes sí lo hacen, pero muchos nunca se esfuerzan lo más mínimo en este sentido). La electricidad no es así, siempre se distribuye entre todos los cuerpos en contacto hasta alcanzar el equilibrio.

4. No sean mal pensados, estamos hablando de electricidad.

Entre mayor es la cantidad de carga en un cuerpo se dice que tiene un mayor potencial, o voltaje. Si existe un potencial alto, la repulsión de las cargas iguales —positivas con positivas o negativas con negativas— genera una fuerza para separarlas unas de otras. Cuando dos cuerpos entran en contacto, la carga eléctrica pasa de uno a otro hasta que ambos tienen el mismo potencial.

Es como lo que ocurre si se conectan dos tinacos por la parte inferior, uno lleno de agua y uno vacío: el líquido fluye de uno al otro hasta que tienen el mismo nivel; solamente que en este caso, en lugar de agua, tenemos electricidad. Hay que resaltar que en este tipo de procesos no es tan relevante el voltaje específico de un cuerpo, lo importante es la diferencia de potencial entre los objetos involucrados. Lo mismo pasa en los tinacos, no necesariamente importa la cantidad de agua, sino la diferencia de altura entre el nivel del líquido en su interior.

De cualquier forma, la electricidad no pasa automáticamente de un objeto al otro. Se necesita un conductor, un material que permita su flujo. Los mejores materiales para esto son metales como la plata, el oro y el cobre (aunque los dos primeros son los mejores, el último se usa mucho más por ser más económico). El aire no es un buen conductor, por lo que se necesitan voltajes muy grandes —como en un rayo— o distancias muy pequeñas —como la que separa la mano de dos personas al darse un toque— para que se produzca una descarga.

Cuando dos cuerpos con una diferencia de potencial se ponen en contacto a través de un conductor se crea una corriente eléctrica, un flujo de carga que va del que tiene más al que cuenta con menos. Normalmente, una descarga se lleva a cabo en una pequeña fracción de segundo, pero si queremos hacer funcionar aparatos se necesita un flujo constante.

En las tomas de corriente, o sea, los enchufes eléctricos, hay una diferencia de potencial entre las dos ranuras. Al conectar un aparato —por ejemplo la tele— la electricidad fluye a través de él y lo hace funcionar al usarlo como camino para ir de una ranura a la otra.

Allá por el siglo XVIII —época en que se empezaron a entender mejor estos fenómenos— no parecían existir grandes aplicaciones de la electricidad, era más bien una curiosidad. En ese entonces, todo mundo estaba entusiasmado con las máquinas de vapor y pocos investigadores le encontraban mucho sentido a dedicarse a otra cosa.

Pero, como siempre sucede, el mundo y el futuro pertenecen a aquellos que se atreven a ir más allá y a salirse de lo que todos están haciendo para buscar cosas nuevas. Quizá en aquella época la electricidad no prometía mucho porque la mejor forma de producirla se encontraba en procesos químicos como los de las pilas, que no producían voltajes suficientes para hacer gran cosa. Les faltaba potencia.

Eso lo podemos ver en la actualidad con las baterías comunes; solamente sirven para aparatos con un bajo consumo de energía. Consisten en un ácido que se encuentra en contacto con dos placas de diferentes materiales, como Zinc y Carbón —comunes en las pilas comerciales— o Níquel y Cadmio —que se usan en las recargables—. La reacción hace que un material ceda electricidad negativa al ácido y el otro la reciba de él. Al conectar los dos metales con un conductor se crea una corriente; la conexión (o circuito) se hace a través de un aparato por el cual pasa la electricidad para hacerlo funcionar. El término «pila» surgió porque originalmente no se usaba solo una placa de cada metal, se *apilaban* varias capas para lograr un mayor voltaje.

La cosa cambió radicalmente a inicios del siglo XIX, cuando se descubrieron fenómenos que revolucionaron

la forma de producir electricidad e impulsaron el desarrollo de nuevas aplicaciones. Pero antes de meternos a este asunto, necesitamos platicar de un fenómeno parecido al eléctrico, aunque por mucho tiempo no se pensó que estuviera relacionado con él: el magnetismo. Casi todos lo conocemos a través de los imanes, objetos con los que seguramente hemos jugado más de una vez o —cuando menos— nos han servido para detener cosas en los refrigeradores. El magnetismo también se conoce desde la antigüedad y su nombre viene de la ciudad de Magnesia de Tesalia, donde se cree que fueron encontrados los imanes por primera vez. Ahí se observó que algunas piedras podían atraer pedazos de hierro, pegándose literalmente a ellos. Hasta donde sabemos, el propio Tales de Mileto —a quien le interesaban bastante estos asuntos atractivos y repulsivos— fue el primero en estudiar este fenómeno.

A diferencia de la electricidad —la cual permite tener un objeto con carga positiva sin que necesariamente tengamos otro con negativa en el mismo lugar— en los imanes siempre encontramos dos polos inseparables: norte y sur. La forma en que interactúan los polos de dos o más imanes también se parece mucho a la que acabamos de comentar sobre las cargas: los polos iguales se rechazan y los diferentes se atraen.

El magnetismo encontró un uso práctico en la navegación, mucho antes de que la electricidad mostrara sus aplicaciones útiles. Sucede que nuestro planeta se porta como un imán gigante y sus polos prácticamente coinciden con los polos geográficos. Entonces, una aguja imantada que pueda girar con facilidad siempre apuntará al norte de la Tierra. En eso consiste la brújula; un aparato muy útil para la orientación geográfica de los seres humanos.

Al darse cuenta de todo esto, uno podría decir «mira qué bonito: las cargas y los polos se parecen». Hasta aquí,

la semejanza entre los fenómenos eléctricos y magnéticos parecería quedar en lo anecdótico, sin embargo cuentan con una íntima relación. El primer paso formal para develar este vínculo fue dado en 1820 por el físico danés Hans Christian Oersted quien, en sus investigaciones, se percató de algo sumamente curioso: acercó una brújula a un alambre por el cual pasaba una corriente eléctrica y la aguja dejó de apuntar al norte, se acomodó formando un ángulo de 90 grados con el alambre. Cuando interrumpió el flujo de electricidad, la brújula volvió a apuntar al norte. No había duda: Oersted descubrió que donde hay una corriente eléctrica aparece un comportamiento magnético.

Tan solo tres años después, William Sturgeon consiguió lo que para su época podría ser considerado una hazaña tecnológica:⁵ construyó un imán artificial. Alrededor de un núcleo de hierro hizo una bobina —es decir, enrolló alambre— y lo conectó a una pila para establecer una corriente eléctrica. Con todas las vueltas, el «poder magnético» aumentó de forma considerable e hizo que el hierro se comportara como imán.

Por aquella misma época, Sir Humphry Davy —un prolífico investigador inglés— había logrado importantes avances en la producción de electricidad a partir de procesos químicos. Construyó pilas de gran potencia e incluso, con procesos eléctricos, separó múltiples elementos químicos.⁶ Sin embargo, aún estaba por realizar su aporte más grande a la ciencia, uno fundamental para el desarrollo de la teoría electromagnética: Davy descubrió a Michael Faraday.

En 1812, Faraday, de 21 años, le hizo llegar un libro basado en las notas que había tomado en una serie de cuatro conferencias que Davy dictó en la Royal

5. Aunque hoy en día cualquier niño de primaria puede repetirla. Solamente necesita un clavo, alambre de cobre y una batería eléctrica.

6. De hecho, fue el primer científico en identificar el cloro.

Institution.⁷ El joven, nada tonto, aprovechó el envío para pedirle chamba como su asistente. La respuesta del científico a Michael no se hizo esperar, fue muy amable aunque no se comprometió a nada en el aspecto laboral; fue algo así como el clásico «no nos llame, nosotros le hablamos».

Sin embargo, poco tiempo después, Humphry sufrió un accidente en el laboratorio y, al verse en la necesidad de contratar un secretario para seguir con sus investigaciones, pensó inmediatamente en el entusiasta muchacho que recién le había escrito. Con esto se abrió la posibilidad de acceso a la ciencia para un joven brillante pero que —considerando su origen humilde— difícilmente pintaba para convertirse en una luminaria científica.

Faraday nació en los suburbios del sur de Londres y fue el tercero de diez hijos. Su padre era herrero de profesión y, pese a sus mayores esfuerzos, no pudo sostener más que los estudios básicos de Michael. En aquel entonces, una formación universitaria solamente era accesible para los ricos.⁸

A partir de ahí, Michael se hizo prácticamente autodidacta, cosa que fue ayudada en gran medida por su trabajo como aprendiz de encuadernador de libros. Aunque él solamente debía dedicarse a las portadas, ahí aprovechó la oportunidad para leer cuanto libro se le ponía enfrente, con un especial interés por los temas científicos. Por eso no lo pensó dos veces cuando se le presentó la oportunidad de ir a las pláticas del célebre Humphry Davy. Su

7. Se trata de una organización dedicada a impulsar el avance de la ciencia, pero con una visión mucho más abierta que la de la Royal Society. Prueba de su vocación de divulgación son las conferencias que atrajeron a Faraday quien, por cierto, se encargó —más adelante— de dar un mayor auge a estas actividades.

8. Los científicos eran como mínimo de clase media alta, con un caudal financiero que les evitaba preocuparse por trivialidades como casa, vestido o comida, para dedicarse a lo realmente importante: divertirse intentando explicar la naturaleza.

entusiasmo lo llevó a hacer mucho más que asistir y escuchar: tomaba abundantes notas en las conferencias, luego las transcribía en su casa e incluso les añadía diagramas para dar claridad a las ideas. Al culminar ese trabajo tenía un «tumbaburros» de 300 páginas, del cual envió una copia al distinguido investigador; como ya vimos, la suerte lo favoreció y se hizo de un espacio como su secretario.⁹

Faraday no desaprovechó la oportunidad e hizo del laboratorio su vida. Básicamente, inició como aprendiz, o chalán, y se esforzó por destacar en todo cuanto pudo. Incluso su labor trascendió el apoyo en las actividades experimentales; para apoyar al máximo a su maestro llegó a hacerla de sirviente de Davy en sus viajes: cuando empezaba como asistente, su jefe tenía en puerta una gira alrededor de Europa; el mayordomo de Davy se negó a acompañarlo, así que Michael —quien originalmente solamente iría como apoyo académico— le entró al quite.

En el viaje sufrió muchos desplantes por parte de la esposa de su patrón:¹⁰ se vio obligado a viajar fuera del vagón en que iba Davy, así como a comer con la servidumbre en los eventos a que asistían; lo hacía sentir como una persona de segunda. Aunque esto caló hondo en Michael, aguantó a pie firme y en el viaje aprovechó la estimulante oportunidad de conocer a los más distinguidos hombres de ciencia de su época.

Al regresar a Inglaterra, su aguda inteligencia y constancia en el trabajo pronto le permitieron pasar de asistente a colaborador de Davy. Se mostró como un científico de gran valor, desempeñándose esencialmente en la línea de trabajo de electroquímica manejada por su mentor.

9. Lo cual no fue muy conveniente en un inicio desde el punto de vista económico. Faraday ganaba más dinero encuadernando libros que como asistente de Davy en la Royal Institution.

10. Jane Apreece, una mujer bastante estirada y alzada. No consideraba al joven asistente de su esposo con la clase suficiente como para convivir con ella.

Sin embargo, también tenía un ávido interés por los imanes. Se le ocurrió la idea de esparcir limadura de hierro sobre una hoja de papel y colocar un imán debajo de ella; así notó la existencia de lo que llamó un campo de fuerza invisible, el cual se podía observar a través de líneas formadas por la limadura, que van de un polo al otro, y a las cuales llamó «líneas de fuerza». Estableció la existencia de un «campo magnético» alrededor de los imanes, a través del cual ejercen influencia sobre la región del espacio que los rodea.

De forma semejante, Faraday señaló la existencia de un «campo eléctrico» alrededor de cualquier carga. Las fuerzas de atracción y repulsión experimentadas por las cargas eléctricas serían una consecuencia de la acción de los campos sobre ellas, algo así como los mensajeros, que permiten que una carga sepa que en su entorno hay otra carga.

Michael ya había tomado impulso en las investigaciones de electricidad y magnetismo. Luego, inspirado por el descubrimiento de Oersted del campo magnético generado por una corriente, puso su atención en la unión de estos dos temas. Al hacerlo, se planteó un razonamiento por demás interesante: si la electricidad es capaz de crear un campo magnético, sería lógico pensar que a partir de un campo magnético se logre producir electricidad. Tras realizar algunos experimentos se dio cuenta de que, para generar una corriente, las líneas de fuerza deben atravesar un material conductor; el campo magnético tiene que variar. Todo cambio en el campo magnético produciría un campo eléctrico, el cual haría aparecer una corriente en el conductor.

Con el afán de respaldar esta idea, Faraday realizó un experimento a la vez sencillo y genial: introdujo un imán en una bobina de alambre conectada a un detector y mostró que la corriente eléctrica solamente se producía cuando lo movía. Había corriente solo mientras se desplazaba

el imán hacia el interior o el exterior de la bobina, pero si estaba quieto con respecto a ella, no se producía nada.

De esta manera demostró la existencia de la inducción electromagnética y estableció la forma más práctica de producir corrientes eléctricas, al menos hasta lo que sabemos ahora. Faraday terminó la «faena» de forma espectacular: él mismo construyó el primer generador basado en este principio, un dispositivo capaz de convertir el movimiento en electricidad. El aparato consistía, *grosso modo*, en una rueda hecha de alambre de cobre, la cual podía girar sobre un eje; al moverse, la parte superior pasaba cerca de un poderoso imán. Así, en su movimiento, la rueda atravesaba las líneas de campo del imán, generando una corriente eléctrica que podía ser extraída a través de los extremos del alambre.

Actualmente, casi toda la electricidad producida a nivel mundial se genera con dispositivos que derivan de este primer diseño.¹¹ No importa si el movimiento procede del impulso del agua en una presa, de las corrientes de aire que llegan a un cerro, de quemar cosas o dividir núcleos atómicos, la idea de Faraday está detrás de prácticamente toda la energía que llega a nuestras casas.

Este aporte es suficiente para darle una gran fama a cualquiera, pero la cosa no paró ahí. Michael siguió trabajando y produciendo importantes avances científicos por más de tres décadas. Por ejemplo, descubrió que un campo eléctrico no puede penetrar en un conductor; cuando un campo eléctrico actúa sobre un material de este tipo lo polariza, es decir, hace que en la superficie las cargas negativas se acomoden de un lado y las positivas del otro, lo cual genera un campo que neutraliza el que viene de afuera. Así, el campo eléctrico dentro de un conductor

11. Las únicas excepciones son las baterías, con sus procesos químicos, y las celdas solares, las cuales funcionan en base al efecto fotoeléctrico que veremos más adelante.

siempre es cero, de donde surge el principio de funcionamiento de la Jaula de Faraday.¹²

Pues bien, decíamos que Michael siguió trabajando de forma incansable, logrando un prestigio considerable. Gracias a este prestigio, llegó a ser presidente de la Royal Institution, donde se mostró como un apasionado impulsor de la divulgación científica. Era de esperarse: él mismo recibió la oportunidad de acceder a la ciencia gracias a la labor de divulgación de Davy.

Sin embargo, pese a su incuestionable grandeza, en su formación faltó un elemento muy importante; de hecho, nunca logró compensarlo del todo: aun con toda su capacidad e inteligencia, le faltaban las matemáticas para dar más soporte a sus ideas, más *punch* científico a sus descubrimientos.

No tardó mucho en llegar otro investigador que logró completar su labor en este punto. James Clerk Maxwell supo darle la estructura necesaria al trabajo de Faraday — así como al de algunos otros científicos— para llevarse la gloria y pasar a la posteridad, al acomodar las ideas en un conjunto de ecuaciones que llevan su nombre.

Muchas personas dirán: «Ecuaciones, *guácala*, ¿a poco se hizo famoso por eso?». Pensar así resulta normal, es bastante común encontrar personas con miedo a las ecuaciones, pues se ven como cosas complicadísimas; además, nos obligaban a resolverlas en la secundaria y la prepa aunque no parecen servir para gran cosa.¹³ Sin embargo se trata de artilugios muy útiles para la ciencia. En una ecuación, los científicos encuentran la posibilidad de dar más estructura a sus cálculos, hacer predicciones y dar mucha información en poco espacio.

12. Aclaremos las cosas, porque el nombre se presta a confusiones. No se trata de una jaula creada por el ilustre científico para encerrar a los que le caían mal. Es un aparato usado para encerrar, o dejar afuera, los campos electromagnéticos. Puede aprovecharse para evitar que la señal llegue a un teléfono celular encerrado en su interior o para impedir que campos peligrosos salgan de un horno de microondas.

13. Aparte de hacernos la vida miserable, claro.

Por ejemplo, la Ley de Coulomb es $F=K (q_1 \cdot q_2)/r^2$; en ella F representa la fuerza eléctrica, q_1 y q_2 son las cargas de dos cuerpos interactuando entre sí, r es la distancia que los separa y k es una constante que tiene que ver con las condiciones del medio donde se realiza la interacción y las unidades de medida usadas.

Si tratamos de expresar lo mismo en palabras, esta ley nos dice que la fuerza eléctrica existente entre dos cuerpos depende directamente de la multiplicación de sus cargas, y tiene una relación inversa con el cuadrado de la distancia. Entre más lejos estamos menos fuerza hay, pero la disminución no es lineal: si duplicamos la distancia, la fuerza solamente será una cuarta parte de la original, si la triplicamos será una novena, y así sucesivamente. Finalmente, el signo del resultado también tiene importancia; al obtener un número positivo, la fuerza será de repulsión (porque habríamos multiplicado dos cargas iguales, positivas o negativas), mientras que un número negativo indicará atracción (por ser cargas diferentes).

Ah, ¿verdad? Ahora vemos cómo las ecuaciones nos permiten ahorrar un gran rollo. Además, pueden desarrollarse de forma lógica para develar aspectos de la naturaleza aún sin descubrir. Por eso los científicos se apoyan mucho en estas herramientas, para potenciar y agilizar su labor. Solamente es cosa de perderles el miedo y acostumbrarse a la forma en que nos plantean las ideas para tomarles un poco más de cariño.

Alto, no se preocupen, no cierren el libro y mucho menos lo quemén, no crean que a partir de aquí me la pasaré sacando ecuaciones a diestra y siniestra. Aunque me parecen un artilugio genial para la ciencia, en lo que queda del presente texto revisaremos las ideas evitando meternos en el análisis de las ecuaciones detrás de ellas. Solamente era necesario recalcar la importancia de convertir las ideas de Faraday en planteamientos matemáticos; así

podemos dimensionar la relevancia de las Ecuaciones de Maxwell (EDM).

Algo muy curioso es que llevan su nombre aunque solamente una de esas ecuaciones tiene una idea científica atribuible al buen James Clerk, y pese a que él no desarrolló las ideas parece haberse quedado con una muy buena parte del reconocimiento. Su mérito radica en la unión que logra para dar forma a una sola teoría que resultó en predicciones espectaculares.

Las EDM consisten en cuatro planteamientos que nos ayudan a resumir toda la teoría electromagnética:

1. La Ley de Gauss explica cómo se produce el campo eléctrico alrededor de una carga. El campo apunta hacia afuera en una carga positiva y hacia adentro en una negativa. El flujo de campo eléctrico en una superficie cerrada imaginaria (llamada Gaussiana) es proporcional a la carga contenida en su interior.

2. La Ley de Gauss para el magnetismo establece que no existen monopolos magnéticos. Ya lo dijimos antes: donde quiera que hay un polo norte existe siempre un polo sur. Para este caso, el flujo a través de una superficie Gaussiana es siempre cero (el que entra gracias a un polo se compensa con el que sale por culpa del otro).

3. La Ley de Faraday ya la vimos en detalle; se refiere a cómo la variación de un campo magnético puede inducir un campo eléctrico.

4. La Ley de Ampere se refiere a la generación de campos magnéticos. Originalmente, Ampere estableció que los campos magnéticos aparecen a partir de una corriente eléctrica; Maxwell hizo un agregado, fusilado de las ideas de Faraday: también es posible generarlos a partir de la variación en un campo eléctrico.

Las dos últimas ecuaciones resultan por demás interesantes. Toda variación en un campo magnético nos da

un campo eléctrico y viceversa. Con esto se predice la existencia de ondas electromagnéticas autosustentables, las cuales podrían viajar incluso a través del vacío. Cuando se hicieron las cuentas de la velocidad de propagación de estas ondas apareció una sorpresa de grandes proporciones: era la misma que la de la luz.

Esto no podía ser una coincidencia, la luz debía ser una onda electromagnética; también lo serían los rayos invisibles descubiertos a los extremos del espectro, el infrarrojo y el ultravioleta.

Pero para creer por completo en estas grandiosas ecuaciones —y sus fantásticas implicaciones— hacía falta comprobar una cosa más: la existencia de rayos desconocidos hasta entonces. Las EDM predicen la existencia de ondas electromagnéticas con frecuencias mucho menores a las de la luz o incluso menores a la del infrarrojo.

En teoría, una carga eléctrica tendría que emitir radiación al ser acelerada; al moverla hacia arriba y hacia abajo¹⁴ con cierta regularidad se produciría una onda electromagnética con exactamente la misma frecuencia de su movimiento. Pero hasta entonces ninguna persona había logrado detectar la existencia de una cosa semejante.

Un joven alemán, llamado Heinrich Hertz, se encargó de demostrar la existencia de las ondas que ahora conocemos como de radio.¹⁵ Usó su gran habilidad experimental para construir los dos aparatos necesarios para verificar esta predicción: un emisor y un detector. En 1887, a sus 30 años de edad, logró emitir y detectar ondas electromagnéticas; fue el primer hombre en transmitir una señal de esta naturaleza. En ese momento, Hertz no tenía la menor idea de la puerta que estaba abriendo para la humanidad con su trabajo. Y tampoco tuvo la

14. Da lo mismo si es hacia la derecha e izquierda, o adelante y atrás, el chiste es que oscile.

15. Viene del latín *radius*, que significa rayo.

oportunidad de darse cuenta: falleció tan solo seis años después víctima de una extraña enfermedad.¹⁶

Actualmente, la transmisión de información por ondas electromagnéticas es la base de prácticamente todas las telecomunicaciones; primero fueron la radio y la televisión, posteriormente los celulares, el internet y quién sabe cuántas cosas más. La unidad de frecuencia en el sistema internacional lleva el nombre de Hertz en honor al gran impacto de las investigaciones de este hombre; un Hertz indica el número de ondas completas por segundo.¹⁷

El mismo año de la primera transmisión de ondas electromagnéticas, y como parte de sus experimentos para producirlas y detectarlas, Hertz se topó con un fenómeno inesperado: observó que un objeto cargado eléctricamente se descargaba con mayor facilidad cuando era iluminado con rayos ultravioleta. Se trata de lo que posteriormente se llamaría efecto fotoeléctrico. Aunque reportó este hallazgo en un artículo, parece ser que estaba más entusiasmado con las ondas electromagnéticas, y ni siquiera intentó explicar el nuevo fenómeno.

Más adelante, otros científicos constataron que la incidencia de rayos ultravioleta —o incluso de luz visible— podía estimular el desprendimiento de carga eléctrica en algunos materiales y, con el arreglo adecuado, la formación de una corriente. Además, se percataron de que en este fenómeno sucedía algo curioso: si se aumentaba la intensidad de la luz crecía también la intensidad de la corriente —es decir, el número de cargas eléctricas desprendidas— pero no cambiaba la energía (velocidad) con que salían las cargas.

16. Granulomatosis de Wegener, un trastorno que dificulta el flujo de sangre por una dilatación de los vasos sanguíneos; afecta sobre todo la nariz, los senos paranasales, los pulmones y los riñones.

17. Por eso, si la señal de una radiodifusora se encuentra en los 106.5 Mega Hertz de frecuencia, significa que nos está mandando 106.5 millones de ondas completas por segundo.

Después de todo parece ser que luz y electricidad tienen algo en común, además de los focos. De hecho, se trata de una especie de complemento: un foco emite luz con la electricidad, mientras que ciertos materiales pueden recibir luz y producir electricidad. Sin embargo, nadie podía explicar por qué sucedía esto, y aún pasaría un buen rato antes de que llegara alguien capaz de echarse ese trompo a la uña. Simplemente, el conocimiento de la época no daba para tanto. En ese momento ni siquiera se sabía a ciencia cierta de dónde salía la electricidad o qué era. Aún se pensaba que, como establecían las ideas de John Dalton, los átomos eran los bloques fundamentales e indivisibles que construían toda la materia.

Pronto cambiarían las cosas, una revolución científica estaba por ocurrir y vendría de la mano del estudio de los rayos. ¿Cuáles rayos? Todos, desde las ondas de radio hasta la luz y una serie de extrañas emisiones que pronto entrarían en escena. Se avecinaba una de las etapas más emocionantes en la historia de la ciencia.

Rayos

Cuenta mi papá que toda mi infancia fui un niño sumamente preguntón; no se podía estar un rato conmigo sin ser bombardeado con cuestionamientos. Todo lo que encontraba a mi paso me maravillaba y quería conocer su funcionamiento, en especial me atraían los aparatos de uso cotidiano. Muchas veces las dudas eran resueltas por mis padres, otras por maestros y una que otra vez no me molestaba en preguntar: a escondidas conseguía desarmar el artificio de mi interés para conocer sus mecanismos internos.

La tostadora, el teléfono, la videocasetera y el radio de mi casa fueron algunas de las primeras víctimas de mi sed de aprender. Me divertí de lo lindo al separar sus partes y hacerme una idea —aunque quizá muy tosca— del papel que desempeñaba cada una. En el proceso sucedía una cosa curiosa: cuando volvía a armar los aparatos me llevaba un gran susto al ver que sobraban piezas y que no tenía idea de dónde deberían ir. Por suerte, con todo y esto, los dispositivos siempre seguían funcionando.

Desafortunadamente, mis papás nunca se descuidaron lo suficiente como para que yo pudiera echarle mano al aparato que más me interesaba, la televisión. Aunque me la pasaba el día viéndola, no tenía la más mínima idea de lo que había en su interior ni de cómo podían generarse las imágenes. La aparición en la pantalla de caricaturas, partidos de fútbol y películas era algo prácticamente mágico para mí.

Tiempo después, tuve la oportunidad de acercarme a un «deshuesadero» de televisores; a los doce años hice una visita a un taller de reparación de aparatos eléctricos. Pude ver que todos los aparatos compartían un elemento fundamental, una especie de embudo hecho de vidrio que tenía la pantalla en su extremo más ancho. Al preguntar qué era eso, me dieron una respuesta tan acertada como rimbombante: un tubo de rayos catódicos¹ (de aquí en adelante lo llamaremos TRC para abreviar). Diantre, eso me parecía más el nombre de un arma de caricatura o de película de ciencia ficción que la parte principal de un televisor.

Prácticamente me quedé en las mismas. Aunque al aprenderme el nombre ya me sentía todo un conocedor de la tecnología televisiva, en realidad seguía tratándose de una caja negra. Aún me hacía falta averiguar mucho para siquiera hacerme una idea del funcionamiento de la pantalla. En ese entonces no había internet, y mucho menos la buena Wikipedia, así que para aprender más sobre este tubo investigué en una enciclopedia ¡impresa en papel!²

Me enteré de que en el interior del TRC viaja electricidad, que es la que forma las imágenes; cuando la electricidad choca contra la pantalla, le da la energía necesaria para emitir luz. Entonces pensé que el tubo tendría en su interior algún tipo de material conductor; después de todo, ¿de qué otra forma podría fluir la electricidad a través del TRC? Debería de haber buen número de alambritos para llevar la electricidad de un extremo al otro. Pero, oh sorpresa, el interior del tubo no tiene nada de alambres, solo aire enrarecido.

1. Actualmente existen pantallas planas y mucho más sofisticadas — con tecnología de plasma, cristal líquido y leds — que hacen ver los armatostes con tubos de rayos catódicos como tecnología antediluviana. Aun así, las teles a la «antigüita» siguen y seguirán siendo usadas por un buen tiempo.

2. Vista en retrospectiva, parece la cosa más arcaica del mundo.

Pum, acababa de aparecer otra cosa de la que no tenía ni idea (realmente estaba ampliando los límites de mi ignorancia). Eso de «aire enrarecido» me sonaba más a un producto intestinal que a una parte clave de la televisión y ya no me sentí tan motivado a seguir investigando; me dejé llevar por otras aficiones que por algunos años hicieron a un lado mi interés «científico» por la televisión.

Las cosas cambiaron cuando —ya en la Universidad— me enteré de que el TRC no solamente sirvió para hacer «teles»; fue fundamental para realizar importantes descubrimientos acerca de la estructura de la materia. Mi interés por este aparato revivió con más fuerza que nunca. Volví a las andadas y empecé por averiguar sobre el aire enrarecido dentro de un TRC; su «rareza» se refiere a una situación física, ya que el aire se encuentra fuera de sus condiciones normales. Pero, ¿cuáles son esas otras condiciones?

El aire se enrarece cuando disminuye su densidad, o sea, cuando en un mismo volumen tenemos una menor masa que la encontrada en condiciones normales; o bien, cuando aumentamos el volumen a la misma masa. Hay varias formas de enrarecer el aire: lo podemos calentar —en un espacio abierto— o, bien, succionar en un contenedor cerrado; también es posible enrarecerlo al aumentar el volumen en que se encuentra una masa constante de aire.

Como dirían los gringos, el aire delgado (*thin air*) es la clave del asunto. Por ahí hubiéramos empezado. Al ser nativo de la ciudad de Zacatecas, ubicada a casi 2,500 metros de altura sobre el nivel del mar, estoy bien familiarizado con ese concepto. Entre más alta se encuentra una ciudad, el grosor de la capa de aire arriba de ella es menor, con lo cual disminuye la presión atmosférica en ese lugar.³

3. Por eso, cuando los alpinistas suben a sitios de gran altura —como el Monte Everest—, les resulta difícil respirar y necesitan llevar tanques de oxígeno.

Existen muchos fenómenos asociados con el aire enrarecido: la succión que hacemos de un líquido al beberlo con un popote, el funcionamiento de las ventosas e incluso la formación de espejismos en las carreteras.⁴ En el siglo XVII, muchos científicos se dedicaron a estudiar las propiedades del aire en estas condiciones; hombres como Robert Boyle y Otto Von Guericke, entre muchos otros, construyeron aparatos de gran utilidad para disminuir la presión del aire e investigar lo que sucede en esas condiciones.

Dos siglos más tarde, aprovechando estos aportes, nuestro amigo Michael Faraday incorporó el aire enrarecido a sus investigaciones: aplicó electricidad en los extremos de un tubo de vidrio, disminuyó la presión en su interior y logró crear un arco eléctrico (una especie de rayo sostenido). Aunque el aire normalmente no es un buen conductor, descubrió que a presiones muy bajas permite flujos de carga, incluso con voltajes relativamente pequeños.

En 1857, 19 años después, el experimento se repitió, pero lo hizo alguien con una mejor bomba para despresurizar el interior de tubos de vidrio. Heinrich Geissler logró disminuir la presión a solamente la milésima parte de la presión del aire al nivel del mar; en lugar de un arco eléctrico, se podía apreciar un colorido destello luminoso distribuido en el interior de todo el tubo. El maravilloso hallazgo pronto brincó del laboratorio a la escena pública: por toda Europa empezaron a proliferar espectaculares demostraciones con «tubos de Geissler». Aunque entonces no parecían tener una aplicación práctica inmediata, eran el deleite del público por los vistosos colores,

4. El asfalto se calienta con los rayos del Sol y transfiere calor al aire que se encuentra en contacto con él; al calentarse, el aire disminuye su densidad y desvía la luz que viene del cielo (técnicamente se dice que la refracta). Con esto da la impresión de que hubiera agua reflejando la luz, y se forma el espejismo.

que variaban según el gas contenido en el tubo. Estos aparatos fueron los abuelitos de los anuncios de neón y de los focos ahorradores.

La cosa no paró ahí; todavía habría de llegar alguien capaz de llevar el estudio del paso de electricidad por aire enrarecido un escalón más allá, un científico más efectivo a la hora de extraer el aire de los tubos. En la década de 1870, William Crookes disminuyó la presión mil veces más que Geissler y con esto abrió las puertas para un descubrimiento fascinante.

Ya se había visto que frente al cátodo podía aparecer un espacio oscuro, sin destello; al disminuir la presión, Crookes observó que dicho espacio oscuro iba creciendo. Cuando se alcanzaba la mínima presión, el brillo desaparecía por completo del interior pero se asomaba en el vidrio del extremo del aparato, justo atrás del ánodo. Se probó entonces poner un obstáculo, y se colocó una cruz de metal en el interior del tubo: la sombra del objeto se dibujaba en el destello de la parte posterior.

Sin duda, había algo viajando del extremo negativo al extremo positivo del tubo. Los físicos nunca hemos sido muy creativos a la hora de bautizar los descubrimientos, esta no fue la excepción y a esas cosas descubiertas en el tubo se les llamó rayos catódicos, por eso de que salían del cátodo. Aunque a finales del siglo XIX ya estaban bautizados, no se sabía gran cosa de su naturaleza; viendo en ellos una posibilidad para cubrirse de gloria, muchos científicos se dedicaron afanosamente a jugar —digo, a investigar— con los TRC.

Conforme avanzaron los estudios, las ideas de los investigadores empezaron a separarse en dos bandos. El debate resultó muy parecido al sostenido tiempo antes entre Newton y Huygens —corpúsculo contra onda— solo que ahora, en lugar de ser sobre la luz, las discusiones eran sobre los rayos catódicos. Los físicos ingleses y franceses

estaban convencidos de que se trataba de partículas viajando de un extremo a otro, mientras que los alemanes opinaban que eran ondas electromagnéticas. Sin embargo, inicialmente ningún bando consiguió evidencia suficiente para hacer prevalecer sus ideas sobre las de sus rivales.

Si bien por décadas no fue posible establecer con claridad su naturaleza, muchos investigadores lograron descubrir varias cosas muy interesantes: Jean Perrin se dio cuenta de que son portadores de carga eléctrica negativa, y Heinrich Hertz,⁵ junto a su asistente Philipp Lenard, observó que los rayos se veían afectados por la influencia de un imán en movimiento, pero que un campo eléctrico no les hacía nada.

El alemán Wilhelm Röntgen, en su afán por aprender más de ellos, incluso descubrió un nuevo tipo de emisión misteriosa. Este es un caso realmente representativo del trabajo científico, pues al dedicarse afanosamente a encontrar una respuesta no hizo más que develar nuevas preguntas; como veremos con frecuencia en nuestro relato, las mismas respuestas acarrear consigo otras interrogantes. Precisamente por eso, cada vez hay más cosas por averiguar, y la ciencia sigue viva y activa siempre.

Bueno, resulta que, por diciembre de 1895, don Wilhelm estaba en una habitación oscura estudiando un TRC que se encontraba dentro de una caja de cartón. La caja servía para que el experimento no se viera afectado por influencias externas. Observó que una pantalla cubierta por un material fluorescente⁶ (platinocianuro de bario), ubicada fuera de la caja, brillaba siempre que el tubo estaba funcionando.

5. El mismo que trabajó en la emisión y detección de las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell.

6. Son materiales que reciben ciertos rayos invisibles (como los ultravioleta, los rayos X o incluso los catódicos) y emiten un destello luminoso. Esto se puede observar con facilidad en un antro, o discoteca, donde algunos objetos parecen brillar aun sin una fuente de luz; esto se debe a que reciben ultravioleta y con esa energía emiten luz blanca.

Él ya había experimentado poco antes con estos materiales y sabía que el tubo los hacía brillar, pero no esperaba que del TRC saliera algún tipo de emisión que pudiera atravesar el cartón para causar el destello observado. Incluso, Röntgen llevó la pantalla a la habitación de al lado, se encerró y observó cómo el material fluorescente seguía brillando; fuera lo que fuera, la cosa enviada por el tubo también podía atravesar la puerta de madera.

Por aquel entonces, ya se sabía que los rayos catódicos eran detenidos con facilidad incluso por barreras tan delgadas como una hoja de papel, así que no podían ser ellos los causantes del destello. Los nuevos rayos eran algo completamente desconocido y, precisamente por esa incógnita, Röntgen los bautizó como «Rayos X». Empezó a estudiarlos y se llevó una emocionante sorpresa al ver la sombra de su mano proyectada en la pantalla fluorescente: se veían los puros huesos.

Entusiasmado con el hallazgo, hizo experimentos con muchos objetos y estableció que cuerpos de diferente material y grosor tienen diferentes grados de transparencia ante estos rayos. Además, se dio cuenta de que podían velar placas fotográficas como si se tratara de luz; entonces se dedicó a tomar fotos usando los rayos para «iluminar» los objetos y obtener imágenes de su interior; fue así que usó la mano de su esposa⁷ para tomar la primera —y quizás más célebre— radiografía de la historia, dando lugar a una revolución en la medicina.

Gracias a los nuevos rayos, la atención de los pacientes ya no dependía solamente de la interpretación de síntomas y un poco de adivinación por parte del médico. Se hizo posible echar un vistazo al interior de la persona para tener una mejor idea de lo que ahí ocurría. Además, se

7. A su señora, Anna Bertha Ludwig, no le hizo mucha gracia que su esposo desnudara su mano y anduviera presumiendo la imagen por todos lados; con el pudor de la época —en que no se enseñaba en público ni el asomo de una pierna— esto era humillante para ella.

hizo más sencillo el diagnóstico en casos urgentes, como identificar fracturas en huesos, o detectar balas dentro del cuerpo. La noticia de estos fantásticos rayos pronto le dio la vuelta al mundo; el artículo en que Röntgen anunció su descubrimiento fue publicado en Berlín en enero de 1896, y para finales de ese mismo mes ya se tomaban radiografías en muchos países.

Aquí es bueno detenernos para destacar el interés de Wilhelm por averiguar más de ese brillo inesperado que observó en la pantalla, pues otros investigadores —como Phillipp Lenard— habían observado ese fenómeno antes que él, pero no supieron darle la importancia necesaria o, simplemente, no se molestaron en desviarse de las investigaciones que ya realizaban. Se perdieron de una gran oportunidad para potenciar su trabajo científico y ganarse una buena lana en el proceso. Gracias a su descubrimiento, Röntgen recibió en 1901 el primer Premio Nobel de Física. Además del prestigio académico, este galardón incluía la nada despreciable suma de 150,000 Kronors Suecos, algo así como un millón de dólares en la actualidad.

Como sucedió con los rayos catódicos, pronto los rayos Röntgen (como se les llegó a conocer) se convirtieron en la gran novedad; el fenómeno de moda. Acapararon la atención de muchos científicos que aspiraban a ser los primeros en develar su naturaleza o en encontrarles alguna nueva aplicación. Años más tarde se comprobaría su naturaleza electromagnética: eran parientes del infrarrojo, la luz visible y el ultravioleta; solamente se caracterizaban por tener una frecuencia más alta.

Tan solo un año después del descubrimiento de los rayos X, un científico francés se encontró con otro hallazgo inesperado relacionado con ellos. Henri Becquerel era el jefe del Departamento de Física del Museo de Historia Natural de París, puesto anteriormente ocupado

por su padre y su abuelo.⁸ Ahí —tal como habían hecho sus antepasados—, se dedicaba a estudiar diferentes materiales fosforescentes, los cuales se caracterizan porque no reflejan inmediatamente la luz que reciben, sino que la liberan poco a poco.⁹

Al conocer la nueva y misteriosa radiación, Becquerel pensó que sería buena idea investigar si estaba relacionada con sus materiales. Los exponía al Sol para «cargarlos» de energía y posteriormente los acercaba a una placa fotográfica especialmente preparada y protegida por un material negro y opaco; así, la aparición de una imagen solamente podría ser consecuencia de los rayos X.

Realizó pruebas con muchos materiales, sin éxito, hasta que obtuvo resultados positivos con sales de uranio. Ahí fue donde la cosa prendió, literalmente. Las imágenes reveladas mostraron que estas sales sí emitían los rayos Röntgen. Luego empezó a colocar diferentes objetos entre las sales de uranio y las placas fotográficas y logró delinear sus siluetas en las imágenes formadas por los rayos.

Cuando tocó el turno de «fotografiar» una cruz de cobre el cielo estuvo nublado durante varios días; parecía que la mala fortuna le impedía realizar ese experimento. Dejó el material en un cajón, donde bien podría haberse quedado arrumbado, pero poco después —por intuición, por suerte o con la idea de comparar la placa con las tomadas anteriormente— decidió revelar la imagen.

Cuál sería su sorpresa cuando se dio cuenta de que la figura producida por las sales era tan intensa como antes. La falta de exposición al Sol no les había afectado en nada y la silueta de la cruz se delineaba clara en el contorno

8. Y el cual más tarde sería asumido por su hijo, todo quedaba en familia.

9. Por eso son útiles en espacios que eventualmente estarán oscuros: aprovechan la luz que reciben y se distinguen con la poca luz que emiten cuando todo está «apagado». Los interruptores de luz que tenemos en casa tienen esta característica, también las manecillas de algunos relojes y muchos adornos usados en centros nocturnos.

marcado por los rayos X. Esto quería decir que la energía para la emisión no provenía de los rayos solares sino del interior del material. Se trataba de un descubrimiento enorme: de forma natural se producían rayos que hasta entonces solamente habían sido originados artificialmente en los TRC. Becquerel acababa de descubrir la radiactividad.

Tristemente, para él, su aporte no recibió la atención que merecía; todo mundo estaba muy ocupado con los rayos X y los catódicos. Sin embargo, pronto se incorporaría a esta área de investigación una joven de origen polaco que realizaba sus estudios en París; ella ayudaría de forma significativa a dimensionar este gran aporte. Tras conocer el trabajo de Becquerel, Marie Curie decidió que el estudio de los rayos emitidos de forma espontánea por los compuestos de uranio sería un buen tema para su tesis doctoral. Y vaya que lo fue, pero esa es otra historia a la cual entraremos con calma en el capítulo cinco.

Por ahora volvamos a lo que sucedía a mediados de la década de 1890 con el estudio de los rayos catódicos. Gracias al trabajo de Röntgen se sabía que el choque de estos rayos con objetos materiales producía rayos X (como sucedía con el vidrio en un TRC), pero no se pudo llegar más lejos en los intentos por develar su naturaleza. Ningún científico se había acercado a lograrlo, hasta que apareció en escena Joseph John Thomson.

J. J., como le decían sus cuates, era originario de Manchester, Inglaterra; ahí estudió ingeniería, en el Owens College. Posteriormente le dio por estudiar matemáticas, así que continuó su educación nada menos que en la misma universidad donde se formó Newton: el Trinity College de Cambridge. Era un joven muy dedicado que siempre dejó que su trabajo hablara por él y —tras recibir varias condecoraciones como estudiante— en poco tiempo ya se había convertido en profesor de física del laboratorio Cavendish, dentro de la misma institución.

El puesto no era poca cosa, todo lo contrario; había sido ocupado por hombres de la talla de James Clerk Maxwell y Lord Rayleigh. Este último —quien en realidad se llamaba John William Strutt— descubrió el elemento Argón así como el esparcimiento que lleva su nombre y que explica por qué el cielo es azul. Podemos ver que sus predecesores habían dejado antecedentes de grandes logros, como para intimidar a cualquiera, pero J. J. pronto mostró estar a la altura de las circunstancias.

Fue el mismo Lord Rayleigh quien —de forma visionaria— lo encaminó hacia el estudio de los rayos catódicos. Fiel a la escuela inglesa, Thomson estaba determinado a demostrar que los diantres rayos estaban hechos de partículas. Con este propósito en mente, se puso a hacer experimentos que pronto lo llevaron a lograrlo... bueno, es más probable que haya puesto a sus alumnos a hacerlos. No es que no quisiera cansarse realizándolos, o que buscara esclavizar a sus pupilos; el principal motivo era su completa discapacidad experimental. Aunque era un tipo realmente brillante para diseñar experimentos, J. J. no era nada hábil con las manos; generalmente le bastaba un pequeño toque para echar a perder un aparato.

Y no se crea que solo se trata de chismes esparcidos por algún envidioso; en repetidas ocasiones, su propio hijo —George Paget Thomson—¹⁰ dio testimonio de este tipo de situaciones. Podemos decir que como físico experimental, Joseph John era bastante teórico: establecía lo que se debía hacer e interpretaba muy bien los datos obtenidos, pero no era capaz de obtener la información directamente. En fin, para seguir con la historia, digamos que se puso a dirigir la realización de una serie de experimentos.

Primero que nada, midió la velocidad de los rayos catódicos y descubrió que viajan mucho más lento que la

10. Tal como su papá, fue un físico de gran talento, pero él sí podía hacer experimentos directamente.

luz. Con esto, apoyándose en la teoría electromagnética de Maxwell, pudo demostrar que no podía tratarse de ondas electromagnéticas. Luego intentó separar la carga y los rayos, pero no pudo lograrlo; eran parte de la misma cosa. Además, mostró ser sumamente obseso y desconfiado. No conforme con las mediciones de Hertz y Lenard, quiso comprobar si un campo eléctrico en verdad no afectaba a los rayos. Gracias a que tenía mejores bombas que las usadas antes por los otros científicos, encontró que al extraer todo el aire del tubo el campo eléctrico sí cambiaba la trayectoria de los rayos catódicos.

¡Achis! ¿Cómo fue que obtuvo un resultado diferente en un experimento muy parecido al realizado poco tiempo antes? Sucede que en los procesos previos aún había un poco de aire dentro del tubo, y este se portaba como conductor. Faraday ya había demostrado que, debido a la inducción de carga, un campo eléctrico no puede penetrar un conductor. Entonces, en las mediciones anteriores, la conducción había ocultado la influencia del campo eléctrico sobre los rayos catódicos.

Thomson también se encargó de medir qué tanto se desviaban los rayos ante un campo magnético, así como la energía que llevaban. De este modo, logró establecer con gran precisión la proporción masa/carga de la partícula, la cual debía tener una masa muy pequeña o una carga muy grande. Pero no podía dejar ese aspecto tan importante en pura especulación. Realizó un experimento con gotas de agua cargadas para acercarse a conocer la carga real del electrón y, con ella, su masa. Se dio cuenta de que tendría que ser cerca de 1800 veces más liviano que el átomo de hidrógeno (el más ligero conocido).

Tras concluir la primera etapa de sus investigaciones, J. J. logró resolver la polémica sobre la naturaleza de los rayos catódicos. Toda la evidencia respaldaba la idea de que eran corpúsculos, y en ese momento no existían datos

que la contradijeran.¹¹ Thomson hizo públicos sus hallazgos el 30 de abril de 1897, en su conferencia vespertina de la Royal Institution. Ahí afirmó que estos corpúsculos serían componentes del átomo, tendrían carga eléctrica negativa y una masa muy inferior a la del hidrógeno.

El término «electrón» no fue usado originalmente por J. J. para designar a sus partículas. El bautizo lo realizó George Francis Fitzgerald, un científico que quería criticar su propuesta. Poco tiempo antes, en ciertos experimentos químicos de paso de corriente, Johnstone Stoney le había asignado ese nombre a la unidad mínima de carga eléctrica. Cuando se enteró del anuncio de Thomson, Fitzgerald señaló con desdén que solamente se trataba de electrones libres. Nadie sabe para quién trabaja; aunque su afán era echarle tierra a la nueva propuesta, el nombre resultó muy útil y ayudó a incrementar la popularidad del descubrimiento. Por si eso fuera poco, resultó ser que los electrones son muy versátiles: forman parte del átomo y componen los rayos catódicos, pero también representan la unidad básica de la electricidad. Esto le dio mucho más *punch* al trabajo de nuestro amigo Joseph John. En vez de impedir su avance, Fitzgerald le dio un buen empujón a la teoría.

Para redondear su planteamiento original, Thomson solo tuvo que hacer un ajuste: los electrones no podían ser el único constituyente del átomo, porque, si así fuera, este sería negativo, y se tenía muy claro que en realidad es neutro. Se asumió, entonces, la existencia de una parte del átomo eléctricamente positiva para compensar la carga negativa de los electrones. Esto dio lugar al primer modelo para la estructura atómica.

11. De eso vendría a encargarse más tarde su retoño, el ya citado George Paget Thomson, pero eso forma parte de rollos cuánticos que todavía no debemos abordar.

La cosa empezó a ponerse buena, ya que el descubrimiento del electrón cambió radicalmente nuestra idea de la composición de la materia. Lo único que les quedó de indivisible a los átomos fue el nombre; ya estaba claro que se les podían sacar «pedacitos». Así se rompió de golpe y porrazo con las ideas de Dalton, quien había considerado que los átomos eran las unidades indivisibles de las que están hechos los elementos químicos; es cierto que son bloques componentes de los elementos, pero se pueden descomponer en partículas más pequeñas. Hay que decir que no se rompió con el planteamiento original de Demócrito; el griego nunca dijo dónde estaban ni cómo eran los átomos, solamente estableció que deberían existir algunas cosas tan pequeñas que tendrían que ser indivisibles.

Ahora habría que ponerse a pensar en cómo sería el átomo por dentro. J. J. imaginó su estructura parecida a la de un budín o un pay con pasas: la mayor parte estaría compuesta por un fluido de carga positiva y tendría electrones distribuidos en todas partes para compensar y mantener la neutralidad eléctrica; además, ese fluido sería el responsable de la mayor parte de la masa atómica.

Gracias a esta nueva perspectiva, se pudieron entender claramente muchos fenómenos observados en los TRC, e incluso aspectos más generales asociados a todos los fenómenos eléctricos. Sin embargo, esto solamente fue un esbozo inicial de la estructura del átomo, una imagen tosca que se iría definiendo con los años y el trabajo de muchas personas. Pero, como sea que fuere, ya era un avance explicar algunas cosas.

Antes no se tenía muy claro por qué algunos materiales conducían bien la electricidad y otros no. Ahora, se sabía que los electrones se mueven con facilidad entre átomos y van formando corrientes en un material conductor,

mientras que esto no es posible en un material aislante; aunque no se entendía por qué en algunos átomos los electrones podían desplazarse sin problema, mientras que en otros no se movían ni con voltajes muy altos.

Por otro lado, se sabía que el aire normalmente no conduce la electricidad, puesto que los electrones no se mueven en él con facilidad; chocan con tantos átomos que pierden muy rápido la energía que llevan y no pueden llegar muy lejos. En condiciones normales se necesitan grandes voltajes (como los de los rayos en las tormentas eléctricas) para lograr que los electrones atraviesen el aire; sin embargo, si bajamos considerablemente la presión, hay menos átomos para detener su avance. Así, la energía de los electrones que salen del cátodo en un TRC es suficiente para sacar otros electrones de los átomos con los que chocan; de esta forma el gas se ioniza, queda cargado eléctricamente y se vuelve conductor.

Aquí debemos hacer un breve paréntesis. Acaba de aparecer, sin ser esperado, el cuarto estado de la materia: «el plasma». Sí, esto es correcto, amigo lector: ¡hay otros estados¹² además de los tres que vimos siempre en la escuela (sólido, líquido y gaseoso)! El plasma es un estado de alta energía que aparece cuando tenemos un gas ionizado. Sé que esto suena bastante extravagante, pero es mucho más común de lo que se podría pensar. Todos lo tenemos en casa, ya sea en la flama del fuego de una estufa o en el funcionamiento de un foco ahorrador. Además, como las estrellas son colosales esferas de gas ionizado, más del 90% de la materia conocida en el Universo se encuentra en este estado. En el plasma, los choques de los electrones dan energía a los átomos; esta energía produce

12. También existe un quinto estado, el Condensado de Bose–Einstein. Se trata de una fase de muy, muy, pero muy baja energía que hasta ahora no se ha visto en la naturaleza; solamente ha sido producida en el laboratorio.

la luz que se observa tanto en el destello interior de los TRC, como en el fuego de la estufa o en las estrellas.

Ahora, dejando atrás el plasma, retomemos el aparato que nos puso a hablar, en un principio, de los rayos catódicos: la televisión. En el interior del TRC, la presión es sumamente baja porque lo importante no es producir luz dentro del tubo, sino en la pantalla. Esta última está hecha de un material fluorescente que emite luz cuando los electrones chocan contra ella. Es claro que se necesita materia contra la cual chocar para contar con luminosidad; por eso, conforme disminuye la presión en el tubo, hay menos átomos y, por lo tanto, menos oportunidades de que los electrones choquen y se libere luz. Cuando prácticamente no hay aire en el interior del tubo, su interior se vuelve oscuro; en esta situación, el destello solamente puede verse en el vidrio; sin embargo, los electrones no ionizan el vidrio, solo le dan energía para emitir luz y rayos X. Para evitar problemas en la salud de los usuarios, los televisores cuentan con mecanismos de protección que evitan que el tubo emita rayos X, y se limitan a enviarnos señales luminosas.

Para conseguir formar las imágenes definidas que acostumbramos ver es necesario producir un gran número de colores e intensidades diferentes, por eso la pantalla está dividida en millones de cuadritos, llamados píxeles.¹³ Los electrones son dirigidos por una serie de campos eléctricos para chocar en diferentes regiones, de acuerdo con la información que llega en la señal. Las combinaciones de áreas oscuras e iluminadas dan forma a las imágenes.

En las televisiones a blanco y negro solamente había un dispositivo para emitir y distribuir electrones hacia la

13. Actualmente, gracias a las imágenes digitales, conocemos bastante bien estas cositas. Sabemos que una fotografía vista en la computadora está formada por millones de cuadritos, sabemos también que cada uno de ellos puede tener solamente un color y que, juntos, todos estos «compañeros» forman las imágenes.

pantalla; se emitía más o menos luz para formar las imágenes, dependiendo del número de electrones incidentes en cada área de la pantalla y su energía. La televisión a color, inventada por el mexicano Guillermo González Camarena, tiene tres dispositivos que emiten electrones para formar imágenes en el mismo número de colores: rojo, verde y azul. La pantalla cuenta con píxeles de cada color ubicados muy cerca unos de los otros; nuestros ojos difícilmente pueden diferenciarlos a la distancia, y cuando se combinan pueden producir toda la gama cromática. Para asegurar que los electrones específicos impacten con el pixel adecuado hay rejillas que los direccionan.

El problema con las «antiguas» televisiones de rayos catódicos es que si queremos tener una pantalla más grande también debe crecer el tubo que tiene atrás. A partir de las 30 pulgadas, se tienen aparatos muy pesados que, además, ocupan un espacio enorme en la habitación en que se encuentran. Esto cambió de forma sustancial en la última década, con el desarrollo comercial de tres nuevas tecnologías: las pantallas de plasma, cristal líquido y leds.

Las nuevas televisiones ya no usan un gran TRC, y por eso tienen un diseño plano y delgado. Todas funcionan con base en muchísimos píxeles de diferentes colores que forman las imágenes y siguen apoyándose en electrones que hacen que un material emita luz. En el plasma no hay una gran pantalla fluorescente, sino que cada pixel tiene una celda con gas (Xenón o Neón) que libera rayos ultravioleta al ionizarse; estos rayos chocan con su propia pantalla diminuta, la cual emite luz (roja, verde o azul, según sea el caso). Una pantalla de plasma tiene cientos de miles de diminutos TRC que se combinan para formar las imágenes.

La desventaja del plasma es que consume mucha energía, lo que ha llevado a la prohibición de estos aparatos en algunos países, como Australia. Actualmente, los Diodos

Emisores de Luz (LED, por sus siglas en inglés) ofrecen una alternativa ecológica, aunque un poco más cara, para las pantallas planas y delgadas. Su tecnología se basa en fenómenos cuánticos, completamente desconocidos en la época de Thomson; esta tecnología fue posible gracias a una revolución científica que se desarrolló en las primeras décadas del siglo XX.

A lo largo de los próximos capítulos veremos cómo los alumnos de J. J. Thomson y los alumnos de sus alumnos jugaron un papel de gran importancia para poder conocer —y aprovechar— la estructura de los átomos. Pero antes es necesario echar un vistazo a fragmentos fundamentales de la naturaleza de la energía.

Y la energía se hizo pedazos

Imaginemos a Maradona convenciendo a la FIFA de que su gol de «la mano de Dios» en México 86 no debió valer. O a un jugador de *poker* regresando sus millonarias ganancias de un torneo internacional porque ganó usando un *bluff*.¹ O a un científico esforzándose por desmentir el descubrimiento que le dio fama y prestigio. No parece realista, ¿verdad? Sin embargo, a inicios del siglo pasado sucedió algo así, precisamente con un científico.

Max Planck, uno de los físicos más importantes de la época, pasó buena parte de su vida intentando echar para atrás su principal aporte científico. Ese trabajo le había dado gran prestigio, incluso lo había hecho acreedor al Premio Nobel de Física de 1918 y, a diferencia de los ejemplos de Maradona o del jugador de *poker*, no implicaba engaños. Aún así, sus resultados eran tan radicales y descabellados que, desde su perspectiva, no podían ser ciertos.

¿De qué se trataba? ¿Qué podía ser tan increíble, incluso para su descubridor? Pues, «simplemente», rompió con la continuidad de la energía. Llegó a la conclusión de que no puede ser tan pequeña como nosotros queramos, está formada por diminutos fragmentos. De ahí se deriva una implicación inevitable: los cambios energéticos no ocurren de forma gradual, sino que se presentan a saltos.

1. También es conocido como «farol», un término que se usa cuando realizas una apuesta sin tener un buen juego; si el rival no se atreve a igualar tu apuesta no tiene derecho a ver tu juego y por tanto ganas sin siquiera comprobar la superioridad de tus cartas sobre las del rival.

Su hallazgo marcó el inicio de un periodo clave en la historia de la física, cuando los científicos se dieron cuenta que, a escalas muy pequeñas, las reglas parecen no coincidir con los fenómenos observados de forma cotidiana; aunque en realidad esas condiciones que chocan con nuestro sentido común son las que permiten que nuestro Universo exista tal como lo conocemos.

Hasta donde sabemos hoy, los pedacitos descubiertos por don Max son la cosa más parecida al concepto original de átomo ideado por los griegos Leucipo y Demócrito: algo tan pequeño que no puede ser dividido. Pero ese nombre ya estaba ocupado,² así que el investigador alemán bautizó a la unidad mínima de energía como *quantum* (cuanto) que en latín significa «cierta cantidad».

El padre de la física cuántica no solo hizo pedazos la energía, al mismo tiempo se salió del molde de las aspiraciones normales en un investigador (o de cualquier ser humano). Las personas trabajamos toda nuestra vida con el afán de distinguirnos, de realizar un aporte que nos permita destacar sobre los demás. Los científicos buscan esto todavía con más ganas; normalmente, su mayor aspiración es revolucionar el campo del conocimiento en el cual trabajan (ya si se puede en otra área, tampoco hacen el feo).

Con Max Planck las cosas fueron diferentes. Su carácter conservador, respetuoso del orden establecido, le generó fuertes conflictos cuando se dio cuenta de la revolución que había desencadenado. La vida de Max giraba alrededor del orden sistemático, desde el horario de sus paseos, labores de estudio o prácticas de piano, hasta su afán de entender a fondo el funcionamiento del Universo. Con sus aportes había abierto la caja de Pandora y sentía descompuesta la elegante armonía predicha por la física

2. El nombre de átomo pertenece a las unidades más pequeñas de los elementos químicos (como el hidrógeno, el oxígeno, el oro o la plata); estos son los diminutos bloques que forman toda la materia conocida.

clásica. Para alguien tan metódico esto era inconcebible, así que estaba empeñado en corregir el asunto. La cosa no fue tan sencilla, porque no encontró una forma de regresar al orden original y tampoco se le ocurrió cómo darle sentido a los nuevos descubrimientos con base en las teorías conocidas previamente, pero no le tocaba a él decir la última palabra al respecto.

Planck venía de una familia que se remontaba a tres generaciones de distinguidos académicos. Su padre fue un abogado de gran prestigio en su natal Kiel y, posteriormente, en Munich, a donde se mudó la familia cuando Max era un pequeño de seis años. Al concluir la prepa (conocida en Alemania como *Gymnasium*), el joven mostraba gran talento e interés para estudiar a fondo una de tres áreas diferentes: música, lingüística y física.

Buscando cierta claridad vocacional, le dijo a su maestro de física que le gustaría estudiar esta área del conocimiento. La respuesta fue algo así como «mejor dedícate a otra cosa, todo lo importante ya se descubrió». Según el docente, lo único que quedaba por hacer era llenar pequeños huecos. Afortunadamente, esto no limitó el interés del joven Planck, sino todo lo contrario; antes que descubrir nuevos fenómenos, él se contentaba con entender los fundamentos de la física, y no le causaba ningún problema dedicarse a limar las pequeñas asperezas de las teorías.

Sería injusto tachar a su profesor de ignorante, o corto de vista, cuando su perspectiva era compartida por la mayor parte de los científicos de la época. En esos momentos, los físicos creían que estaban cerca de llegar al tope de los conocimientos para explicar la naturaleza. Con ayuda de la mecánica clásica, la teoría electromagnética, la óptica y la termodinámica se creía posible entender el funcionamiento de cualquier fenómeno físico. Solamente faltaría finalizar los detalles para «completar» esta ciencia; diríamos que se creían al punto de poner la cerecita en el pastel.

En este contexto, la termodinámica estaba tomando un gran auge en el abordaje de los detalles pendientes. Quizá esto se debía a su carácter versátil, pues involucra diferentes manifestaciones de energía y las transferencias entre unas y otras. Además, tenía un importante valor agregado: algunos investigadores de esta área habían desarrollado nuevas formas de abordar los problemas, diferentes al determinismo tajante, y estaban trabajando de forma estadística.

En la mecánica clásica, si sabemos las condiciones iniciales de un cuerpo —como posición, velocidad y fuerzas que actúan sobre él— se puede predecir su comportamiento a través del tiempo. Sabemos dónde va a estar y qué velocidad tendrá en diferentes momentos. Sin embargo, cuando deseamos conocer las características de un sistema complejo —como un gas formado por un número muy grande de moléculas— resulta imposible aplicar el mismo enfoque; sería una locura calcular el movimiento de cada uno de los trillones de partículas. Había que buscar una forma de predecir el comportamiento sin tener que matarse haciendo cuentas.

La solución llegó con el uso de herramientas estadísticas, impulsadas de forma considerable por el investigador austriaco Ludwig Boltzmann. Con base en promedios se podría conocer el comportamiento de todo un sistema y explicar propiedades como el volumen, el calor y la presión presentes en un gas. Este enfoque empezó a producir resultados efectivos, pero fueron polémicos en algunos casos, como el de la entropía.

La entropía es una magnitud que mide el grado de desorden. La Segunda Ley de la Termodinámica establece que, al avanzar el tiempo, la entropía de un sistema siempre crece o, al menos, se mantiene igual. ¡Genial! Entonces el caos en mi escritorio no significa que yo sea desorganizado, es culpa de la dichosa entropía. Tengo que

explicarle esto a mi patrona, la directora del Museo de Ciencias: ¿quién soy yo para ir en contra de los principios naturales?³

Bueno, volviendo al tema, cuando se aplicó el análisis estadístico a la Segunda Ley de la Termodinámica, el aumento de la entropía no fue explicado por una obligación natural. Sucede que los estados más ordenados (con menos entropía) son posibles pero resultan mucho menos probables que los desordenados. Puede ser que al estar trabajando y moviendo muchos objetos, las cosas en mi escritorio se vayan ordenando en vez de hacerse más caóticas; es posible, solo que es muy, muy, muy, muy, muy poco probable. Si quiero que se vuelvan a acomodar en su lugar tengo que invertir energía extra para hacerlo.

Otro buen ejemplo lo encontramos al mezclar las cartas de una baraja. Imaginemos que originalmente las tengo acomodadas por palos: todos los corazones juntos ordenados del as al rey, igual que los diamantes, tréboles y espadas. Las mezclo una vez y el orden disminuye, conforme las vuelvo a mezclar más veces el orden es cada vez menor. Aunque es exageradamente pequeña, existe la posibilidad de que —después de un gran número de repeticiones— todas las cartas vuelvan a su orden original; entonces, es físicamente posible que la entropía de este sistema disminuya, pero la probabilidad de regresar al orden original después de muchas «barajeadas» es de uno en 8×10^{67} (o sea, un 8 con 67 ceros después de él); la probabilidad es muy baja y eso que solo tenemos 52 cartas; ahora imagínense qué sucede cuando estamos hablando de trillones de partículas moviéndose.

Como veníamos diciendo, el nuevo enfoque basado en estadística no había sido aceptado del todo —de hecho

3. En realidad, si le meto algo de energía al sistema poniéndome a acomodar, físicamente no hay resistencia para que el escritorio regrese a un estado ordenado. Pero, ¡shhh!, que la patrona no se entere.

muchos científicos se oponían tajantemente a usarlo—pero ofrecía resultados interesantes, y poco a poco fue encontrando adeptos. Como a Planck le interesaba considerablemente la termodinámica, acabó trabajando con este enfoque aún sin estar muy convencido de su validez. Incluso llegó a establecer contacto con Boltzmann, quien lo adentró en la materia. Así, en el momento menos pensado, Max ya era todo un experto en el tema.

Fue, precisamente, el dominio de este método de trabajo lo que le permitió iniciar una de las principales revoluciones científicas de épocas recientes; esta revolución cambió de forma radical nuestra visión de la estructura de la materia. Sin embargo, la intención de Planck nunca fue estremecer la física desde sus cimientos, él solamente quería encontrar una explicación para un fenómeno termodinámico problemático: la radiación del cuerpo negro.

No es que le interesara investigar los rayos lanzados por objetos oscuros, se trata de un esquema para el estudio de cuerpos que emiten ondas electromagnéticas al ser calentados. Se llama «cuerpo negro» al modelo ideal de objeto cuyas emisiones de radiación son resultado solo de su temperatura y no del reflejo de ninguna onda electromagnética proveniente del exterior.

Cualquier cuerpo con una temperatura mayor al cero absoluto (273.15 grados Celsius bajo cero) emite rayos infrarrojos. Si la temperatura aumenta considerablemente, hasta llegar a unos 2000 grados, aparecen emisiones luminosas, como sucede en una brasa al ser quemada o en el filamento de un foco incandescente.

A los investigadores de finales del siglo XIX les interesaba conocer la relación entre la temperatura del cuerpo y la intensidad de emisión de cada frecuencia. Todos los rayos emitidos son ondas electromagnéticas, como las predichas por Maxwell, y su frecuencia define el tipo de radiación del cual se trata. Las frecuencias más bajas

corresponden a ondas de radio; al aumentar la frecuencia, aparecen las microondas, luego el infrarrojo, la luz visible, el ultravioleta, los rayos X y, finalmente, los rayos gamma. El conjunto de emisiones posibles se conoce como espectro electromagnético.

Con base en una formulación desarrollada por James Jeans y Lord Rayleigh (quien fue director del Laboratorio Cavendish antes que J. J. Thomson), los físicos de la época esperaban que al incrementar la temperatura del cuerpo negro aumentaría considerablemente la intensidad de rayos emitidos en frecuencias altas. Para el caso del ultravioleta, se esperaba un aumento impresionante: al llegar ahí, la emisión crecería hasta infinito. Pero los resultados experimentales mostraron lo contrario: apareció «la catástrofe del ultravioleta».

Diantre, eso suena muy feo. De hecho, cuando yo era estudiante de física y escuché por primera vez sobre «la catástrofe», me imaginé una explosión ocurrida en un laboratorio, con científicos muertos por todos lados. Afortunadamente la cosa no fue tan dramática —ningún investigador fue lastimado⁴—; en realidad, el problema fue que los datos obtenidos no cuadraban con la teoría.

El grado de emisión no crecía indefinidamente, sino que, en frecuencias bajas, la intensidad era pequeña, luego —al aumentar las frecuencias— la intensidad hacía lo propio hasta llegar a una intensidad máxima, la de la emisión (o el color) dominante. El problema era que, si seguía el aumento de las frecuencias, la intensidad disminuía. Puesto de forma práctica: en el infrarrojo, la emisión era muy baja, aumentaba de forma importante en la luz visible para después dar un gran bajón en el ultravioleta.

Y no se trataba de un comportamiento particular a una temperatura específica, la distribución de intensidades

4. Quizá algunos sufrieron serios daños en su ego por no atinar sus predicciones, pero no pasó de ahí.

era similar para diferentes casos. Solamente había algunas variaciones: al aumentar la temperatura, la frecuencia dominante también va haciéndose mayor, se recorre. Sin embargo, ni con eso repuntó el ultravioleta: su intensidad siguió por debajo de la de la luz visible.

En 1893, Wilhelm Wien, también alemán, había creado una fórmula opuesta a la anterior: servía muy bien para predecir la intensidad en frecuencias altas pero fallaba miserablemente con las bajas. Cinco años más tarde, Max Planck, determinado a resolver el latoso problema, se puso a trabajar en los dos enfoques teóricos existentes (el de Rayleigh–Jeans y el de Wien).

Luego de mucho batallar, en un intento desesperado por resolver el problema, Planck unió «acrobáticamente» los dos planteamientos. Podríamos decir, desde el punto de vista matemático, que los recortó a su conveniencia y luego los unió con cinta adhesiva; en sentido estricto, no era un procedimiento válido pero, para su fortuna, obtuvo una ecuación que funcionaba, y que podía predecir de forma acertada el comportamiento de la emisión de radiación a diferentes temperaturas para todas las frecuencias. En 1899 dio a conocer su fórmula y la respuesta de sus colegas fue muy favorable, incluso entusiasta; por fin alguien había dado en el clavo del cuerpo negro. Aún así, Planck no estaba satisfecho, ¿cómo podía estarlo? Realmente su logro era una chiripa, desconocía las razones físicas de su formulación; no tenía idea de dónde había salido.

Como no había logrado deducir la ecuación a partir de principios físicos generales, empezó a estudiar la formulación hacia atrás para entender su origen. Echó mano de los métodos estadísticos de Boltzmann, que exigían que la energía estuviera formada por pequeños pedazos.⁵

5. El mismo Boltzmann llevaba años hablando de átomos de energía pero lo tiraban a loco; nadie le hacía caso porque no se conocía ningún fenómeno que respaldara la idea.

Puesto que era cuestión de procedimiento, pensó que después podría eliminar el engorroso requisito y... ¡magia!Cuál sería su sorpresa cuando vio que la cosa no funcionaba al eliminarlo; volvían a disparatarse los resultados. El problema solamente podía resolverse aceptando la cuantización, tenía que hacer pedazos la energía.

Ahora vale la pena poner las cosas en perspectiva. No se crea que este resultado contempla saltos energéticos enormes, observables en fenómenos cotidianos. Las cuentas obtenidas por Max arrojaron una constante muy pequeña que determina la dimensión de los pedazos de energía: «la constante de Planck» (h). Se trata de un número realmente diminuto: 0.0000000000000000000000000000000000000066 Joules · Segundo (lo cual se abrevia como $6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$).

Esta cuantización aplica siempre que los átomos reciben o liberan energía en forma de radiación; sus emisiones no pueden ser graduales sino que se realizan a través de paquetes indivisibles de ondas. Cabe destacar que no todos los «cuantos» son iguales, la energía de estos pedacitos depende de la frecuencia de la radiación que se esté emitiendo; la energía de un cuanto se obtiene al multiplicar la constante de Planck por la frecuencia de la onda electromagnética en cuestión. Los cuantos con frecuencias bajas, como la del infrarrojo, tienen una energía menor que la de aquellos de luz visible y esta, a su vez, es inferior a la del ultravioleta o los rayos X. Así, al ser calentado un objeto, es cada vez más difícil llevarlo a la energía necesaria para emitir cuantos en frecuencias más altas; los brincos necesarios para que eso sea posible se vuelven cada vez más grandes. Eso explica la caída en la emisión del ultravioleta: la energía ya no alcanza.

En fenómenos cotidianos, el cambio energético pasa totalmente desapercibido para nuestros sentidos. Los

fragmentos de energía son tan pequeños que el proceso parece gradual. De hecho, la Constante de Planck fue considerada inicialmente como un elemento teórico que ayudaba a cuadrar las cuentas; casi nadie pensaba que llegaría a encontrarse en fenómenos físicos. Aún así, había que encontrarle cierto sentido real a los resultados.

Como todos los científicos de su época, Planck, tenía una idea muy burda de la estructura de la materia y del proceso para la emisión de radiación. Su visión contemplaba la existencia de partículas cargadas que emitirían radiación al oscilar. Si se aumentaba la temperatura, las oscilaciones serían más rápidas y producirían ondas con mayores frecuencias; si, además, un oscilador tuviera variaciones infinitamente pequeñas en su vibración, podría emitir un número infinito de frecuencias diferentes. Eso es precisamente lo que no ocurre; tal suposición fue la que condujo a la catástrofe del ultravioleta. Debido a los saltos de energía, la emisión es posible solamente en ciertas frecuencias. Para entender esta idea, apoyémonos en una pequeña analogía.

Imaginemos que les asigno una tarea a mis hijas (Andrea y Karen) y ofrezco pagarles con una de cada una de las denominaciones existentes entre 0 y 100 pesos. Con las monedas y billetes disponibles actualmente (de 1, 2, 5, 10, 20, 50 y 100 pesos, así como de 10, 20 y 50 centavos) yo les daría 188.80 pesos. Pero si existieran más denominaciones (pensemos monedas de 1 y 5 centavos, 3, 8 y 15 pesos, así como billetes de 30 y 60) la cantidad que tendría que darles crecería a 304.86 pesos.

Al considerar nuevas denominaciones con diferencias cada vez más pequeñas entre sí (con cosas locas como billetes de 40.85 o 91.23 pesos), la cantidad seguiría creciendo y yo acabaría pagando un dineral. Pero si el dinero fuera continuo, con cambios infinitamente pequeños,

yo terminaría debiendo a mis hijas una cantidad de dinero infinita.⁶

Lo mismo ocurre con la energía: la intensidad de las ondas emitidas por el cuerpo negro no se hace infinita porque solamente existen ciertas «denominaciones» disponibles —los cuantos—. Y recordemos que, como sucede con el dinero, no todos los fragmentos energéticos tienen el mismo tamaño: Planck definió la energía del cuanto de acción como la multiplicación de su constante por la frecuencia de la onda emitida. Así, las ondas con frecuencias bajas tienen unidades mínimas más pequeñas, y las emisiones de mayor número de ondas por segundo son formadas por cuantos de más energía.

Originalmente, don Max presentó sus resultados como un comportamiento peculiar de la interacción entre materia y energía, no como una propiedad fundamental de la última; en su teoría señaló que la energía electromagnética solo podría ser emitida y absorbida de forma cuantizada. Se vio un poco tímido; sus resultados no lo tenían muy convencido pero, con todo y esto, nunca titubeó para darlos a conocer; creo que antes intentó, sin éxito, deshacerse de la hipótesis cuántica de todas las formas posibles. Cuando publicó sus conclusiones, lo hizo con la esperanza de que alguien llegara a desmentirlas. Pero, pese a que muchos lo intentaron, nadie logró hacerlo. Bueno, pero si no se podía echar para abajo la idea, tendrían que aparecer resultados experimentales que mostraran los efectos cuánticos.

Durante los primeros años del siglo XX no parecía emerger ninguna referencia; quizá por falta de entusiasmo en la búsqueda pues —como ya dijimos— muchos

6. ¡Ufff! Dios bendiga la discontinuidad del dinero. Aunque a quién engaño, con el encanto de mis preciosas siempre acabo haciéndoles todos sus gustos (Karen y Andrea: si están leyendo esto, no lo crean, es un error de imprenta).

pensaban que solamente se trataba de un truco matemático útil para explicar el comportamiento del cuerpo negro.

Ni siquiera había que escarbar tanto para dar en el clavo. Un fenómeno ejemplar, «el efecto fotoeléctrico», había sido descubierto apenas doce años atrás por Heinrich Hertz, aunque, de momento, nadie vio su relación con el trabajo de Planck. Tuvieron que pasar cinco años para que la idea fuera abordada de forma audaz por un científico alemán, joven y altanero: Albert Einstein.

Y es que para acabar de darle vida a la teoría cuántica tenía que llegar alguien como Einstein, con un carácter esencialmente opuesto al de Planck. Desde su más tierna infancia había mostrado poco respeto por el orden establecido, especialmente en lo referente al rígido sistema educativo alemán. Cuando él estaba en el *Gymnasium* su familia se fue a Italia —buscando mejores perspectivas económicas— pero lo dejó sufriendo con la disciplina teutona. Por su insolencia y apatía, muchos de sus profesores consideraban que difícilmente llegaría a ser algo en la vida. La ciencia apasionaba a Einstein pero leía solamente lo que le interesaba estudiar y le importaba poco lo que pidieran sus maestros.

A la mitad de la prepa, el joven Beto decidió que estaba hasta el gorro de los maestros alemanes y dejó su país natal para irse a estudiar a Suiza, donde encontró un ambiente de mayor tolerancia. Pero, en vez de controlar su rebeldía, parece que las escuelas más accesibles la fomentaron. Y es que seamos francos, con una disculpa por el lenguaje, pero el joven Einstein era un mamón hecho y derecho.

En la Escuela Tecnológica de Zurich, ya como alumno de física y matemáticas, hacía lo que quería y rara vez entraba a clase. Debemos aclarar que su profesor, Heinrich Webber, no enseñaba nada posterior a 1870, por lo que el rebelde estudiante lo mandaba por un tubo para leer por

su cuenta los trabajos de Maxwell, Lorentz y Boltzmann. Sobra decir que esto no le causaba la más mínima gracia al Profesor Webber. Pero, con todo y las faltas a clases, su gran inteligencia —con algo de ayuda de los meticulosos apuntes de su compañero Marcel Grossman— logró sacarlo a flote en numerosas ocasiones.

A sus 19 años, en 1898, se involucró sentimentalmente con Mileva Maric, una compañera de clase que llegaría a ser su primera esposa. Ojo, que decimos primera esposa y no primer amor. Einstein era un cuate bastante misógino y en toda su vida solamente estuvo verdaderamente enamorado de una cosa: la física. Eso sí, no le hacía el feo en lo más mínimo a las relaciones íntimas; eran algo que lo entusiasmaba considerablemente desde entonces.

Para Mileva, la relación con Einstein fue muy costosa desde el punto de vista académico; es muy probable que se hubiera volado muchas clases en compañía de su novio, y así se fue rezagando. A la hora de los exámenes para graduarse, en el verano de 1900, ella reprobió mientras que Einstein pasó sin gran problema. Tuvo la oportunidad de volver a presentar un año más tarde para concluir sus estudios, pero quedó embarazada. Para empeorar las cosas, cuando se acercó la fecha del examen, en lugar de ayudarla a estudiar, Einstein se fue de vacaciones con su mamá y su hermana. Mileva volvió a reprobar. Mientras Albert seguía haciéndose pato, ella, destrozada, regresó con sus padres a Serbia, de donde era originaria. Ahí dio a luz a Lieserl, una niña que Einstein nunca conoció; tampoco se sabe muy bien qué fue de ella⁷.

De regreso en Suiza, aunque Einstein ya estaba graduado, no parecía hacer mucha diferencia; le salieron caros el desdén por las clases de Webber y la antipatía que

7. Hay dos versiones de lo que ocurrió con la niña: puede ser que haya sido dada en adopción o que, quizá, muriera víctima de la fiebre escarlata.

eso le valió con el profesor. Fue el único de los cuatro egresados de su grupo que no recibió una plaza de asistente en la escuela. Luego, como la Escuela Tecnológica de Zurich no ofrecía grados de doctor, envió una propuesta de tesis doctoral a la Universidad de Zurich, pero fue rechazado rápidamente. Para acabarla de fregar, no conseguía trabajo en ningún lado; parece ser que, en este sentido, su carácter alzado no le ayudaba mucho. Esta experiencia fue fundamental para hacerlo más humilde.

Como un favor especial, en 1903, el padre de su amigo Marcel Grossman —el mismo que le prestaba los apuntes— le consiguió trabajo como empleado de la oficina de patentes en la ciudad de Berna (también en Suiza). Aprovechó que por fin tenía un ingreso fijo para casarse con Mileva, a quien al parecer le gustaba la mala vida.⁸ Aunque el empleo estaba muy lejos de ser su trabajo ideal, le daba mucho tiempo para pensar, cosa que difícilmente habría podido hacer si hubiera conseguido un trabajo de profesor.

Un año más tarde, se topó con un libro que influyó de forma radical en su trabajo futuro. En el libro *Science et l'Hypothèse*, el francés Henri Poincaré identificaba tres importantes problemas físicos sin solución: la causa del movimiento zigzagueante de las partículas en un líquido (conocido como «movimiento browniano»), la falta de evidencia experimental de la existencia del éter y la explicación del efecto fotoeléctrico. Motivado por el afán de trascender en el mundo científico, Albert se puso a analizar a fondo estos tres retos de la física.

Con esto logró probarle al mundo su genialidad. Resolvió los tres problemas y, además, se dio el lujo de desarrollar otras dos ideas para producir cinco documentos que, en 1905, iniciaron verdaderas revoluciones. Muchas

8. Digo, hace falta ser muy tonta (o masoquista) para regresar con Einstein después de lo que le había hecho.

personas dicen que, desde el punto de vista científico, 1905 fue un «Año Milagroso» para la física; por eso, en 2005 celebramos su centenario con el Año Internacional de la Física.

En uno de los trabajos «extra» —el de la tesis doctoral—, Einstein abordaba la determinación del tamaño de las moléculas; dedujo entonces que sus dimensiones serían del orden de nanómetros (la millonésima parte de un milímetro), sentando así la piedra angular de lo que hoy conocemos como «nanotecnología».

El otro documento tuvo como resultado la proverbial relación entre materia y energía, una de las ecuaciones más famosas en la física: $E=mc^2$. Aun en una ecuación tan corta nos reveló algo fascinante: la materia y la energía son equivalentes y la velocidad de la luz (c) es la moneda de conversión entre ellas.

Si yo quiero saber la cantidad de energía en un taco de bistec con queso solamente tengo que multiplicar su masa por el cuadrado de la velocidad de la luz; o si deseo saber la masa de una emisión de rayos X, divido su energía sobre el mismo cuadrado de la velocidad de la luz. Una elemento interesante que se desprende de aquí —y que posteriormente sería clave para la energía nuclear— es que puedo liberar muchísima energía incluso con una cantidad de materia muy pequeña.

Probablemente el más famoso de sus aportes del año milagroso fue la Teoría Especial de la Relatividad, un trabajo que nadie esperaba —y que a muchos les desagradó bastante en un inicio— pero que llegó para quedarse. Einstein demostró que cuando un cuerpo se mueve a velocidades cercanas a la de la luz, las cosas no resultan como se espera; el tiempo y el espacio dejan de ser absolutos: el primero se dilata y el segundo se comprime; es decir, mientras más rápido nos movemos, el tiempo transcurre de forma más lenta y las dimensiones del espacio se acortan.

Además, sucede que la masa de un objeto (su cantidad de materia) aumenta conforme su velocidad se acerca a la de la luz. Esto tiene bastante lógica; entre más rápido se mueve un cuerpo tiene más energía y, por la equivalencia entre materia y energía, su masa aumenta de forma proporcional. Entre más cerca está de «c» la velocidad del objeto, más energía va a necesitar para incrementar su velocidad porque se ha vuelto más masivo. Es más fácil seguir acelerando cuando la velocidad es el 50% de la de la luz que cuando llega al 80 o 90%.

La Teoría Especial de la Relatividad nos da mucha tela de donde cortar, nos podríamos entretener bastante hablando de ella y sus implicaciones, pero no es parte del relato central de este libro. Solo será importante tener en mente una cosa: en las velocidades a las que se mueven muchas partículas subatómicas, los efectos relativistas se vuelven importantes, afectando las condiciones de masa, espacio y tiempo. Más adelante, todas las teorías para explicar el comportamiento de las partículas dentro del átomo debían tomar en cuenta los efectos relativistas.

Contaban las malas lenguas de la época que algunas de las propuestas en sus trabajos no eran completamente suyas; no existe evidencia de esto, pero los chismes indican que varias ideas se le habrían ocurrido a Mileva; sin embargo —como era mujer y no tenía un grado académico— todo fue publicado con Einstein como único autor. El protagonismo autoral sería una constante durante casi toda su carrera científica: era un lobo solitario que difícilmente compartía los créditos o las culpas. En realidad, analizando sus actitudes académicas, me atrevo a decir que era muy egoísta; tampoco se preocupó nunca por formar discípulos para apoyar sus investigaciones (la educación de nuevos científicos realmente lo tenía sin cuidado).

Dejando aparte su tesis doctoral, todos los trabajos fueron publicados en la revista alemana *Annalen der Physik*.

Resulta curioso que, en un solo año, la misma revista hubiera publicado cuatro artículos polémicos de un mismo autor, desconocido hasta entonces. Da la impresión de que el editor era cuate de Einstein, o estaba urgido de trabajos para llenar la revista, o que, simplemente, supo ver, desde un inicio, el gran potencial en los aportes científicos de los documentos. Como haya sido, los artículos fueron publicados y, si bien llevó algo de tiempo, la física se estremeció. Claro que, a diferencia de Planck, don Beto disfrutó las reacciones desatadas por sus trabajos.

Pero estábamos con los cuantos de energía. Después de tanta vuelta y tanto chisme, vamos a llegar al aporte que trajo a colación a este alemán tan genial, mamila y misógino. Los temas abordados en los otros artículos fueron muy diversos y sus alcances dan para hacer más de un libro. Por eso nos centraremos en el documento que nos interesa directamente: «*Sobre un punto de vista heurístico acerca de la producción y transformación de la luz*». Con ese artículo, Einstein mató dos pájaros de un tiro: mostró un fenómeno físico en que se podía encontrar la cuantización de la energía de Max Planck y explicó el efecto fotoeléctrico.

Básicamente, se pasó por el arco del triunfo las evidencias que decían que la luz es una onda: afirmó que los cuantos estaban portándose como si fueran partículas de luz, las cuales luego fueron llamadas fotones.⁹ Los fotones desaparecerían al chocar con los electrones, cediéndoles su energía y ayudándolos a salir de sus átomos.

9. La primera vez que escuché hablar de los fotones me topé con una cosa realmente curiosa: su masa en reposo es cero. ¡Achis! ¿Cómo está eso de que si no se mueven no tienen masa? Bueno, esto puede verse desde dos perspectivas: para empezar, no hay tal cosa como luz quieta, pues las ondas electromagnéticas siempre están viajando; por otro lado, su masa surge por completo de la energía que llevan —es decir— es una consecuencia de la ya mencionada equivalencia entre materia y energía ($E=mc^2$ o, en este caso, $m=c^2/E$).

En la demostración de la existencia de los cuantos de radiación sucedió algo muy curioso. Normalmente, los físicos experimentales ofrecen ejemplos para las nuevas teorías; hay muchos casos en que se tienen resultados que no cuadran o no se pueden explicar hasta que aparece una propuesta que permite el respaldo del experimento; entonces se hace la publicación correspondiente. Claro está, también hay ocasiones en que los datos que publican sirven para darle al traste a la nueva propuesta y descartarla.

Albert tuvo la fortuna de leer —sin que nadie se lo pidiera— sobre el problema sin resolver del efecto fotoeléctrico; además, al mismo tiempo, tuvo la visión para unir los elementos aparentemente aislados y resolver el problema. El electrón y los cuantos de energía se acababan de descubrir; apenas cinco años antes nadie tenía la información suficiente para resolver el enigma.

Entonces se sabía que la intensidad de la luz que llegaba a una superficie podía asociarse al número de fotones que chocaban en ella. Si aumentaba la intensidad, esto quería decir que también aumentaba la cantidad de electrones desprendidos, aunque la energía de cada electrón era la misma. En cambio, si se usaban fotones «más grandes» (con frecuencias mayores, como en el caso del ultravioleta) se encontraba que los electrones expulsados tenían una mayor velocidad —o energía— al salir.

Con su propuesta, Einstein revivió la postura newtoniana de la luz: resulta que esta sí podía ser un corpúsculo. Así mismo, estableció la existencia física de los efectos cuánticos y abrió la puerta para una gran revolución en la forma que vemos la estructura del átomo. Además, esto dio lugar a la creación de aparatos muy útiles para todos nosotros. Sentó las bases teóricas para la creación de las celdas fotovoltaicas y los sensores de ondas electromagnéticas, como los que se usan para detectar la señal de un control remoto, o los que se instalan en los elevadores

para que las puertas no se cierren cuando alguien va a pasar, o los que se usan en las cámaras digitales.

La trascendencia de este trabajo, y la de los otros que formaron su publicación múltiple, le rindió importantes frutos poco tiempo después. Para 1908, don Beto ya era un científico sumamente reconocido con una plaza de maestro en la Universidad de Berna, aunque también seguía trabajando en la oficina de patentes. Un año más tarde, dejó las dos chambas para aceptar un puesto en la Universidad de Zurich. Para 1911, se trasladó a la Universidad Karl–Ferdinand en Praga y, finalmente, en 1914 se estableció en el Instituto de Física Kaiser Wilhelm en Berlín. Ahí trabajó 18 años, hasta que emigró a Estados Unidos, cuando los nazis llegaron al poder.

Aunque la cosa le pintaba bastante bien académicamente, en lo personal estaba hecho un revoltijo. Desde 1912, Einstein le ponía el cuerno a su pobre esposa;¹⁰ aplicó eso de que «a la prima se le arrima»: andaba con Elsa, una hija de la hermana de su madre y de un primo de su padre (eso es parentesco y no fregaderas). Aunque seguía casado, con dos hijos, la relación estaba muy gastada y «su señora» ya no quiso aguantar tonterías. En 1914, Mileva mandó a Albert al carajo y se quedó en Zurich a vivir con sus muchachos (sus hijos, no se crea que era tan loca como su marido). El divorcio llegó cinco años más tarde, y Einstein aprovechó para casarse con Elsa.

Para evitarse problemas, aclaró muy bien las cosas con su nueva pareja: económica y socialmente, él se encargaría de Elsa y de su hija, quien era producto de un matrimonio anterior; ella tendría la casa en orden y daría satisfacción a las necesidades de Albert, pero no debería opinar en sus reuniones, ni tampoco decir nada ante los múltiples amoríos de su marido. Él podría meterse con

10. Bueno, eso es lo que nos consta; a lo mejor desde antes andaba de travieso.

quien quisiera pero ella tenía que aguantar y poner una buena cara; básicamente, se consiguió una sirvienta con membrete de esposa.

Einstein ha sido lo más parecido a un *rockstar* en el mundo científico, y se dejaba distraer por cuanto mujer se le ponía a modo. Sin embargo, seguía dedicado a la física antes que a cualquier otra cosa.

Por muchos años estuvo concentrado en el desarrollo de la Teoría General de la Relatividad, una teoría orientada a completar la de la Relatividad Especial y que llegó a cambiar nuestra forma de ver la gravedad y el Universo mismo. En ella, Einstein estableció que el tiempo no es algo aislado que se limita a transcurrir, sino que se trata de una dimensión que se une a las tres dimensiones espaciales para formar un continuo espacio-tiempo. Pero eso no es lo más relevante; en su propuesta, Einstein indicó que en la presencia de una masa muy grande —como la de un planeta o una estrella— el espacio-tiempo se ve deformado, se curva. Tal curvatura afectaría todos los cuerpos alrededor del objeto masivo y daría lugar a fenómenos como el movimiento planetario y la desviación de los rayos de luz que pasan cerca.

Esencialmente, don Beto cambió nuestra idea de la gravedad, la cual pasó de ser una fuerza (según Newton) a ser una propiedad geométrica del espacio (en la nueva visión relativista). Aunque inicialmente la teoría causó mucha polémica, fue corroborada en 1919, cuando se estudió la luz de diversas estrellas durante un eclipse total de Sol. Más adelante, la teoría ofreció predicciones sobresalientes; abrió la puerta a la idea de la expansión del Universo y a la de la formación de agujeros negros, entre otras cosas. Pero, aunque son temas fascinantes, esa es harina de otro costal.

Con todo y el gran trabajo necesario para la creación de la Relatividad General, Einstein siempre se mantuvo

pendiente de la teoría cuántica. Hasta cierto punto, se sentía el papá de los pollitos, idea que se reforzó considerablemente porque en la década de 1910 todos le pedían su opinión cuando aparecía una nueva idea en la materia, ya fuera para apoyarla o refutarla. Además, realizó otro importante aporte cuántico (con la idea de la emisión estimulada de radiación) y, posteriormente, se enfrascó en una serie de acalorados debates en la materia con su amigo Niels Bohr.

Pero para agarrarle sabor a todo esto, primero debemos conocer algunos aportes científicos realizados fuera de Alemania, casi paralelamente al trabajo de Planck y Einstein. Tenemos que realizar un viaje al centro del átomo, acompañados por Madame Curie y Ernest Rutherford.

Emisiones y transformaciones

Poniéndome un poquito cursi, podría decir que los conocimientos construidos por la ciencia y la tecnología representan uno de los «tesoros» más grandes que ha acumulado la humanidad a lo largo de su historia. La frase es empalagosa, y hasta ñoña, pero no por eso no deja de ser cierta.

El conocimiento es un precioso cúmulo que puede ser aprovechado por cualquiera con ganas de estudiarlo y trabajar para sacarle jugo. Las personas que han sido capaces de aprovecharlo para crear nuevos aparatos —o mejorar los que ya existen— han hecho verdaderas fortunas; así fue que hombres como Thomas Alva Edison (con el fonógrafo y el foco), Alexander Graham Bell (con el teléfono) y Guglielmo Marconi (con la radio) llegaron a ser sumamente acaudalados.

Todos ellos aplicaron con gran talento una fórmula interesante que no siempre vemos en la escuela: aprovechar los conocimientos para desarrollar inventos y adquirir grandes riquezas. Para ellos, y muchos otros, la búsqueda de fortuna se convirtió en una importante motivación para lograr avances científico–tecnológicos. Era de esperarse, la ambición es parte fundamental de la naturaleza humana; la mayoría de las personas buscamos siempre mejorar en nuestras condiciones de vida.

Sin embargo, los científicos no siempre han buscado llegar a la prosperidad indirectamente. Hubo una corriente de investigadores que querían hacerle al Rey Midas; convertir en oro cualquier cosa que se encontraran a su

paso. Estas personas eran conocidas como «alquimistas» y durante muchos siglos buscaron establecer las condiciones científicas para lograr su ambiciosa meta.

Ahora parece cosa de risa, pero no se crea que eran un montón de viejos chochos alucinando con ideas locas para enriquecerse. Científicos tan reconocidos como Roger Bacon, Tycho Brahe e Isaac Newton participaron en estos esfuerzos; de hecho, los escritos de Sir Isaac en materia de alquimia incluso llegaron a superar en abundancia a sus trabajos de óptica.

Aunque varios siglos de trabajo de los alquimistas se quedaron lejos del objetivo de convertir otros materiales en oro,¹ abrieron importantes caminos para la investigación científica y sentaron las bases de la química inorgánica. Desafortunadamente para la causa alquimista, a inicios del siglo XIX, la aparición de la teoría atómica de John Dalton desmoronó por completo la posibilidad de producir oro químicamente. Si los átomos eran unidades fundamentales de los elementos químicos, las cuales no podían ser divididas, parecía muy complicado —por no decir imposible— hacer algo para que un átomo de un tipo se transformara en otro diferente.

Pero la causa no estaba totalmente perdida; a finales del mismo siglo se abrió un pequeño resquicio de esperanza alquímica. Con el descubrimiento del electrón aparecieron las primeras ideas sobre la existencia de una estructura interna en los átomos, pero aún así, no existía ninguna pista de que se pudiera hacer algo por transmutar los elementos químicos. Por otro lado, los científicos ya no le hacían mucho caso a esta idea; estaban ocupados en cosas más urgentes y fascinantes, como los rayos que parecían estar apareciendo a diestra y siniestra. Los afanes de Rey

1. Hay que aclarar que la vulgar ambición monetaria no era el único estímulo de estos afanosos investigadores; además, buscaban la fuente de la eterna juventud y el elixir de la vida. Por lo menos no se les puede acusar de aspiraciones mediocres.

Midas pasaron a segundo o tercer término. A pesar del gran poder de la codicia, parecía mucho más estimulante entender las emisiones que nos ayudan a ver dentro de las personas que producir algo de oro. Esto se hizo más marcado gracias a que los rayos X ya eran una realidad y, por su gran utilidad médica, representaban un potencial económico significativo.

En esas estaba el mundo científico de finales del siglo XIX cuando, a sus 29 años, la joven y bella Marie Sklodowska Curie decidió que sería buena idea dedicarse a estudiar la radiactividad natural descubierta por Becquerel. Sin duda era intrigante averiguar cómo sería posible que los materiales radiactivos retaran uno de los principios físicos más importantes: el establecido por la Ley de Conservación de la Energía.

A casi todos nos han hecho repasarla hasta el cansancio en la escuela, como un mantra que repetimos con una fe casi ciega: «la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma».² Esto quiere decir que —en todos los procesos llevados a cabo— la energía tiene que venir de algún lado y va a parar a otro: no puede aparecer de la nada ni desaparecer inexplicablemente.

Por aquel entonces se había observado en todos lados la certeza de la dichosa conservación. Sin embargo, se acababa de encontrar un fenómeno en que algunos materiales liberaban energía en forma de radiación y no se tenía idea de dónde procedía; solamente se sabía que ocurría siempre en presencia de uranio, un elemento muy pesado, pero nadie tenía idea de por qué sucedía esto o de si podrían existir otros materiales con las mismas características.

2. A partir del aporte de Einstein combinaríamos esta Ley con la de la Conservación de la Materia para decir algo así: «la materia-energía no se crea ni se destruye, solo se transforma».

Marie estaba determinada a averiguarlo, así que se puso a trabajar a tope en el asunto con una gran ventaja que facilitó el inicio de su labor. Normalmente, antes de investigar en un tema nuevo, los científicos tienen que estudiar a conciencia el trabajo realizado previamente por sus colegas.³ Para su fortuna, la radiactividad natural no había sido estudiada por nadie más que Becquerel (recordemos que él mismo estaba molesto porque los demás científicos no lo pelaban). Así, no tuvo más que devorarse las pocas publicaciones de este hombre en el tema y puso manos a la obra.

Aunque para entonces Madame Curie ya se distinguía como una científica brillante y prometedora, tenía muy pocos recursos a su disposición; la Universidad de París le había asignado como laboratorio un salón húmedo y destartalado en la planta baja de la Escuela de Física. Aun así, no se dejó achicopalar por las limitaciones e inició su investigación doctoral el 16 de diciembre de 1897.

Su idea para trabajar era buena y sencilla a la vez: Röntgen ya se había dado cuenta de que sus rayos producían descargas eléctricas y, para su suerte, Marie contaba con un aparato muy bueno para medir pequeñas corrientes (inventado por su amado Pierre Curie, algunos años antes de conocerla). Entonces, gracias al dispositivo provisto por su marido, nuestra amiga podría medir las descargas eléctricas presentes en un material y con eso establecer su grado de radiactividad.

Con la determinación de descubrir nuevos elementos radiactivos, Madame le entró a la «talacha» de separar los materiales activos presentes en la pechblenda,⁴ un material

3. De otra manera se arriesgan a trabajar mucho para producir conocimientos que ya han sido obtenidos por otro investigador, lo cual puede significar el desperdicio de meses o incluso años de trabajo.

4. Es una versión impura de la uraninita, un compuesto de uranio y oxígeno. Su nombre viene del alemán y significa algo así como alquitrán brillante, probablemente por el aspecto del mineral.

de desecho de las minas de uranio que había mostrado un gran potencial radiactivo. Si bien el reto parecía desgastante y complicado, después de todo lo que había pasado para hacer una carrera científica en París, esta tarea no era suficiente para intimidar a la joven investigadora.

Marie era originaria de Polonia; de Varsovia, para ser exactos. En ese entonces, su nación no existía como tal, estaba ocupada por tres imperios rivales que se la habían repartido (Alemania, Austria–Hungría y Rusia). A ella le tocó crecer en el ambiente represivo de la parte rusa, en donde se suprimió y «rusianizó» la cultura local, de manera que las mujeres no podían acceder a la universidad.

Siendo muy joven sufrió la doble tragedia de perder a su hermana mayor, Zofia, por tifus, y a su madre, por tuberculosis. Esta dolorosa experiencia la llevó a renunciar al catolicismo, que le había sido inculcado por su mamá, para convertirse en una agnóstica convencida. Aunque seguía creyendo en la existencia de un ser superior ya no tenía fe en las religiones; se alejaba así de su lado espiritual para apoyar su vida en la visión pragmática del conocimiento de la naturaleza.

Su padre, Wladyslaw Sklodowski, profesor de física y matemáticas, influyó en ella considerablemente para desarrollar la ambición de perseguir una formación científica. La idea no era nada descabellada: Marie era una niña sobresaliente, leía perfectamente desde los 4 años, en la secundaria fue siempre la mejor alumna de su clase y hablaba fluidamente cuatro idiomas (alemán, francés, ruso y polaco). Además, estaba realmente enamorada de la física.

Algo tan «trivial» como la opresión rusa no iba a interponerse entre ella y su gran pasión. Se arriesgó a la cárcel y a la deportación al participar —primero como estudiante y luego como maestra— en la Universidad Floitante de Varsovia, una institución clandestina, dedicada a formar mujeres comprometidas que pudieran educar

al pueblo polaco y prepararlo para resistir la opresión de los invasores. Este trabajo tuvo una gran trascendencia para mantener viva la cultura polaca en condiciones muy difíciles; incluso, sirvió como plataforma para múltiples esfuerzos insurgentes.

Sin embargo, aunque ayudó considerablemente a alimentar su pasión por la ciencia, una universidad como esta no tenía las condiciones para satisfacer a plenitud la ambición académica de Marie. La joven tomó la decisión de estudiar en la Sorbona, parte de la Universidad de París, idea que fue animada por la presencia de muchos paisanos suyos en la capital francesa. Pero había un pequeño detalle: su familia no tenía dinero suficiente para enviarla a ella ni a su hermana mayor Bronya (quien quería estudiar medicina) a prepararse en la Ciudad Luz. El obstáculo no duró mucho tiempo; a Marie se le ocurrió una idea para resolver el problema de ambas. Ella trabajaría como institutriz y dedicaría todo su sueldo a costear los estudios de Bronya, quien al obtener su título se encargaría de pagarle el favor.

Tras convencer a Bronya, que inicialmente se oponía a ser mantenida por su hermanita menor, consiguió trabajo como institutriz con la familia Zorawski (la cual vivía en el campo, 80km al norte de Varsovia). Luego de un viaje largo y solitario, se instaló en su trabajo docente con las dos hijas pequeñas de sus patrones. Además, mostrándose incansable, siguió fiel a la filosofía de la Universidad Flotante: en su tiempo libre les daba clases a los niños de los campesinos de la región.

Marie duró cuatro años en esta labor, dedicada casi por completo a educar pequeñines y a enviar dinero para su hermana. Bueno, también se las arreglaba para hacer un poco de espacio para su corazoncito. Se enamoró perdidamente de Kazimierz Zorawski⁵ (el hijo mayor de sus

5. Kazimiers fue uno de los matemáticos más destacados en la historia de Polonia; sus aportes se encuentran al mismo nivel que los de hombres de la talla de Nicolás Copérnico y Stefan Bergman.

jefes), quien inicialmente correspondió sus sentimientos. Pero su gran decepción fue que Kazimierz nunca se atrevió a retar a sus padres para casarse con ella. Aunque les agradaba como empleada, los señores de la casa la consideraban socialmente inferior y no la querían como nuera.

Resignada a que su relación no prosperaría, en noviembre de 1891 se decidió a dejar atrás esta amarga experiencia para seguir sus aspiraciones científicas: compró el boleto más barato que encontró y partió a París en un pesado viaje de 1,600 kilómetros.

Inicialmente vivió con su hermana y su cuñado, pero pronto se dio cuenta de que tres son multitud. Puede ser que no quisiera estorbar en el hogar de Bronya o, lo más probable, que buscara estar sola para estudiar a sus anchas sin ser molestada. Las comodidades no le preocupaban mientras pudiera entregarse por completo a la ciencia; vivía de forma muy limitada en una habitación helada, apenas comiendo; hasta llegó a desmayarse en la calle por su mala alimentación.

Para ella todas esas privaciones valían la pena; trabajaba al máximo para destacar en la escuela y su esfuerzo dio frutos: fue la primera mujer en obtener el equivalente a una licenciatura en ciencias naturales en la Universidad de París; además, lo hizo con el mejor promedio de su generación. Luego obtuvo también la licenciatura en ciencias matemáticas, con la segunda mejor calificación de la clase. Era muy dedicada, tirando a ñoña, y no permitió que los sentimientos se metieran en su camino al éxito científico. Sus compañeros, fascinados por su atractivo físico, le tiraban constantemente la onda, pero ella aún estaba muy dolida por lo sucedido con Kazimierz y nunca le hizo caso a ninguno.

Su talento y dedicación no pasaron desapercibidos, y pronto recibió la oportunidad de desarrollar su primer proyecto científico. La Sociedad para la Promoción de la

Industria Nacional la invitó a realizar un estudio sobre las propiedades magnéticas de los aceros templados. Ella estaba ansiosa por iniciar esta empresa, pero la Sorbona no tenía instalaciones adecuadas para realizar la investigación. Algunos amigos polacos acudieron a su rescate y le presentaron al director del Laboratorio de la Escuela de Física y Química de París: Pierre Curie, con la esperanza de que pudiera apoyarla. Este hombre no pudo ofrecerle un espacio adecuado en su laboratorio, pero al poco tiempo eso pasó a segundo plano, pues el amor llegó a tomar el primer lugar. Marie no era presa fácil, pero a sus 35 años Pierre era un hombre alto y elegante, con una imagen impecable y causó un gran impacto en ella; Marie terminó cayendo redondita ante sus encantos.

Los enamorados encontraron muchos elementos en común; ambos eran sumamente idealistas y centraban gran parte de sus vidas en la ciencia. Las similitudes fortalecieron el romance que se coronó con el matrimonio el 26 de julio de 1895, formándose así la pareja científica más famosa de la historia. La boda le trajo buenas noticias a los Curie: poco antes de casarse, Pierre obtuvo una cátedra de física en su institución y finalmente pudo proveerle a su amada el espacio necesario para su investigación.

Ahora nada podía detener el afán científico de Marie. Su labor ni siquiera sufrió retrasos con el nacimiento de su hija Irène, en 1897; tres meses después de dar a luz ya terminaba el informe sobre sus hallazgos de los aceros templados. Estaba feliz y era imparable en sus investigaciones; después de recibir una buena respuesta a su reporte no perdió tiempo para ponerse a buscar el tema de su tesis doctoral. Cuando encontró el trabajo de Becquerel se sintió entusiasmada por la posibilidad de entender un fenómeno completamente nuevo.

Para obtener información sobre la radiactividad, Madame Curie se metió a fondo en el estudio de las sales de

uranio. Encontró que el grado de emisión solo dependía de la cantidad de uranio en el material; otros factores como luz, temperatura o la unión del uranio con otros elementos no afectaban para nada. Luego quiso saber si existirían otros materiales con propiedades radiactivas y analizó un gran número de especímenes de elementos químicos. Solamente el Torio, el segundo elemento más pesado conocido entonces, presentaba emisiones similares.

Aquí debemos hacer un pequeño paréntesis. A finales del siglo XIX, la química era un área de la ciencia que operaba alrededor de una caja negra. Se conocían las propiedades de los elementos químicos, pero los investigadores no tenían la más mínima idea sobre cómo surgían o de dónde venían. Ya se contaba con la famosa tabla periódica, propuesta por el ruso Dmitri Mendeleiev, que agrupa los elementos de acuerdo con sus características; sin embargo, el acomodo de algunos elementos parecía algo caprichoso.

La mejor forma de acomodarlos era por masa, pero no estaba claro por qué había brincos extraños de unos elementos a otros. La referencia para medir la masa atómica fue la del hidrógeno, el elemento más ligero de todos; así, la masa del hidrógeno es 1, la del helio salta a 4, luego está el litio con 7 y el berilio con 9, para el boro es casi 11, el carbono 12 y el nitrógeno 14. Conforme se avanza en la tabla, las masas siguen variando ligeramente respecto de lo que se podría esperar y cada vez presentan aumentos mayores, inexplicables para los científicos de inicios del siglo pasado. Además, al ordenarlos de esa manera, sus propiedades no siempre cuadraban como deberían y se debían hacer algunos arreglos arbitrarios. Por ejemplo, la masa atómica del argón es poco menos de 40 y la del potasio es 39; sin embargo, las características químicas del argón lo acomodan primero en la tabla.

Pese a estos conflictos, el sistema de distribución de Mendeleiev había probado ser muy exitoso; originalmente,

la tabla presentaba huecos pero poco a poco se fueron llenando con el descubrimiento de nuevos elementos, los cuales encajaban a la perfección con las características predichas por la tabla. Con todo y esto, el asunto no cobraba mucha claridad; simplemente, no se tenían las bases para entender la distribución periódica de los elementos ni para explicar cómo los más pesados presentaban emisiones radiactivas.

Pero volvamos con los Curie; al seguir con su análisis de emisiones en diferentes materiales, se toparon con una gran sorpresa, que resultó ser algo fascinante: la pechblenda era casi cuatro veces más activa que el uranio puro. Este material compuesto debía contener una pequeña proporción de una sustancia capaz de emitir una cantidad monstruosa de rayos. Se acababan de topa con la oportunidad de encontrar un poderoso nuevo elemento. La investigación se veía tan «apetitosa» que Pierre abandonó por completo su propio trabajo —sobre cristales— para ayudar en la demandante labor de su esposa.

Fueron aislando los fragmentos que presentaban mayores emisiones; partían el material y medían los pedazos que seguían siendo altamente radiactivos, hasta obtener un material puro con un grado impresionante de actividad. Enviaron la muestra a un análisis de espectrografía y confirmaron sus sospechas: se trataba de un nuevo elemento químico. Le dieron el nombre de polonio —en honor a la patria de Marie— y anunciaron sus hallazgos en julio de 1898. Tan solo seis meses después encontraron otro elemento desconocido hasta entonces con un grado de emisiones aún mayor, al cual llamaron radio. Además, pese a que no tenían una idea clara del proceso que la generaba, fueron los primeros en proponer que la radiación venía del interior del átomo.

Muchos científicos se mostraron escépticos y dudaron de sus resultados; había quienes decían que sus hallazgos

solamente correspondían a mezclas de elementos conocidos anteriormente. Esto era un error, pero tenía cierta lógica, considerando la gran masa atómica de los elementos descubiertos. Era necesario contar con muestras más grandes para ratificar los primeros resultados publicados y callar muchas bocas en el proceso.

Aunque la gran actividad del radio facilita su detección, solamente forma la millonésima parte de la pechblenda. Para obtener 400mg de radio, los Curie requirieron de varias toneladas del negro mineral, así como 50 toneladas de agua y otras seis de sustancias químicas para el trabajo de procesamiento y depuración. Después de tres años de arduo trabajo, el 28 de marzo de 1902, pudieron acumular suficiente radio para realizar las pruebas que confirmaron definitivamente que se trataba un nuevo elemento, con una masa 226 veces más grande que la del hidrógeno. Un año más tarde, con estos datos en la mano, Marie no tuvo ningún problema para obtener su doctorado; sabía más del asunto que cualquiera de los jurados de su tesis (incluido su asesor, el mismísimo Henri Becquerel).

Luego, para ponerle la cereza al pastel, cerraron 1903 con una noticia grandiosa: recibirían —junto con Becquerel— el Premio Nobel de Física por sus estudios de radiactividad. Marie fue la primera mujer en obtener esta distinción, lo cual no era mucho decir entonces porque apenas era la tercera edición del galardón; sin embargo, tendrían que pasar más de 40 años para que una mujer que no se apellidara Curie ganara un Premio Nobel en alguna ciencia.

Con este galardón, sus resultados recibieron gran difusión en todo el mundo; tal como sucedió antes con los rayos X, el radio se convirtió en la sensación y muchos lo consideraron una especie de material milagroso. Sus aplicaciones —científicas, industriales e incluso cosméticas— empezaron a aparecer por todos lados. Pronto

se ubicó como la sustancia más cara del mundo, con un valor de 750,000 francos de oro el gramo. Pese al gran potencial económico del descubrimiento, la pareja nunca patentó sus hallazgos; creían que los avances científicos debían estar a disposición de la humanidad y despreciaban la posibilidad de lucrar con ellos, su visión oscilaba entre la nobleza y la ingenuidad.

Ni siquiera les interesaba la fama. Es cierto que el auge del nuevo elemento colocó a los Curie en el centro de los reflectores, pero era muy a su pesar; la notoriedad social no les preocupaba mucho, aunque tampoco creo que les molestara su lugar en la cima del mundo científico.

Su fama era tal que una famosa vedette, recién llegada al *Moulin Rouge*, les dio una función especial para pedirles una corona de radio; aunque el espectáculo les agradó bastante, le aclararon que no tenían material suficiente para hacerla (además, seguro habrán pensado que aunque lo tuvieran lo usarían para la investigación y no para cumplirle caprichos a cuanta hermosa bailarina se les acercara).

Sin embargo, los Curie pagaron muy caro su éxito. La prolongada exposición a los rayos de las diferentes sustancias que estudiaban causó estragos en su salud: ambos tenían quemaduras en las manos, Pierre sufría de dolores punzantes en las piernas y Marie perdió un bebé. No tenían idea del peligro al que los exponían los rayos emitidos por sus nuevos elementos.

Poco después, científicos alemanes dieron a conocer un informe sobre los efectos de los rayos en el cuerpo humano; era una llamada de atención para todos aquellos que se encontraban expuestos a la radiación. En lugar de asustarse o aprovechar la alerta para realizar sus investigaciones con más cuidado, Pierre empezó a experimentar con su propio cuerpo: se ató al brazo una venda con sales de radio y obtuvo como resultado una herida que tardó varios meses en sanar. Aunque el experimento fue

bastante enfermo, y quizá un poco masoquista, le hizo pensar sobre el potencial del radio para destruir células cancerosas. Casi de inmediato, empezó a colaborar con médicos franceses, desarrollando la «curieterapia» (lo que hoy conocemos como radioterapia).

Los riesgos tomados en las investigaciones salieron baratos a los Curie, los efectos de la radiactividad no les causaron graves problemas de salud de forma inmediata. La tragedia de esta familia llegaría el 19 de abril 1906 por otro camino. Ese día, cuando Pierre iba a su laboratorio, caminando bajo una intensa lluvia, se resbaló al cruzar la calle y fue atropellado por un carruaje que pasó sobre su cabeza. Murió a causa de graves fracturas en el cráneo.

Marie quedó destrozada, la pérdida de Pierre le arrebató a su esposo, colega y padre de sus hijas. Ahora tendría que criar por su cuenta a las pequeñas Irène y Eva. Pero no quedó desamparada, la Sorbona le otorgó el cargo que Pierre ocupaba desde 1904. Madame Curie era la primera mujer en ocupar una cátedra en 650 años de historia de la Universidad de París. Además, recibió apoyos considerables para establecer su Instituto del Radio, con laboratorios de radiactividad y «curieterapia». Aunque aprovechó estas nuevas oportunidades, lamentaba profundamente que todos estos beneficios no hubieran llegado sino hasta la muerte de Pierre.

En el plano puramente científico, Marie siguió trabajando tanto o más que antes, consolidándose como la principal experta mundial en radiología. En Bruselas, en 1910, se realizó el Primer Congreso Internacional de Radiología con el fin de establecer el estándar internacional del radio. La unidad fue bautizada como «Curie» y, pese a los intentos de otros científicos por participar en su definición, Madame hizo un berrinche para ser la única en hacerlo; la «pelota» le pertenecía y ella debía poner las reglas. Su autoridad prevaleció, se encargó de crear el estándar y más

tarde ella, personalmente, selló el espécimen patrón que depositó en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas.

De igual manera que encontró vida científica tras la partida de Pierre, tampoco le llevó demasiado tiempo reencontrarse con el romance. Marie ya no era ninguna jovencita pero seguía siendo una mujer atractiva y, tras guardarle algunos años de luto a su esposo, inició una relación con un hombre cinco años menor que ella. Se trataba de Paul Langevin, un científico⁶ guapo y carismático que regresó la alegría a su vida. Cuentan que por ahí de 1910, con el enamoramiento a flor de piel, fue muy notorio el cambio en Marie; desde su estado de ánimo hasta su forma de vestir (pasó de los lúgubres vestidos grises y negros a ropa mucho más alegre).

Pero poco le duró el gusto. Un año más tarde se destacó el escándalo científico-pasional más grande de todos los tiempos. La prensa parisiense le dio vuelo a la hilacha con este chisme de proporciones mayúsculas, las críticas se fueron con todo sobre el tórrido romance protagonizado por Madame Curie y Langevin. ¡Bola de metiches! ¿Qué tenían que andar criticándola? Era viuda y esperó el tiempo prudente tras la muerte de Pierre. Ah, pero había un «pequeñísimo detalle» que no hemos mencionado: Langevin estaba casado.

Precisamente fue Jeanne Langevin, la esposa del científico, quien, cansada de que le pintaran el cuerno, soltó la sopa a la prensa. Para las condiciones de la época, el frenesí informativo fue equivalente a los escándalos de Brad Pitt y Angelina Jolie. Desafortunadamente para Marie, los parámetros morales de la época hicieron que todo el peso de la condena moral se fuera sobre ella. Inicialmente se le tachó de «rompehogares», pero luego los ataques se salieron de los límites de la razón. Algunos medios

6. Curioso: los tres grandes amores de su vida fueron grandes académicos; aparentemente, los ñoños ejercían una poderosa atracción en Marie.

empezaron a cuestionar la validez de su trabajo científico, insinuando que era una oportunista que se había colgado del talento de su esposo, e incluso hubo quien sugirió que debía ser despedida de la Sorbona y regresada a su país. Los ataques llegaron a tal extremo, que se realizaron cuatro duelos para defender el honor de Marie, uno de ellos protagonizado por Paul Langevin y un escritor sensacionalista.⁷

Justo en ese momento de gran desgaste, Madame Curie recibió su segundo Nobel, ahora de Química; la distinción vino a reforzar su lugar en el mundo académico y la puso a la cabeza del selecto grupo de científicos que han obtenido el galardón en dos ocasiones (de hecho, es la única persona que ha ganado un premio de química y otro de física). Pese a la trascendencia del honor, Marie se mostró frágil y apagada al recibir su premio en Estocolmo, era apenas una sombra de sí misma; a su regreso a París sufrió un colapso debido al gran estrés al que estaba sometida con todos los chismes a su alrededor. Por fortuna, su salud mejoró notablemente cuando se enteró de que su nombre no aparecía en los documentos legales del divorcio del matrimonio Langevin.

Aunque el enlace entre su amante y Jeanne terminó poco después, Marie ya no quería queso sino salir de la ratonera y limitó su relación con él a lo estrictamente científico.⁸ Todo el ajetreo del escándalo sentimental la había desgastado demasiado como para seguir en el ojo del huracán. Prefirió dedicar el resto de su vida a la ciencia y la familia, elementos que acabaron indisolublemente unidos.

7. Más que dramático, este duelo fue ridículo, pues luego de toda la formalidad inicial, los involucrados se limitaron a disparar al aire y dar por satisfechos sus agravios.

8. Sin embargo, hay fuerzas —románticas y científicas— que no pueden ser detenidas, aún a través de varias generaciones. Dos nietos de los enamorados (Hélène Joliot-Curie y Michel Langevin) acabaron casándose. Ambos se dedican a la física nuclear y tienen un hijo, Yves, que es astrofísico. Ese sí que es pedigrí científico.

Su hija mayor se incorporó al trabajo de investigación en radiología con gran ánimo, apoyando directamente a Marie. Irène, como sus padres, encontró el amor en el laboratorio: se casó con Frédéric Joliot, el asistente personal de su madre. El matrimonio era conocido como los Joliot-Curie y el esposo portaba con particular orgullo el apellido de su familia política. La pareja recibió el Nobel de Química en 1935 por su labor en la síntesis de nuevos elementos radiactivos.

Sin embargo, Marie no alcanzó a vivir la satisfacción de verlos triunfar en el mundo científico; falleció el 4 de julio de 1934 víctima de leucemia, como consecuencia de su prolongada exposición a la radiación. Resulta una gran ironía que la persona que probablemente sabía más de este asunto en el mundo no se protegiera de forma adecuada contra las emisiones con que trabajó gran parte de su vida. Aunque inicialmente no tenían mucha idea del peligro asociado a la radiación, antes de la muerte de Pierre la pareja ya tenía bien claros los impactos negativos de los rayos en las células. Pero así tenía que ser, ni los grandes riesgos inhibieron la pasión de Marie por la radiación.

En su época, solamente existió una persona con una pasión semejante por el asunto, un hombre verdaderamente radiactivo que completó el trabajo científico de los Curie para explicar los fundamentos de la radiación. Fue el primer científico que identificó nuevas emisiones presentes en ese fenómeno (y también supo protegerse de ellas): Ernest Rutherford. Era un investigador de gran talento, científico, personal y social, estableció fructíferas colaboraciones con los Curie y, además, fue un gran amigo que apoyó a Marie durante sus momentos más difíciles.

Don Ernest era un gran amigo y también se caracterizó por su enorme entrega al romanticismo. Sus abundantes cartas a Mary Newton —su novia por muchos años y posteriormente su esposa— dejaron clara su naturaleza

acaramelada. Era cursi a más no poder; en una ocasión le comentó a Mary cómo deseaba que sus artículos científicos fueran novelas para poder dedicárselos. Debo aclarar que ser cursi no tiene nada de malo —si fuera pecado yo ya estaría condenado—; además, para nuestros chismosos intereses resulta muy útil que Rutherford haya sido así. Aparte de su amor por Mary, sus cartas dejaron plasmada a detalle la visión del mundo que tenía en su juventud.

Veía el avance de la ciencia como una carrera, le gustaba sentirse entre los «corredores» más adelantados y ser reconocido por ello. Le importaban poco las formalidades, los títulos nobiliarios y los grados académicos, pero se mostraba muy respetuoso de los méritos científicos. Era alto, corpulento y tenía un bigote de morsa que lo distinguió toda su vida; parecía más un jugador de rugby que un científico.

Pasó a la historia por su descubrimiento del núcleo atómico, pero, injustamente, no recibió el Premio Nobel por este hallazgo; sin embargo, hizo muchos otros aportes de gran trascendencia, fue el primer ser humano que logró una transmutación de elementos químicos: en 1919 convirtió nitrógeno en oxígeno. No consiguió oro, pero demostró que era posible transformar el átomo de un elemento en otro, con lo que hizo realidad el sueño de los alquimistas, aunque no era algo que le estimulara mucho (más bien lo desdeñaba).

Después del aporte de Rutherford, la ciencia no volvió a ser la misma; de hecho, el mundo no volvió a ser el mismo. Recapitulando rápidamente sus aportes: revolucionó nuestra idea de la estructura de la materia, abrió la puerta para la energía nuclear y desarrolló el método de esparcimiento (*scattering*) —la forma más efectiva para conocer la estructura atómica—. La luz carece de sentido dentro del átomo, no es posible observar directamente en su interior para conocerlo. A Rutherford se le ocurrió lanzarle

pequeñas partículas para ver cómo se comportaban al rebotar con él, dándonos con ello una idea de su estructura y las características de sus componentes. Esta estrategia sigue usándose hoy en día, es la base del funcionamiento de los grandes aceleradores de partículas como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC).

Eso sí, la modestia nunca fue una de sus características fundamentales; en una ocasión le comentaron: «Profesor, qué suerte tiene usted, siempre en la cresta de la ola», a lo que respondió: «Es que yo he hecho la ola». Pero bueno, se lo merecía. Sin duda fue uno de los más grandes científicos del siglo XX y, además, maestro de una importante camada de investigadores que cambiaron por completo nuestra forma de ver el mundo.

Nada mal para un «rancherito» de Nueva Zelanda. A pesar de ser un joven con gran presencia y un carácter imponente, cargaba con el estigma de proceder de la lejana isla de Oceanía cuando llegó a estudiar un posgrado en Inglaterra. A su llegada al laboratorio Cavendish, en 1895, fue blanco de numerosas burlas por parte de sus compañeros. Hacía poco que la Universidad de Cambridge se había abierto a las colonias británicas, y Rutherford —uno de los primeros en llegar en estas condiciones— era mal visto por los otros estudiantes que sentían que le estaba robando el lugar a un inglés. Esto se agudizó con la envidia, pues sus habilidades pronto lo convirtieron en el consentido del director, el famoso J. J. Thomson.

A Rutherford nunca nadie le había regalado nada, estaba bien habituado a trabajar para ganarse las cosas (especialmente el prestigio académico). De la misma forma que había ocurrido con Faraday y Madame Curie, su familia no contaba con los recursos necesarios para costear su educación. Pero eso nunca fue un obstáculo, porque siempre se las arregló para conseguir becas que le permitieron seguir estudiando. Sin embargo, parecía estancado

cuando concluyó sus estudios de licenciatura: no conseguía trabajo ni apoyo para seguir con un posgrado. Con la idea de salir de esta situación, participó en un concurso para obtener una beca británica —de la Exhibición Mundial de 1851— que le permitiría continuar estudiando en alguna universidad inglesa. Echó mano de su gran talento experimental para construir un impresionante detector de ondas electromagnéticas de baja frecuencia (llamadas ondas de radio, aunque no tienen nada que ver con el elemento químico que fue descubierto por los Curie). Aunque el aparato funcionaba a las mil maravillas, solamente le sirvió para conseguir el segundo lugar.

Resignado, regresó a trabajar a la granja familiar. Un día —mientras desenterraba papas— le avisaron que el ganador del primer premio no lo reclamaría y que la beca sería para él. Completamente emocionado, Ernest empezó a gritar que esas eran las últimas papas que cosecharía; su vida acababa de cambiar radicalmente.

Desafortunadamente, la beca no cubría los gastos de traslado, por lo que Rutherford tuvo que pedir prestado para realizar su viaje soñado al ombligo del mundo científico; al poco tiempo partió a Inglaterra, y ahí eligió la Universidad de Cambridge.

Ya en el Laboratorio Cavendish, Ernest continuó el trabajo de detección de ondas de radio con resultados espectaculares para la época: podía captar señales a una distancia de más de 800 metros.⁹ Thomson no tardó en quedar impresionado con las habilidades de su «nueva adquisición»,¹⁰ tanto que lo presumía en cada una de las reuniones académicas a las que asistía.

9. En ese entonces, ningún otro investigador había logrado un alcance semejante; por ejemplo, los experimentos originales de Hertz con ondas de radio se habían realizado con el emisor y el receptor ubicados en una misma habitación.

10. Algo así como Alex Fergusson cuando llegó el Chicharito Hernández al Manchester United.

J. J. Thomson —como todo el mundo en ese tiempo— estaba muy emocionado con la aparición de los rayos X y animó a su alumno a dedicarse al asunto científico de moda, dejándole a otros la labor «ingenieril» de perfeccionar la radio.¹¹ Rutherford ni sufrió ni se acongojó al dejar atrás su labor tecnológica, pues también quería desentrañar aspectos fundamentales del funcionamiento de la naturaleza, y el estudio de los rayos (catódicos, X y ultravioleta) parecía ofrecer grandes oportunidades.

Ya metido en el asunto de los rayos, su talento le fue de gran utilidad para avanzar en la escala académica; las burlas bajaron y el reconocimiento aumentó de forma asombrosa. Asimismo, apoyó considerablemente el avance de la investigación de su profesor. Participó en algunos de los experimentos que condujeron a Thomson al descubrimiento del electrón, sobre todo los relacionados con la determinación de su masa y su carga. Su gran habilidad para construir aparatos experimentales resultaba sumamente útil, sobre todo tomando en cuenta la discapacidad de J. J. en la materia.

Al conocer de los hallazgos de Becquerel, el corpulento neozelandés se puso a experimentar con la radiactividad. Envolveró uranio con una serie de capas de aluminio delgado y se dio cuenta de que no todos los rayos penetraban el material con la misma profundidad. Así distinguió dos nuevos tipos de emisiones desconocidas hasta entonces. Las nombró con las primeras letras griegas: alfa (α) y beta (β); la segunda avanzaba más en las capas de aluminio, es decir, tenía un mayor grado de penetración en la materia que la primera. Tiempo después, Paul Villard descubrió otros rayos mucho más penetrantes que fueron bautizados por el propio Rutherford como rayos gamma (γ).

11. El gran beneficiado fue Marconi, quien se hizo rico con el desarrollo de la radio y además se llevó su buena dosis de prestigio académico al ganar el Premio Nobel de Física de 1909.

De los tres, los únicos rayos, lo que se dice rayos, eran los gamma, unas ondas electromagnéticas de muy, muy alta energía. Más adelante se revelaría la naturaleza de las otras emisiones; las beta eran en realidad electrones (¡rayos catódicos!) y el mismo Ernest descubrió, años más tarde, que las alfa eran iones positivos de helio (es decir, átomos de ese elemento sin electrones).¹²

Con estos aportes, el neozelandés se hizo de una gran reputación como investigador y, con el apoyo de las palancas de su mentor, recibió una muy buena oferta de chamba en la Universidad de McGill (ubicada en Montreal, Canadá). Aunque la idea de ir a vivir del otro lado del mundo no le atraía mucho, la posibilidad de casarse con Mary Newton —la prometida que había dejado en su terruño— inclinó la balanza y, en 1898, se mudó a Montreal para asumir la cátedra de física. Dos años más tarde, luego de pagar deudas y hacer un pequeño ahorro, ya estaba felizmente casado.

El traslado a Montreal fue realmente difícil para él, por lo menos en lo profesional, ya que representaba un obstáculo para su participación en «la carrera» por explicar la radiación. Era como correr a ciegas, sin saber qué estaban haciendo los demás; no podía enterarse con rapidez de los avances de los otros competidores, como los Curie y Becquerel. Se había alejado de los máximos reflectores de la ciencia mundial para ir a un lugar donde lo valoraban y apoyaban al máximo; sin embargo, tardaba meses en enterarse de los descubrimientos realizados por sus colegas en Europa.

De cualquier modo, Rutherford se sentía compensado con la idea de gozar de una posición académica re-

12. Los electrones aún no habían sido caracterizados por Thomson como partículas cuando Rutherford identificó sus rayos beta, así que era casi imposible que asociara una cosa con la otra. Algo parecido ocurrió con las partículas alfa, pues el helio apenas había sido descubierto en la Tierra en 1895.

conocida cuando aún no cumplía los 30 años. Una vez acomodado en la nueva ciudad, no perdió tiempo para ponerse a trabajar en el estudio de la radiactividad y rápidamente se dio cuenta que no podría hacer todo el trabajo él solo, así que consiguió un hábil colaborador, el químico inglés, Frederick Soddy.

Ernest y Frederick se habían enfrentado en un foro científico de la universidad, pues Soddy no estaba dispuesto a aceptar la existencia de partículas subatómicas. Aunque su postura lo desesperaba, la tenacidad e inteligencia mostradas en la discusión impresionaron a Rutherford y no dudó en invitarlo a trabajar con él... aunque fuera químico. El neozelandés no valoraba mucho esta área de la ciencia —en realidad veía para abajo todas las ciencias que no fueran física— pero consideraba útil el aporte teórico y técnico de Soddy.

No llevaban mucho tiempo trabajando cuando se presentó una situación muy curiosa: le encargaron a uno de sus estudiantes medir el poder ionizante del torio (y con él su grado de radiactividad), pero los datos que obtenía cambiaban de manera muy brusca y aparentemente errática, por lo que no se lograba obtener un resultado bien definido. Gracias a un análisis más profundo, encontraron que la clave de la situación era la puerta del laboratorio: cuando estaba abierta, el valor de ionización era bajo, pero aumentaba considerablemente si la mantenían cerrada. Parecía cosa de risa pero, con el empeño y la lucidez que lo caracterizaban, Rutherford logró resolver el enigma. El torio estaba produciendo un gas radiactivo que ayudaba a aumentar la ionización cuando la puerta estaba cerrada pero era ventilado cuando la abrían.¹³ Ese

13. Quizá otro investigador le hubiera echado la culpa de los extraños resultados a su estudiante o a un mal funcionamiento del aparato usado para medir la ionización. Don Ernest supo ver más allá y logró descubrir un nuevo elemento químico (con un esfuerzo considerablemente menor al que necesitaron los Curie para realizar sus hallazgos).

gas era un nuevo elemento, el radón (específicamente era torón, uno de sus isótopos).¹⁴

Cuando Rutherford y Soddy cayeron en cuenta de lo que acababan de descubrir, se produjo una escena que debe de haber sido impresionante. Cuentan que fue algo más o menos así:

SODDY: Rutherford, esto es transmutación: el torio se está desintegrando y se está transmutando en un gas noble.

RUTHERFORD: Por el amor de Dios, Soddy, no lo llames transmutación. Se nos echarán encima como si fuéramos alquimistas. Ya sabes cómo son.

Después Ernest se puso a cantar y bailar por todo el laboratorio, poseído por la emoción de su grandioso hallazgo.

Finalmente, en su «anuncio oficial», el fenómeno fue denominado como «transformación» en lugar de «transmutación» para tratar de evitar una polémica que de todos modos ocurrió.

Como haya sido, Rutherford y Soddy siguieron con sus estudios y mostraron que el torio no se convertía directamente en torón, sino que antes se transformaba en otra sustancia llamada torio x. La cosa empezaba a tomar sentido, parecía que la energía de la radiación surgía de cambios atómicos; cuando los materiales radiactivos realizaban emisiones alfa o beta perdían masa y se convertían en elementos más ligeros.

14. Los isótopos son versiones ligeramente diferentes de los elementos. Mantienen todas sus propiedades químicas, pues tienen el mismo número de electrones (y protones), pero su masa atómica es distinta (puede ser mayor o menor que la de la versión común del elemento). Existen muchos elementos estables en su «presentación más común» pero que cuentan con isótopos inestables, con la tendencia a transformarse en otros materiales. La diferencia entre la masa de las diferentes versiones de un mismo elemento se debe al número de neutrones que tienen, pero eso lo veremos en otro capítulo, pues a inicios del siglo XX ni siquiera se sospechaba la existencia de esta partícula.

Rutherford y Soddy establecieron tres familias de desintegración atómica. Una iniciaba en el torio, otra en el actinio y la última en el uranio. Los demás elementos «descendían» de alguno de esos tres materiales (el radio, por ejemplo, era «hijo» del uranio). Las desintegraciones continuaban hasta llegar a un elemento estable que ya no presentaría un comportamiento radiactivo: el plomo.

El avance para explicar la radiactividad natural fue significativo pero, como sucede siempre con la ciencia, aparecieron más preguntas que las que había sido posible responder. ¿Cómo iniciaba el proceso? ¿Cuánto tiempo le tomaba a un átomo específico realizar una emisión para transformarse? ¿Sería posible acelerar o retrasar la desintegración?

Ni en la actualidad se tiene claro el mecanismo que desencadena la transformación atómica en un momento determinado, y tampoco es posible saber cuánto tiempo le tomará decaer a un átomo específico. Rutherford y Soddy hicieron pruebas para intentar acelerar o retrasar el proceso, pero ningún elemento externo logró cambiar los ritmos de transformación; ni siquiera importaba si un átomo tenía miles de años en su estado actual o acababa de producirse a partir de otro más pesado, el ritmo era el mismo.

A pesar de los mejores esfuerzos del equipo de Montreal, su teoría no había logrado predecir el comportamiento futuro de ningún átomo. Y toda teoría científica que se respete debe predecir algo, así que Rutherford buscó apoyarse en un enfoque estadístico. Logró establecer a qué ritmo se desintegran grandes cantidades de átomos de diferentes materiales radiactivos; en el proceso apareció el concepto de «vida media», fundamental para el estudio de dichos materiales. Si tenemos cierta masa de un elemento propenso a transformarse, la vida media es el tiempo necesario para que la mitad se transforme en otro elemento más ligero. El radio tiene una vida media

de 1,600 años; esto quiere decir que en ese periodo la mitad del radio en nuestro planeta ya se habrá transformado en otro elemento, que en otros 1,600 años solamente quedará la cuarta parte, y así sucesivamente.

La vida media del uranio va de 700 a 4,500 millones de años (dependiendo del isótopo que se trate). Gracias a su gran longevidad es que todavía podemos encontrarlo en nuestro planeta, de otra manera ya habría desaparecido por tantos decaimientos radiactivos.

No todos los elementos radiactivos tienen una vida media tan larga; la del torón, por ejemplo, es de solo 55 segundos. Ese material desaparece en cosa de nada para dejar lugar a otros elementos; los resultados en el experimento de ionización en el que se descubrió el radón cambiaban tanto debido, precisamente, a este tiempo de transformación tan corto.

Usando el análisis estadístico, Rutherford realizó aportes importantes para lo que se conoce como fechado radiométrico.¹⁵ Midió la cantidad de helio presente en una muestra de pechblenda y —suponiendo que todo el material encontrado procedía del decaimiento del uranio— usó los datos del ritmo de decaimiento de su familia radiactiva para estimar la edad de la piedra en 40 millones de años. Posteriormente, con una técnica similar, se compararon las proporciones de uranio y plomo en diferentes muestras para establecer la edad de la Tierra en unos 4500 millones de años (antes se consideraba que cuando mucho llegaba a los 300 millones).

Inicialmente la teoría de Rutherford y Soddy sobre la radiactividad fue recibida con escepticismo; muchos científicos la consideraban muy radical. De no ser por el valioso apoyo de J. J. Thomson hubiera tenido grandes

15. Es el tipo de análisis utilizado en la actualidad para fechar cosas muy viejas. De ahí viene la famosa prueba del carbono 14, un isótopo radiactivo del carbono con una vida media de 5,730 años.

problemas para publicarse. Poco a poco, las conclusiones fueron revisadas, los experimentos repetidos y la teoría acabó por ser aceptada ampliamente. El éxito del aporte fue tan grande que su esencia ha cambiado muy poco hasta nuestros días; se le han agregado muchas cosas, pero no se le ha quitado prácticamente nada.

La explicación de la radiactividad fue el gran salto de Ernest a la fama. Le llovieron ofertas laborales de importantes centros académicos en Europa, podía darse el lujo de elegir un lugar a su antojo y se decidió por Manchester.¹⁶ Contaría con un laboratorio de primer nivel para sus investigaciones y, quizá lo más trascendente para Rutherford, regresaría al centro del mundo físico.

Ernest llegó a Manchester en 1907. Ahí, tal como lo hizo durante su estadía en McGill, Rutherford trató de propiciar un ambiente cordial con sus estudiantes. Aunque como profesor dejaba de lado temas fundamentales de la física para abordar las principales novedades científicas e involucrar a los alumnos en sus investigaciones, siempre tuvo fama de ser accesible. Los fines de semana, los muchachos visitaban su casa y, salvo el hecho de que no se permitía el alcohol, se la pasaban muy bien hasta que Doña Mary Rutherford les indicaba sutilmente que era hora de irse.¹⁷

La cosa ya iba bien pero pintó todavía mejor, cuando en 1908 le entregaron el Premio Nobel por su trabajo sobre radiactividad. Solo que había una mosca en la sopa: el premio no era de física sino de química. La cosa no le hizo mucha gracia a Ernest; en su discurso de aceptación señaló que en sus investigaciones había observado muchas

16. ¡Como el «Chicharito» Hernández! Bueno, obviamente no fue al Manchester United sino a la Universidad de Manchester, pero era algo equivalente en cuanto a prestigio y recursos disponibles para hacer cosas importantes.

17. Los llevaba a dar una vuelta por el jardín y cuando se acercaban a la puerta principal amablemente se despedía de ellos.

transformaciones pero ninguna tan rápida y violenta como la suya, de físico a químico.

A pesar del disgusto, la cosa daba igual, el premio le dio una buena lana y gran prestigio; pronto, estudiantes de todo el mundo llegaban a Manchester para estudiar con el famoso profesor Rutherford. Pasaron por Manchester físicos tan destacados como Hans Geiger (inventor del contador radiactivo que lleva su nombre), Harry Moseley, Charles Darwin (no el de la evolución, sino su nieto) y James Chadwick (el descubridor del neutrón, de quien hablaremos más en el capítulo «La eminencia gris»).

Justo en esa etapa posterior a la entrega del Nobel, Rutherford empezó a trabajar con la técnica de esparcimiento; esto no significa que buscara divertir a sus alumnos para que trabajaran eficazmente —aunque quizá un poco—; en realidad este método consistía en bombardear átomos con cosas muy pequeñas para ver qué sucedía después de los choques. Básicamente se lanzaban partículas alfa y se observaba con detenimiento hacia dónde rebotaban para hacerse de una idea más clara de la estructura del átomo.

Un estudiante inglés, Ernest Marsden, recibió la tarea de realizar uno de esos experimentos de esparcimiento. Debía usar una fuente radiactiva para bombardear una delgada lámina de oro; detrás de la lámina había una pantalla fluorescente contra la cual chocarían las partículas alfa —después de atravesar el oro— y se emitirían destellos para indicar su posición. La idea de todo el procedimiento era ver qué tanto se desviaban las emisiones de su trayectoria original.

Los resultados fueron impactantes; tomando como base el modelo atómico de Thomson, se esperaban variaciones pequeñas en el ángulo de llegada de las partículas. Pero cuál fue su sorpresa al ver que, aunque la mayoría de las partículas pasaba como si no existiera ningún obstáculo,

muchos «proyectiles» eran desviados a ángulos muy grandes; incluso, unos cuantos rebotaban y regresaban hacia la fuente radiactiva. A Rutherford esto le pareció tan asombroso como si al disparar un balazo a una hoja de papel la bala rebotara hacia uno. Aunque los datos obtenidos no parecían muy lógicos, el experimento se repitió numerosas ocasiones con los mismos resultados.

Ajustar la teoría atómica para hacerla cuadrar con los datos no fue tarea sencilla para el genial neozelandés. Le llevó dos años de arduo trabajo matemático pero, finalmente, una tarde de 1911, le gritó emocionado a Geiger: «ya sé qué aire tiene el átomo». De nuevo debió usar métodos estadísticos para darse cuenta de que tenía que darle en la torre al modelo de su maestro. Contrario a lo que proponía J. J. Thomson, las cargas eléctricas positivas del átomo no se distribuirían de forma uniforme en él; estarían concentradas en un pequeño espacio en la parte central. Acababa de descubrirse la existencia del núcleo atómico.

El núcleo tiene en su interior toda la carga eléctrica positiva del átomo y su radio es unas 10,000 veces menor al de la unidad fundamental de los elementos químicos. Proporcionalmente: si el átomo fuera del tamaño del Estadio Azteca, el núcleo sería como un limón. El resto es prácticamente espacio vacío: no importa lo sólidos que veamos objetos como piedras, diamantes o piezas de acero, el 99.99% del espacio que ocupan está vacío.

Aunque era un poco inquietante darse cuenta de que las cosas están mucho más huecas de lo que pensábamos, la nueva idea cautivó la imaginación de muchos físicos; las cosas parecían ponerse muy bonitas en un modelo de átomo que sería una especie de sistema solar en miniatura. Según la propuesta de Rutherford, el núcleo ocuparía el lugar del Sol y los electrones orbitando a su alrededor serían el equivalente de los planetas. Esto sonaba muy lógico si consideramos el gran parecido matemático en-

tre las leyes físicas que rigen la atracción gravitacional entre masas y la fuerza entre cargas eléctricas.

Pero había un detalle sin resolver, una piedra en el zapato de la teoría: si los electrones orbitaban alrededor del núcleo, debían estar acelerados. Según la Teoría Electromagnética de Maxwell, toda carga eléctrica acelerada emite radiación electromagnética. Al emitir radiación, los electrones deberían perder energía y caer hacia el núcleo. Pero esto no sucedía: los electrones no enviaban radiación todo el tiempo ni caían al núcleo.

El problema de la nueva teoría fue analizado —y luego resuelto— por un joven estudiante danés que llegó a trabajar a Manchester con Rutherford. Se trata de una de las grandes figuras científicas del siglo XX, un hombre con vida y obra tan fascinantes que merecen ser contadas aparte; por eso el próximo capítulo le pertenece a Niels Bohr.

Por ahora dejemos los problemas de los electrones y volvamos al núcleo. Tan solo un mes después del anuncio de su descubrimiento, el holandés Antonius van den Broek sugirió que la distribución de la tabla periódica de los elementos químicos podría explicarse a partir de la cantidad de carga eléctrica del núcleo (lo que ahora conocemos como «número atómico»). Harry Moseley, el estudiante de Rutherford, pudo corroborar esto usando espectros de rayos X.

La cereza del pastel, una cereza enorme, por cierto, se presentó en 1919. Luego de interrumpir su trabajo varios años por culpa de la Primera Guerra Mundial,¹⁸ Ernest

18. Aunque nunca se vio en la necesidad de participar en combate, Rutherford se involucró de forma activa a favor de Inglaterra. Su principal aporte fue el desarrollo de un sistema de detección de submarinos, antecesor del sonar. Algunos de sus alumnos no tuvieron tanta suerte, Geiger combatió como parte del ejército alemán, así como lo hicieron —del lado británico— Marsden y Moseley. Este último falleció en combate y se cree que de no haber sucedido esto habría recibido el Nobel de Física por sus trabajos relacionados con el núcleo y los rayos X (el premio solamente se entrega a científicos vivos).

reanudó sus actividades para indagar más acerca del núcleo, pero estos experimentos ya no se desarrollaron en Manchester. J. J. Thomson dejaba la dirección del Cavendish y adivinen a quién eligió como su sucesor. Exacto, ahora Ernest Rutherford sería el mandamás del principal laboratorio de la época.

Rutherford se estrenó en la Universidad de Cambridge con un aporte capaz de opacar lo realizado en McGill (al explicar la radiactividad) y en Manchester (con el descubrimiento del núcleo): fue el primer hombre que logró dividir átomos.

Realizó un bombardeo de partículas alfa en una cámara llena de nitrógeno. Tras un profundo análisis de los resultados, se dio cuenta de la aparición de dos elementos que no estaban ahí previamente: hidrógeno y oxígeno. Los choques debían estar generando una transformación en el nitrógeno, para producir los otros dos elementos. Rutherford supuso que el núcleo de nitrógeno contenía núcleos de hidrógeno en su interior, así dedujo que estos debían ser una partícula fundamental presente en todos los elementos: el protón.¹⁹

Propuso que todos los núcleos debían estar hechos de protones y electrones; así se podía explicar la marcada desproporción entre las masas y las cargas nucleares. El hidrógeno solamente tendría un protón en el núcleo, el helio 4 protones y dos electrones (por eso su carga positiva solo sería de 2 y su masa de 4), el litio estaría formado por 7 protones y 4 electrones, el Berilio por 9 protones con 5 electrones, y así sucesivamente.

¡Santos protones, hombre radiactivo!

Pero la cosa no termina aquí. Con el mismo experimento pudo demostrar de una vez por todas que los alquimistas no estaban locos: era posible transformar elementos de forma artificial. A partir de helio (las partículas

19. Viene del griego *protos*, que significa «el primero».

alfa) y nitrógeno había conseguido producir hidrógeno y oxígeno. Se podría pensar que la reacción de muchos en esa época fue: «Ahora sí, todo mundo deje lo que está haciendo y vamos a hacer oro». Pero un detalle: para hacer esto se necesitaba un elemento radiactivo, como el radio, miles de veces más costoso que el oro. Aunque Rutherford mostró que el sueño alquimista era posible, resultó claro que les saldría más caro el caldo que las albóndigas.

Ernest siguió investigando el átomo con entusiasmo el resto de su vida. Aunque nunca recibió un Nobel de Física, los reconocimientos no escasearon: en 1914 ya lo habían nombrado caballero, en 1925 fue aceptado en la Orden del Mérito, y siete años más tarde fue distinguido como el Baron Rutherford de Nelson. Aunque su salud nunca se vio seriamente afectada por la radiación, no duró mucho tiempo más que Marie Curie. Murió sorpresivamente en 1937, a los 66 años, víctima de la combinación de una hernia umbilical y una mala atención médica. Sus restos reposan junto a los de Isaac Newton y J. J. Thomson en una de las criptas más exclusivas del mundo, la Abadía de Westminster. Nada mal para un rancherito de Nueva Zelanda.

El átomo parchado

Mi especialidad en la divulgación científica son los talleres recreativos. Básicamente, me gano la vida divirtiéndome con actividades que combinan juegos y experimentos. Gracias a esto tengo el privilegio de trabajar con muchos niños y jóvenes —de 4 a 99 años de edad— disfrutando de lo lindo al ayudarlos a aprender cosas nuevas y desarrollar un gusto por la ciencia y la tecnología.

Como parte de estas actividades, con frecuencia echo mano de una dinámica útil para hacerme una idea de la visión que los participantes tienen de la ciencia. Les pido que cierren los ojos, imaginen una persona dedicada a la investigación científica y describan lo que ven en su mente. Con singular rapidez comparten su perspectiva y encuentro en sus ideas muchos mitos acerca de los científicos: la gran mayoría de las personas los visualiza como hombres, viejos, con bata, trabajando solos en un laboratorio, despeinados y un poco locos.

Se trata de una imagen que no coincide con la mayoría de las personas que trabajan haciendo ciencia, pero se ha desarrollado a partir de personajes ficticios como el Dr. Emmett Brown (de las películas *Volver al Futuro*), el Dr. Frankenstein (de la famosa novela de Mary Shelley) o el méxico-coreano Dr. Chun-Ga (creación del comediante Andrés Bustamante, «El güiri-güiri»), por mencionar algunos. Además, como si el aporte de los personajes de ficción fuera poco, el mito cuenta con una gran influencia de la vida real: Albert Einstein.

Para muchas personas, don Beto representa, sin duda, el prototipo del científico. Creo que esto sucede gracias a tres factores. Para empezar, tenemos su innegable genialidad; además le tocó vivir en una época de gran trascendencia social de la ciencia (sobre todo después de la creación de la bomba atómica) y coincidió con la proliferación de medios masivos de comunicación como la radio y la TV. Con la combinación de estos elementos, se convirtió en el hombre de ciencia más famoso de la historia.¹ Generalmente lo recordamos por su imagen avejentada, excéntrica, despeinada y solitaria que vemos en fotos famosas, pero debemos tener en cuenta que no siempre fue viejo ni canoso (e incluso dicen que en su juventud se peinaba).

Y es que los retratos pueden llevarnos a crear una imagen distorsionada de los científicos, sobre todo de aquellos que vivieron antes del siglo XX. Para empezar, los retratos en blanco y negro con poses un poco forzadas, nos dan la idea de que eran personas muy aburridas. Incluso —como me sucedió cuando era niño— uno termina visualizando la vida de los científicos acartonada y sin color, como si fuera una película del cine mudo de inicios del siglo pasado.

Por otro lado, cabe recordar que en ese tiempo hacerse un retrato era muy caro y no cualquiera podía darse esos lujos. Generalmente, los jóvenes investigadores tenían que darle más importancia a otras cosas —como comer y conseguir un lugar para vivir— antes de inmortalizar su imagen. Además, a los periódicos y revistas no les interesaba mucho tomar fotos de gente que aún no había logrado gran cosa. Hasta que los científicos tenían cierto prestigio —acompañado de un buen trabajo y también

1. Lo único que le faltó para ser todavía más popular fue haber vivido hasta estos tiempos para contarnos de sus peripecias científicas, filosóficas y románticas a través de una cuenta de Facebook o Twitter.

una edad mucho mayor— eran más frecuentes las oportunidades de retratarse; contaban con dinero para pagar las fotos y había revistas o periódicos interesados en plasmar su imagen.

Entonces, de todo esto es importante destacar que —aunque las imágenes parezcan sugerir otra cosa— los jóvenes siempre han jugado un papel fundamental dentro de la ciencia. De hecho, muchos de los más grandes científicos de la historia ya habían realizado trabajo de gran trascendencia a los 30 años de edad. Newton tenía 23 cuando explicó la gravitación universal y logró descomponer la luz blanca en los colores del arcoíris; Galileo redactó su primer obra de mecánica a los 27; Faraday tenía 30 cuando construyó el primer motor eléctrico; Maxwell relacionó la temperatura de un gas con la energía cinética de sus moléculas a los 28 años; Rutherford descubrió las emisiones alfa y beta a los 27 y el propio Einstein tuvo su Año Milagroso a los 26.

Con esto no quiero decir que después de cumplir 30 los científicos ya no sirvan para nada y deban dedicarse a otra cosa; en realidad, estos investigadores —y muchos otros— realizaron también aportes de gran trascendencia a edades avanzadas. Lo importante aquí es que la ciencia no tiene edad. Eso sí, generalmente las ideas más audaces y revolucionarias provienen de investigadores —e investigadoras— jóvenes. Como afirmó Arthur C. Clarke² en su Primera Ley: «Cuando un científico prestigioso pero viejo afirma que algo es posible es casi seguro que tiene razón. Cuando afirma que algo es imposible, lo más probable es que esté equivocado».

En este sentido, la física cuántica fue un desarrollo esencialmente joven: incluso algunos de sus primeros creadores no estaban seguros de que sus extrañas predicciones

2. Prestigiado científico y escritor, autor del cuento *El Centinela*, que fue la base para la película *2001, Odisea del Espacio*.

fueran posibles. Además —junto a la Teoría de la Relatividad— fue la principal revolución científica de inicios del siglo XX, cambiando radicalmente la forma de ver los fenómenos físicos y abriendo de par en par las puertas a una «nueva ciencia» que sustituyó las certidumbres por probabilidades.

Desde su origen, la física cuántica fue un planteamiento científico tan diferente a casi todo lo que se conocía anteriormente, que solo podría haber sido construido por jóvenes; una camada de chicos que fueron educados con nuevas ideas —como las de Planck, Rutherford y Einstein— y por tanto pudieron avanzar sin tantos prejuicios respecto de sus sorprendentes resultados.

La punta de lanza para esta generación fue un hombre de gran visión, intuición y determinación, el maestro de maestros, el único e inigualable, Niels Bohr.³ Es mucha pompa, lo sé, pero se trata de mi gran ídolo. Fue un tipazo que combinó una vida muy divertida con grandes aportes científicos y una familia que lo acompañó en todo el camino. Mis amigos dicen que estoy enamorado de él —probablemente tengan razón— pero qué les puedo decir, se trata de la persona que me inspiró a acercarme más a la física cuántica y, en última instancia, a escribir este libro.

Este investigador, originario de Dinamarca, dio el primer paso para aplicar una visión cuántica a la estructura del átomo y, posteriormente, formó toda una escuela científica con una base de jóvenes que lo ayudaron a seguir en su tarea y llevarla mucho más allá. En su momento, su Instituto fue, para la física teórica, el equivalente de lo que ahora es, en el fútbol, el Club Barcelona: contaba con un grupo de primer nivel; estos investigadores —comprometidos con lo que querían lograr— mostraron su gran calidad llevando a Bohr al campeonato, es decir, a

3. Lo cual convierte automáticamente a Rutherford en un maestro de maestro de maestros y a Thomson en... bueno, ya se hacen una idea.

la conquista de una gran autoridad científica. Para finales de la década de 1920, Niels Bohr se convirtió prácticamente en el principal referente en todo lo relacionado con el átomo cuantizado.

Algunos de sus pupilos llegaron a lo más alto en el mundo científico; entre ellos encontramos a ganadores del Premio Nobel como Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli. Eso sí, debemos aclarar que el mérito de la formación de estos personajes no pertenece completamente a Bohr,⁴ pues todos provenían de otras escuelas científicas; sin embargo, él supo jalarlos a su Instituto, incorporarlos a su visión específica del átomo y mantenerlos articulados para darle más fuerza a su trabajo.

Pero la emoción me hace adelantarme, paremos un poco y tomemos las cosas con calma. Primero debemos dejar claro quién fue Niels Bohr y cómo diantres le hizo para atraer a jóvenes tan talentosos para colaborar con él.

Nació en Copenhague, en 1885, en el seno de una familia de gran prestigio: su padre era catedrático de fisiología en la Universidad y su madre provenía de una acaudalada familia de banqueros e integrantes del Parlamento. Creció muy unido a su hermano Harald, quien era un año y medio menor; durante su juventud, los chicos Bohr eran auténticas celebridades en la capital de Dinamarca. No es que fueran unos «pirrurris» famosos por su dinero y extravagancias, todo lo contrario; dicen que eran inteligentes, muy guapos y todos unos figurones en el fútbol danés. Con Niels como portero y Harald en el medio campo, su equipo se coronó campeón de la liga local. Eso sí, ya desde sus años mozos, al hermano mayor le afloraba la ñoñez: en un partido estuvo a punto de recibir

4. Solamente hay un ganador del Premio Nobel que fue, literalmente, hecho en el Instituto de Física Teórica de Copenhague: Aague Bohr (cuarto hijo de Niels). Previo a su nacimiento, el hogar de la familia estaba en el último piso del edificio del Instituto y ahí Aague vivió sus primeros 10 años rodeado de físicos teóricos (vaya infancia).

un gol porque estaba resolviendo ecuaciones en uno de los postes de la portería.

Aunque más tarde Niels sería la estrella científica de la familia, en el ámbito deportivo Harald logró llegar muy lejos: fue parte del equipo olímpico de fútbol que en 1908 ganó la medalla de plata para Dinamarca. Como sea, en diferentes ámbitos, los muchachos se convirtieron en un foco de atención; sus hazañas, dentro y fuera de la cancha, eran seguidas regularmente por los medios locales.

Y en la vida académica se mantuvieron casi tan cercanos como en el fútbol. Poco tiempo después de que Niels ingresó a la Universidad de Copenhague para estudiar física, el chiquitín hizo lo propio, pero en matemáticas. Entonces, la institución no era lo que podría llamarse un centro científico de avanzada, solamente contaba con un físico teórico y casi no había equipo para realizar experimentos. Entre 1900 y 1910 solo se graduaron doce personas en física o matemáticas, y dos de ellos fueron los hermanos Bohr. Cuando Niels empezó sus estudios de posgrado en 1903, había muy pocos cursos avanzados, lo que le dejaba mucho tiempo para trabajar por su cuenta, estudiando tópicos de vanguardia para estar al día en la física.

Poco antes de iniciar el trabajo de su tesis doctoral, Niels decidió tomarse unas vacaciones de verano en las que conoció a Margarita, una hermosa rubia hermana de un amigo de Harald. Quedó perdidamente enamorado y no descansó hasta lograr que le correspondiera y aceptara casarse con él. En ella encontró —además de al amor de su vida, la dueña de sus quincenas y futura madre de sus hijos— un valioso apoyo para su trabajo científico. Aunque sus ideas eran brillantes, el mayor de los Bohr era malísimo para expresarlas de forma coherente; hasta entonces había necesitado ayuda de Harald y de su madre para darle una redacción adecuada a sus trabajos. Margarita era muy buena para escribir, su fina pluma resultó de

gran utilidad para dar una mayor claridad a las publicaciones científicas de su amado.

Todavía soltero, con la idea de fortalecer su formación, Bohr se trasladó a Cambridge en 1911 para realizar una estancia de investigación en el afamado laboratorio Cavendish a cargo de J.J. Thomson. Estaba muy emocionado ante la perspectiva de trabajar por vez primera en una verdadera comunidad de investigadores, ahora sí sabría lo que era codearse con la crema y nata del mundo científico. Sin embargo, la situación en el Cavendish no fue exactamente lo que esperaba: Thomson no le hacía caso y Niels se sentía atorado, sin mucha idea de hacia dónde avanzar en su trabajo.

Pero las cosas por algo son y, a final de cuentas, el viaje resultó muy fructífero para su formación, aunque fuera indirectamente. En una cena de alumnos y exalumnos del laboratorio, tuvo la oportunidad de conocer al ya legendario Ernest Rutherford. Inmediatamente quedó cautivado por la vitalidad y las ideas progresistas del neozelandés, tanto así que ahí mismo logró apalabrar una estancia en el laboratorio del hombre que acababa de descubrir el núcleo atómico.

Cuando llegó a Manchester encontró a todo el mundo entusiasmado, sacándole jugo al nuevo hallazgo, experimentando con diferentes aspectos del núcleo. El equipo de laboratorio era excelente, podía hacer salivar incluso al físico más exigente, ni qué decir de uno que nunca había podido usar buenos aparatos en Copenhague. Sin embargo, a diferencia del resto de los alumnos de Rutherford, Bohr estaba más preocupado por los problemas teóricos del modelo de su nuevo maestro que por descubrir algo en el centro del átomo.

En principio, la idea de una estructura atómica similar al sistema solar era muy bonita, una verdadera maravilla de simetría entre los objetos enormes y los diminutos.

La bronca era que, haciéndole caso a la electrodinámica clásica, algo así simplemente no podría existir. Si los electrones se movían en órbitas alrededor del núcleo tenían que estar acelerados (aunque la magnitud de la velocidad sea la misma, el cambio de dirección —al dar vueltas— implica una aceleración). Cuando las cargas eléctricas se aceleran se producen cambios en sus campos —eléctrico y magnético—, lo que da lugar a la emisión de radiación. Pero las ondas electromagnéticas no pueden salir de la nada; al emitir rayos, los electrones tendrían que perder energía, habría una disminución en su velocidad y la fuerza de atracción ejercida por el núcleo positivo los haría caer hacia él. De esta forma, todos los electrones acabarían amontonados en el núcleo y —en teoría— la cosa volvía a parecerse al modelo de Thomson. Pero en realidad no sucedía nada parecido, los electrones seguían afuera del núcleo. Debía haber algo importante que los científicos no estaban considerando.

Niels estaba clavadísimo con el problema y no descansaría hasta darle solución. No tenía ninguna evidencia física que le permitiera construir una hipótesis pero, sin detenerse por ese «pequeño» detalle, se aventuró a imaginar cómo podrían ser los átomos en su interior. A sus 27 años tenía todo que ganar y nada que perder; podía darse el lujo de hacer un trabajo atrevido sin preocuparse mucho por las consecuencias en cuanto a su prestigio científico. Así, propuso la existencia de ciertos niveles de energía estables en los cuales los electrones podrían orbitar alrededor del núcleo sin emitir radiación. Los niveles serían una consecuencia de la cuantización de energía descubierta por Planck y corroborada luego con el trabajo de Einstein.

Al concluir su estancia de tres meses en Manchester, redactó un memorándum acerca de las órbitas cuantizadas y se lo entregó a Rutherford. En este documento

planteó el problema y delineó su propuesta para resolverlo, aunque en realidad se trataba de una idea muy primitiva que contenía todavía muchos huecos. La reacción de Ernest fue muy precavida, advirtiéndole de la falta de resultados experimentales que pudieran respaldar este nuevo modelo atómico.

En el verano de 1912, Bohr regresó a Copenhague para casarse con Margarita, pero no podía sacarse de la cabeza los niveles de energía. Aparentemente, su mujer lo entendía muy bien, o era casi tan ñoña como él, pues se dejó convencer de ir de luna de miel a Cambridge para concluir el artículo sobre los niveles de energía. Aunque la luna de miel no fue suficiente para acabar la teoría — pues al parecer de vez en cuando el romance y la pasión lo distraían— la idea científica se veía más y más prometedora conforme avanzaba el trabajo. Sin embargo, había problemas con las matemáticas del modelo y Bohr tendría que resolverlos solo; normalmente Harald sacaba a su hermano de este tipo de apuros, pero en ese momento se encontraba en Alemania.

Para avanzar en su teoría, Niels intentó apoyarse en el trabajo de un astrónomo británico que usó un modelo de órbitas cuantizadas —parecido al suyo— para explicar fenómenos como la corona solar y la formación de anillos alrededor de Saturno. Los datos predichos por ambos trabajos no cuadraban en lo más mínimo, pero este estudio sirvió para poner a Bohr a trabajar en un elemento que no había considerado hasta entonces y que resultó de gran importancia para su teoría: el análisis espectral.

En ese tiempo —a partir del trabajo de Fraunhofer, Kirchhoff y Bunsen— ya se sabía que cada elemento químico emite luz en frecuencias muy específicas cuando es calentado. El espectro de colores producidos es algo así como su huella digital. Además, se contaba con la serie de Balmer, la regla matemática que no tenía ninguna

explicación pero que predecía muy bien las líneas de color en el espectro del hidrógeno.

Aunque se trataba de algo ampliamente difundido, Bohr no conocía la fórmula de Balmer, pero en poco tiempo se puso al día para realizar un hallazgo trascendental. En la creación de una ecuación que predijera de forma adecuada las líneas espectrales del hidrógeno, Balmer había usado un proceso de prueba y error que acabó incluyendo una constante arbitraria en la fórmula: un número sacado de la manga para que todo cuadrara. Bohr descubrió que ese número, caprichoso en apariencia, podía obtenerse combinando la carga del electrón, su masa y la constante de Planck.

Gracias a esto, tan solo dos semanas después de toparse con la fórmula, ya tenía entre manos una buena explicación para el espectro del hidrógeno. Asumió que los electrones tendrían que recibir radiación de cierta frecuencia para ir de una órbita cercana al núcleo a otra más alejada y, de forma recíproca, emitirían rayos al ir de una exterior a otra que se encontrara más adentro. Aquí fue donde le dio al clavo: la frecuencia de la radiación predicha para el cambio entre dos órbitas en un átomo de hidrógeno encajó exactamente con la de las líneas de luz en su espectro.

Esta es la razón por la que es imposible ver el interior del átomo, incluso si tuviéramos un microscopio tan potente para llegar a cosas mil millones de veces más pequeñas que un centímetro. Los objetos a nuestra escala son visibles porque los átomos que los forman reciben muchísimos rayos de luz, algunos de sus electrones se excitan y luego liberan otros tantos rayos; son con los que nosotros vemos las cosas. Es como si la luz rebotara en los objetos, con algunos cambios de color, para hacerlos visibles. En cambio, dentro del átomo no hay nada con qué rebotar: llega el rayo y excita el electrón, sale otro

rayo y el electrón vuelve a su nivel original; se puede establecer el cambio de nivel con la emisión de luz, pero no podemos darnos cuenta de la estructura interior.

Aunque los científicos quedaban a ciegas en sus estudios de la estructura atómica —para los que necesitarían métodos indirectos, como el esparcimiento de Rutherford— por fin empezaba a abrirse la caja negra del proceso de emisión de radiación. El fenómeno podía explicarse aplicando a la estructura del átomo un conjunto de reglas de cuantización que resultaron efectivas, aunque eran aplicadas «por las pistolas» de Bohr (pues no se obtenían de ninguna ley física fundamental).

Al recibir energía, un electrón salta al nivel superior correspondiente. El electrón excitado no puede quedarse de forma indefinida en el nuevo nivel; después de una pequeña fracción de segundo libera la energía en forma de radiación y, atraído eléctricamente por el núcleo, regresa a su nivel original. Las transiciones no siempre tienen que realizarse entre niveles contiguos, los saltos pueden presentarse con dos o más niveles de diferencia, y el regreso es posible de forma directa o por pasos, es decir, saltos menores a través de los niveles intermedios. El tiempo de permanencia en el nivel «superior», o en los niveles de transición, normalmente es de una muy pequeña fracción de segundo pero puede variar según las características del material.⁵

Para excitar electrones cercanos al núcleo, ubicados en los niveles más internos, se requiere mucha energía, pues se debe vencer una gran fuerza eléctrica. Por lo tanto, al regresar a su nivel original, los electrones emitirían ondas

5. Los materiales fosforescentes, por ejemplo, se toman mucho más tiempo de lo normal. Brillan aun sin una fuente luminosa directa porque guardan la energía de excitación de sus electrones, que tardan mucho en regresar a sus niveles de energía originales. Sueltan poco a poco la energía recibida al ser iluminados y por eso siguen emitiendo luz aún cuando todo a su alrededor está a oscuras.

electromagnéticas de alta frecuencia, como las de los rayos X, tal como se había observado en los tubos de rayos catódicos. Conforme los niveles se encuentran más lejos del núcleo, la energía necesaria para los saltos cuánticos es cada vez menor, ya que la intensidad de la fuerza eléctrica disminuye con el cuadrado de la distancia. Así que, si nos alejamos lo suficiente del núcleo, las diferencias de energía entre los niveles exteriores se vuelven muy pequeñas y prácticamente hay una situación continua.

Esto era muy importante para Bohr, pues tenía el afán de reconciliar de alguna manera los principios cuánticos con los fenómenos clásicos. Él llamaba a esto «Principio de Correspondencia», el cual implicaba que, si se llevaba su teoría a escalas mayores, las predicciones debían coincidir con los fenómenos cotidianos. Sería muy decepcionante crear un modelo que funcionara para el átomo pero que predijera una sarta de tonterías para todo lo que se encuentra afuera. En este sentido, al menos de inicio, la nueva propuesta pintaba bastante bien.

Otro éxito de esta teoría apareció años después con la explicación de las propiedades químicas de los elementos. Los niveles hacían funcionar a las mil maravillas una idea previa que Thomson había desarrollado para enriquecer su modelo de budín, antes del descubrimiento del núcleo. J. J. sugería que los electrones no estarían donde les diera su gana, sino que se distribuirían en envolturas cerradas; una capa de electrones rodearía la otra hasta que se completara el número de estas partículas necesarias para neutralizar la carga positiva del núcleo; era algo así como el átomo cebolla.

Aunque el modelo de Thomson ya estaba desfasado, Bohr pensó que podría sacarle jugo a la idea de las capas. A partir del estudio de espectros empezó a trabajar en la distribución de electrones en los niveles de energía: tomando en cuenta la carga eléctrica del núcleo atómico iba

asignando electrones a órbitas cuánticas, luego agrupaba varias órbitas que constituían una envoltura o capa, e iba llenando las capas con electrones hasta que equilibraba la carga nuclear.

La primera capa, unida al núcleo con gran fuerza, fue llamada K y en ella cabrían solamente dos electrones. Luego sería envuelta por la capa L, a la cual le cabían 8. Esta, a su vez, sería contenida por la capa M, que podría tener otros 18 electrones como máximo. Luego vendría la capa N, con capacidad para 32. Sucesivamente irían apareciendo nuevas envolturas —con un cupo cada vez mayor— hasta completar un total de siete niveles. Cualquier semejanza con la tabla periódica y el número de elementos en sus niveles no es mera coincidencia.

La distribución de los elementos en la tabla periódica —hecha por Mendeleiev en 1869— refleja sus propiedades químicas, pero fue acomodada de forma empírica; no había ningún principio científico que explicara o justificara ese acomodo. Bohr, distribuyendo los electrones en envolturas, explicó ese comportamiento. Todos los elementos con el mismo número de electrones en su última capa se portan de forma parecida, esos últimos electrones son la clave de sus propiedades químicas.

Los átomos muestran una tendencia a llenar sus envolturas, completándose al combinarse entre sí para llegar a configuraciones estables. Los gases nobles tienen llena su última capa, por eso no tienen necesidad —ni posibilidad— de unirse con alguna otra cosa y no reaccionan químicamente con nada. En cambio, todos los demás elementos tienen cierto grado de afinidad para crear compuestos, sea en parejas, tríos o configuraciones más elaboradas.

El logro de dar mayor lógica a la química era suficiente para impulsar las ideas de Bohr, pero la distribución de los electrones en niveles logró otro gran triunfo: una explicación de la conductividad eléctrica. Desde hacía

muchos años se sabía que ciertos materiales eran buenos conductores y otros no tanto, pero hasta ahora se veía por qué. Los mejores conductores —como la plata, el oro y el cobre— tienen la misma configuración en su última capa, en la cual los electrones se comportan casi como si no pertenecieran al átomo; son electrones libres para moverse en el material. Esta libertad les permite desplazarse con facilidad para formar corrientes en la presencia de un campo eléctrico sin que se pierda mucha energía. En cambio, en otros materiales, los electrones exteriores están ligados al átomo con más fuerza y requieren de campos mucho más fuertes para moverse.

Un buen conductor tiene un promedio de un electrón libre por átomo. No parece gran cosa, pero si calculamos el número de electrones libres por centímetro cúbico tenemos 10^{22} (o sea, un 1 con 22 ceros después de él, algo así como 10,000 trillones). En un aislante hay solamente un electrón libre en cada 10 mil billones de átomos, lo cual equivale a un millón de electrones libres por centímetro cúbico; suena a mucho, pero no es nada comparado con los que hay en un conductor.

La distribución de electrones dio lugar a un concepto intermedio que en principio parece inútil, pero resulta ser la piedra angular de la electrónica: el semiconductor. Se trata de un material con un electrón libre cada 10 mil millones de átomos. Por sí solo, este electrón no sirve de mucho; sin embargo, al modificar ligeramente el material —con impurezas de otros elementos— un semiconductor se convierte en la base para aparatos muy útiles. ¿Qué dispositivos podemos crear con semiconductores? Pues nada más y nada menos que los diodos (como los que usan los leds y láseres) y los transistores, vitales para aparatos como celulares, televisiones, cámaras digitales y muchas otras cosas sin las que no podríamos vivir en la actualidad.

Pero volvamos al trabajo de Bohr. A pesar de que muchos de sus planteamientos entraban en contradicción con los principios de la física clásica, la teoría del átomo cuantizado—cebolla empezaba a funcionar, aunque la formulación aún no estaba completa y todavía había muchas preguntas sin resolver: por ejemplo, si la carga positiva del núcleo atrae a los electrones, ¿por qué se distribuyen en niveles de energía cada vez más alejados? En principio, deberían ser jalados por la fuerza eléctrica para amontonarse todos en el primer nivel. Sin embargo, se sabía de su distribución en orbitales (llamados *s*, *p*, *d*, *f*), aunque no hubiera una explicación de por qué no podían ubicarse todos en los de menos energía.

Existía, además, un gran problema de origen. El modelo atómico de Bohr le ponía parches cuánticos a principios clásicos; algo parecido a lo que había hecho Planck para resolver el problema del «cuerpo negro». Como dice Sergio de Régules (un gran divulgador científico de la UNAM), la teoría era parecida al monstruo del Dr. Frankenstein, creada a partir de pedazos de diferentes propuestas que no embonaban del todo entre sí. No había sido construida a partir de principios físicos fundamentales ni de evidencia experimental, sino que era algo medio forzado, con ajustes por aquí y por allá para darle sentido. Sin embargo, con todo y su origen improvisado, esta mezcolanza ya podía hacer algunas predicciones verificables (aunque, a decir verdad, no en todas le iba bien; por ejemplo, para el hidrógeno predecía líneas espectrales que no existen).

Cuando la primera versión de la propuesta fue publicada, las reacciones fueron muy variadas: Thomson la ignoró olímpicamente pues estaba trabajando en su propio modelo; Rutherford se mostró preocupado por el uso de muchas ideas que no surgían de ningún experimento; en Gotinga —donde estudiaba Harald— Max Born mostró

un gran interés, aunque la idea le pareció muy atrevida; Arnold Sommerfeld⁶ —en Munich— estaba impresionado por la obtención de la fórmula de Balmer pero no le convenía mucho el modelo; a Einstein le parecía bastante bien la propuesta, aunque en ese momento estaba metido en otros rollos (una «cosa» llamada Teoría General de la Relatividad).

Poco antes de publicar el artículo, Bohr había trabajado como profesor asistente en la Universidad de Copenhague, pero no duró mucho en ese puesto. Al titular de física no le interesaban las ideas cuánticas y Niels no estaba dispuesto a renunciar a su línea de trabajo, por eso decidió dejar el empleo para irse de nuevo a Manchester (donde Rutherford sí lo dejaría trabajar en sus investigaciones atómicas). Después de un tiempo en Inglaterra, el danés recibió una gran noticia: en la Universidad de Copenhague se crearía un segundo puesto de físico teórico específicamente para él; ahora sería jefe y podría investigar los temas que le dieran la gana. Regresó con gusto a Dinamarca para dar el despegue definitivo a su carrera científica.

No tardó mucho en recibir a su primer estudiante doctoral, el holandés Hendrik Kramers. Esto le vino de perlas a Bohr, pues Margarita acababa de dar a luz a su primer hijo y no podía ayudarle con la redacción de sus trabajos. Kramers entró al quite en la escritura y también usó su habilidad matemática para compensar la ausencia de Harald; se acababa de convertir en la mano derecha de su maestro, un puesto que ostentó por varios años y que más adelante sería muy codiciado.

Con la llegada de alumnos provenientes de diferentes países, el equipo de trabajo de Bohr en la Universidad empezó a tomar forma. Aun así, no estaba conforme,

6. Era un físico de gran importancia en Alemania: había ayudado a demostrar que los rayos X son ondas electromagnéticas usando estructuras de cristales como rendijas de difracción. Además, él fue el profesor universitario de Heisenberg y Pauli.

quería ir más allá: en 1917 empezó a impulsar la construcción de su propio Instituto de Física Teórica. A pesar de las condiciones de inflación e inestabilidad que siguieron a la Primera Guerra Mundial, se salió con la suya gracias a que era muy bueno para conseguir lana con el gobierno y las empresas locales. Para 1921, el Instituto Bohr era una realidad.

Coincidió que en la misma época en que Niels regresó a su país, Einstein retomó su trabajo en temas cuánticos, una vez que había terminado la Teoría de la Relatividad. Ni tardo ni perezoso, don Beto llevó agua para su molino. Tomando como base el modelo de Bohr, postuló que, al saltar de una órbita a otra, los electrones emiten o absorben un cuanto de radiación (un fotón) como los que había descrito en su artículo de 1905. El fotón sería una partícula con momento⁷ y, como tal, podría imprimirle velocidad a un objeto al chocar con él; con este planteamiento reforzó la imagen dual de la radiación como onda y partícula.

Ahí no paró la cosa; don Beto estableció que, con una frecuencia específica, sería posible dar energía a los átomos para emitir cuantos; a partir de esto, sentó las bases teóricas para la emisión estimulada de radiación (el fenómeno que hace funcionar los rayos láser).⁸ La cosa funciona de la siguiente manera: cuando un átomo excitado recibe un fotón con la misma cantidad de energía que la de su excitación, se emiten en la misma dirección dos fotones con frecuencias iguales. La llegada del fotón «detonante» estimula la emisión de la energía presente en el átomo excitado, por eso los dos fotones salen en la misma dirección.

7. La cantidad de movimiento de un cuerpo; se calcula multiplicando su masa y velocidad.

8. Aunque tuvieron que pasar 40 años, los científicos y tecnólogos aprovecharon las instrucciones básicas de Einstein para construir los primeros láseres. Gracias a esto, hoy en día podemos gozar de aparatos como discos compactos, DVD, depiladores y cortadoras de precisión basadas en el rayo láser.

Puesto de forma muy burda, es como si se tratara de pelotas: el átomo tiene una que lo mantiene en un nivel de energía superior y que pronto será liberada; cuando la nueva pelota (el otro fotón) llega, impacta la que estaba en el átomo y la impulsa en la misma dirección que llevaba su trayectoria, como si se tratara de un simple choque. Una vez afuera, los dos fotones pueden impactar con otros dos átomos excitados y en el proceso serán liberados 4 fotones; esta dinámica se puede repetir con millones de átomos para formar un haz de luz muy intenso y concentrado.

A Bohr no le convencían mucho estos nuevos planteamientos. No le cabía en la cabeza el concepto de los cuantos de radiación; le parecía una locura combinar en ellos las ideas aparentemente contradictorias de la luz como onda y partícula. Resulta un poco irónica esta postura de Niels: aunque había sido muy abierto al crear su modelo parchado, ahora se mostraba muy cerrado ante la propuesta de Einstein. Si bien Albert no era un tipo hostil, tampoco era dejado, defendía sus ideas con gran pasión y no iba a echarse para atrás ante Bohr.

Se estaba gestando el mayor choque de científicos desde Newton contra Huygens, una batalla entre dos pesos completos de la física. Si hubiera sido un encuentro de box o de lucha libre, lo habrían promovido como el duelo entre el Gran Danés y el Pastor Alemán.⁹ Pronto el debate empezó a cobrar relevancia pública, sobre todo porque Einstein y Bohr ganaron el Premio Nobel de Física en años consecutivos.¹⁰ En una época de grandes descubrimientos, los medios estaban fascinados por la batalla en que dos grandes genios definirían la última palabra en la naturaleza de la luz.

9. Suena como a pelea de perros; en términos científicos, lo fue. Sin embargo, nunca se trasladó al plano personal.

10. Einstein en 1921 y Bohr en 1922, uno por la explicación del efecto fotoeléctrico y el otro por la investigación en la estructura del átomo.

Como los dos estaban desarrollando su trabajo de forma esencialmente teórica, era muy complicado que por sí mismos lograran imponer sus ideas. Fueron necesarios los aportes de dos científicos experimentales norteamericanos para dirimir el asunto. El primero fue Robert Milikan, un profesor de la Universidad de Chicago a quien la idea de los fotones le desagradaba aún más que a Bohr. Cuando leyó la explicación del efecto fotoeléctrico no podía creer cómo alguien podía considerar válida la idea de la luz formada por partículas, si había sólidas evidencias que respaldaban su naturaleza ondulatoria (el experimento de Young, por ejemplo). Convencido de sus ideas, dedicó más de 10 años de su vida a demostrar que Einstein estaba equivocado, pero le salió el tiro por la culata: sus experimentos fueron una de las más importantes demostraciones de la validez de los cuantos de luz.

Por otro lado, en la Universidad de Washington, en St. Louis, Arthur Compton se dio cuenta de que la frecuencia de los rayos X disminuía después de interactuar con electrones libres a los que les transferían energía. Al sacar las cuentas, la energía perdida por los rayos en el cambio de frecuencia era exactamente la misma que la recibida por los electrones al cambiar su velocidad. Esto quería decir que se había llevado a cabo un choque entre el fotón de rayos X y el electrón, como si se tratara de dos bolas de billar: una transfiere parte de la energía de su movimiento a la otra. En honor a su descubridor, este fenómeno se conoce como Efecto Compton.

Los resultados experimentales no dejaron lugar a dudas: la existencia de las partículas de radiación era una realidad. Con las contundentes pruebas ofrecidas por Milikan y Compton, a Bohr no le quedó más remedio que apechugar, aceptar su derrota con resignación y asimilar a regañadientes la idea de que la luz podía ser onda y partícula. Había perdido la batalla, pero la guerra cuántica

estaba lejos de terminar; aún había mucho «territorio» por conquistar y, a diferencia de Einstein —que trabajaba y discutía en solitario—, Niels estaba avanzando considerablemente en la creación de su equipo.

Bohr no era ardido, no se crea que reforzó su grupo de trabajo con el objetivo expreso de darle en la torre a Einstein. De hecho eran grandes amigos, se visitaban regularmente y, además, coincidían con frecuencia en Leiden (Holanda), en la casa de Paul Ehrenfest (un científico que era cuate mutuo). Más que cualquier afán de revancha, al danés lo que le interesaba era explicar de forma convincente el comportamiento de los electrones dentro del átomo —o sea, desarrollar una mecánica cuántica— y, claro, llevarse el crédito por ello.

Quería que su Instituto se convirtiera en un pilar para esta nueva teoría, pero necesitaba rodearse de talento. La tarea no le fue muy difícil, después de Kramers llegaron a Copenhague muchos jóvenes de gran capacidad, interesados en conocer la nueva idea del átomo; el flujo creció todavía más después de que Niels recibió el Premio Nobel.

El puro interés académico era enorme, pero el entusiasmo de los físicos por visitar Copenhague acabó de crecer gracias a dos factores: como ya he dicho, Bohr era muy bueno para gestionar recursos; regularmente conseguía becas de apoyo a los estudiantes e investigadores visitantes. Para redondear el asunto, el Instituto de Física Teórica de Copenhague tenía un ambiente muy agradable que gozaba de gran fama en los círculos académicos.

Desde un inicio, Bohr se sintió inspirado por el carácter que Rutherford le transmitía a las actividades en Manchester, así que trató de darle a su Instituto un ambiente casual que permitiera el desarrollo académico a la vez que la camaradería. Aunque a veces se le pasaba la mano: los estudiantes se divertían tanto ahí que los recién llegados podían tener problemas para encontrar las actividades

científicas. Cuentan que en su primer día un joven escuchó un recurrente sonido de «pop» en una habitación y, emocionado, corrió hacia allá con la esperanza de encontrar algún experimento de bombardeo de átomos pero en su lugar se encontró con un intenso partido de ping-pong. Este juego era una de las grandes aficiones en el Instituto, emocionaba tanto a los muchachos que, justo en los lugares de los jugadores había un marcado desnivel por el desgaste del piso en tantos partidos.

Además, eran frecuentes las expediciones de estudiantes al cine, encabezadas por el mismísimo Bohr, así como los paseos para observar a las bellas chicas locales. Con base en la doble afición de admirar las películas y las féminas, los integrantes del Instituto desarrollaron una clasificación útil para ambos casos:

- 1) No puede uno dejar de mirar.
- 2) Puede uno dejar de mirar, pero duele.
- 3) Da lo mismo mirar o no.
- 4) Duele mirar.
- 5) No podría uno mirar aunque quisiera.

Cuando todos los presentes coincidían en que una película merecía un 5, abandonaban la sala inmediatamente. Imagino que, de la misma forma, cuando encontraban una chica merecedora de un 1, inmediatamente dejaban lo que estaban haciendo para seguir a la hermosa muchacha e intentar conquistarla. Esto último funcionó con éxito en repetidas ocasiones, varios estudiantes del Instituto acabaron casados con mujeres danesas.

Y hablando de damas, Margarita, la esposa de Bohr, fue un complemento sensacional para hacer sentir a los estudiantes como en casa. Era amable a tal grado que con frecuencia los jóvenes subían al último piso del edificio del Instituto, donde vivía la familia del director, para

devorar los *sandwiches* que les preparaba la señora. Si aunamos a todo esto el hecho de que muchos estudiantes literalmente vivían en el edificio del Instituto, el ambiente hogareño era total y propiciaba una gran veneración para el papá/maestro/líder que era Bohr para la «familia».

Como ya dijimos, a primera vista no era sencillo, en medio de todo este jolgorio, encontrar el trabajo científico; generalmente, este empezaba en las noches, cuando los jóvenes encontraban en la tranquilidad de sus cuartos las condiciones para atacar los problemas del átomo, o bien, cuando alguien aceptaba que no entendía del todo un planteamiento y sus compañeros alegremente le ayudaban a revisar el asunto. Eso sí, cuando en la correspondencia llegaban las publicaciones científicas más recientes, los estudiantes se dedicaban todo el día a estudiarlas y explicárselas unos a otros hasta entenderlas a fondo.

Las clases no eran algo cotidiano en el Instituto, lo más parecido eran los seminarios realizados cuando algún científico se encontraba ahí de visita. Por otro lado, Bohr ocasionalmente llamaba a cada estudiante a su despacho y ahí el joven debía exponerle al maestro los temas sobre los que estaba trabajando. Generalmente, durante la misma explicación los alumnos se daban cuenta de sus fallas o de los aspectos en que debían corregir su procedimiento; era muy raro que el maestro criticara los planteamientos expuestos.

Aunque al Instituto Bohr no le faltaban recursos humanos, su director estaba en una constante búsqueda de talento para reforzar el equipo; siempre que salía a dar conferencias en otros países aprovechaba para reclutar nuevos colaboradores. En 1922 obtuvo una «pescas» especialmente buena. En Gotinga, Max Born organizó una cosa llamada *Bohr Fest*, una especie de festival de homenaje para celebrar el Premio Nobel que acababa de recibir el danés. Niels fue el centro de toda la atención y, proyectado como una gran

luminaria, causó un gran impacto en dos jóvenes que tendrían gran importancia en su futuro científico: Wolfgang Pauli y Werner Heisenberg.

El primero se encontraba ahí en calidad de asistente de Born y Werner, quien todavía era estudiante de la Universidad de Munich, asistió como acompañante de su maestro, Arnold Sommerfeld. Tras charlar un rato con cada uno de ellos, Bohr se dio cuenta de su enorme potencial y, más rápido de lo que se dice Copenhague, los animó a visitarlo. Ni a Born ni a Sommerfeld les hizo mucha gracia la invitación extendida a sus discípulos —temían, con toda razón, que el danés les «agandallara» a sus principales colaboradores— pero no podían quitar a los muchachos el gusto de realizar una estancia de trabajo con un ganador del Premio Nobel.

Pauli era un poco mayor y ya había obtenido el grado de doctor, así que no perdió tiempo y cumplió con la visita en ese mismo año. Heisenberg, por su parte, llegó hasta dos años más tarde; primero tuvo que obtener su grado y luego trabajó un tiempo como asistente de Born. La colaboración con Niels Bohr representó un vuelco favorable para las carreras de ambos jóvenes, sus investigaciones cobraron un mayor sentido.

Los dos muchachos tenían lazos de amistad desde sus días de estudiantes en Munich. Pauli, más viejo y avanzado, fue asistente de Sommerfeld antes que Werner y le ayudaba a revisar las tareas de los alumnos de primer año. Tras revisar un trabajo de Heisenberg, Wolfgang le dijo que era un completo idiota. Aunque la afirmación no le hizo gracia a Werner, lejos de originar un conflicto, lo motivó a echarle más ganas al estudio y reconocer la importancia de la crítica de un compañero honesto para mejorar en su trabajo científico. Desde entonces iniciaron una fructífera colaboración que aprovechaba los aspectos complementarios de su forma de trabajo, así como de su

personalidad. A pesar de que ambos eran físicos teóricos, estos dos chicos eran como el ying y el yang (tanto en la ciencia como fuera de ella): uno tenía la inclinación de seguir sus instintos sin tomar demasiado en cuenta los detalles, mientras el otro prefería el análisis riguroso y exhaustivo. Resultaban un complemento casi perfecto.

Werner Heisenberg era la imagen del carisma, guapo y con una gran personalidad; un galán hecho y derecho. Tenía la fama de usar su simpatía para apropiarse de las ideas de otros sin que siquiera se atrevieran a decirle pío. Esto no quiere decir que fuera falto de inteligencia, por el contrario, sus ideas rayaban en la genialidad; incluso llamaba la atención su capacidad para encontrar resultados totalmente acertados a partir de supuestos tambaleantes o erróneos.

Le encantaba practicar deportes y realizar actividades al aire libre, en su juventud había sido parte del Movimiento Juvenil (algo así como el equivalente alemán de los *Boy Scouts*). Era originario de Wurzburg, pero creció en Munich; venía de una familia sumamente exigente en que compitió de forma obsesiva contra su hermano por la aprobación de su padre. Tocaba el piano a las mil maravillas y, para desencanto de nuestro afán chismoso, nunca dio mucho de qué hablar en su vida personal.

Wolfgang Pauli era más bien feo, con su cabello escaso, cara de sapo y un ego muy inflado. Cuando expresaba las opiniones que tenía acerca de sus colegas tenía el tacto de un elefante, lo mismo en aspectos científicos que personales. Es poco probable que alguna vez en su vida haya practicado algún deporte, por el contrario, era un empedernido de la vida nocturna y con frecuencia se echaba sus copitas; además se desvelaba incluso cuando no andaba de parranda, pues prefería desarrollar sus ideas de noche. Cuando terminó su doctorado e inició su trabajo en Gotinga como asistente de Max Born, el jefe tenía que

enviar una criada para despertarlo y asegurarse de que estuviera a tiempo para dar las clase de las 11 de la mañana.

Pauli era originario de Viena, creció en el seno de una destacada familia de académicos muy cercana al físico y filósofo Ernst Mach; el mismo hombre que le hizo la vida de cuadritos a Ludwig Boltzmann fue el padrino de bautizo de Wolfgang. A diferencia de Werner, que trataba de publicar sus ideas casi en cuanto se le ocurrían para obtener la primicia del descubrimiento, Pauli era sumamente cuidadoso en el desarrollo teórico de sus trabajos: le preocupaba más lograr un artículo impecable que ser el primero en realizar el aporte. La obsesión de perfección era especialmente dura con su propio trabajo, incluso lo hacía entrar en profundas depresiones cuando consideraba que no avanzaba de acuerdo con sus estándares, pero también la aplicaba con singular crueldad a los esfuerzos de los demás. Esto lo hizo un valioso colaborador científico —sus críticas ayudaron en mucho a depurar las ideas de Bohr y Heisenberg— pero también lo convirtió en una persona sumamente antipática. Un «mamón» en toda la extensión de la palabra.

En una ocasión, Paul Ehrenfest le comentó: «Me agrada mucho su trabajo científico, lástima que no pueda decir lo mismo de su persona», a lo que Pauli pronto replicó: «Qué curioso, a mí me ocurre exactamente lo opuesto con Usted». Su implacable lengua llegó a ser legendaria, incluso lo llevó a ser conocido como «el látigo de Dios». Cuentan que —aún siendo estudiante en Munich— en una ocasión asistió a una conferencia de Albert Einstein sobre relatividad; al concluir la plática se levantó para decir: «lo que el señor Einstein acaba de decir no es del todo estúpido».¹¹ Imagínense el tamaño de su ego.

11. En ese momento, Einstein aún no era galardonado con el Nobel, pero esto seguramente no hubiera significado ninguna diferencia para Pauli.

También fue célebre internacionalmente por no llevarse nada bien con los aparatos experimentales. Ya contamos que a J.J. Thomson le bastaba un pequeño toque para descomponer un dispositivo; Pauli era todavía peor: bastaba con que llegara a un laboratorio para que los instrumentos empezaran a fallar. Esto era conocido, a modo de broma, como el «efecto Pauli». En una ocasión, con motivo de una visita programada, unos estudiantes quisieron gastarle una broma con un complicado arreglo que rompería un montón de aparatos cuando el científico abriera la puerta de un laboratorio. Sin embargo, cuando él llegó y abrió la puerta, nada ocurrió; los bromistas estaban decepcionados pero Wolfgang les pidió que se animaran: con el «no funcionamiento» del artilugio acababan de realizar una contundente demostración del «efecto Pauli».

En fin, Bohr obtuvo dos refuerzos de gran valor cuando se llevó a estos jóvenes maravilla a su equipo. Pese a que no permanecieron mucho tiempo en Copenhague, realmente les supo sacar jugo: ambos realizaron aportes científicos que les merecieron el Nobel. Los trabajos sirvieron en gran medida para potenciar las ideas de Niels e incrementar el prestigio científico del Instituto Bohr.

El primer gran aporte vino del pesadito de Wolfgang. Estaba intrigado por el problema de la distribución de los electrones en niveles de energía, así que se puso a analizar muchísimos datos espectrales de diferentes materiales y llegó a una conclusión fundamental: dos electrones no pueden tener el mismo estado energético al mismo tiempo; esto se conoce como Principio de Exclusión de Pauli. Así logró explicar, por vez primera, por qué los electrones están distribuidos en capas en vez de amontonarse en el primer nivel de energía del átomo. Más adelante se vería que este principio es mucho más general y que aplica a otras partículas, además del electrón.

Por aquel entonces, solo se conocían tres números cuánticos para definir los estados de los electrones en el átomo. Primero estaban las capas energéticas (n), cada una de ellas contenía subniveles (l) y estos, a su vez, tendrían orbitales (m). Pero para que todo funcionara de acuerdo con las propiedades de los elementos químicos era necesaria la existencia de un nuevo número cuántico, y aunque en su teoría aparecía la necesidad de esta propiedad, Pauli no tenía la menor idea de qué representaría en términos físicos.

Poco después, en Holanda, dos alumnos de Paul Ehrenfest, Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck, demostraron experimentalmente que se trata de una propiedad magnética resultante de un giro de los electrones —o al menos de su campo eléctrico— y le dieron el nombre de *spin* (que significa «giro» en inglés). Este número cuántico puede tomar valores de $1/2$ y $-1/2$ para los electrones, pero también aparece con valores diferentes en otros tipos de partículas (por ejemplo, el *spin* del fotón es 1).

Los nuevos hallazgos embonaban con el átomo parchado de Bohr, de hecho lo hacían funcionar mejor, pero aún así no acababa de convertirse en una verdadera teoría. A Heisenberg esto le chocaba considerablemente; estaba determinado obtener una teoría cuántica basada en hechos fundamentales y no en ideas sacadas de la manga. Buscando dar claridad a las cosas realizó algunos trabajos con Kramers en Copenhague, aunque realmente no se llevaba muy bien con él.¹² Sin embargo la propuesta no avanzaba y finalmente le quedó clara una cosa: había que cambiar aspectos de fondo para lograr una verdadera teoría cuántica, tenían que renunciar a todos los supuestos que no estuvieran basados en experimentos. Por ejemplo, no había nada que indicara que los electrones tuvieran

12. Kramers era muy celoso de su puesto de lugarteniente de Bohr y veía en el joven alemán un peligro para su estatus. Pauli y Heisenberg lo apodaban «Su Eminencia» porque decían que se sentía el gran cardenal del «Papa» Bohr y, cada que podían, le hacían la vida de cuadritos.

órbitas en el átomo; esos eran puros «sueños güajiros» de los físicos que se emocionaban con la posible existencia de un sistema solar en miniatura.

Werner desarrolló una nueva formulación que rompería por completo con la visión tradicional de la mecánica clásica: no sería posible conocer paso a paso la evolución del sistema, solamente se preocuparía por las condiciones inicial y final que pudieran medirse. Para desarrollar su teoría, se limitó a usar conceptos sólidos asociados a magnitudes que se pudieran medir: energía, intensidad y frecuencia de las líneas espectrales identificadas en los gases calientes. El resultado de su trabajo fue un chorrizo matemático de grandes proporciones, muy laborioso para resolver pero que se mostraba prometedor para obtener resultados favorables.

El desarrollo de las ideas de Heisenberg condujo a una estructura peculiar, pues no era conmutativa. ¿Y qué es eso? Normalmente, es exactamente lo mismo multiplicar AxB que multiplicar BxA , pero en el modelo de Heisenberg las cosas no resultan tan bonitas. Digamos que es como el proceso para hacer un pastel: no es lo mismo mezclar los ingredientes y luego hornearlos, que hornearlos y luego mezclarlos. Así, los resultados de la nueva teoría eran completamente diferentes dependiendo del orden de multiplicación.

A pesar de ser confuso, el planteamiento tenía sus bondades; logró resultados acertados que recordaban aspectos similares de «la teoría Frankenstein» de Bohr. En lugar de órbitas arbitrarias, que no resultaban detectables, aparecieron estados de energía permitidos, y en lugar de saltos de los electrones había transiciones entre los estados cuánticos. La cosa se puso complicada porque no podía establecerse la posición de un electrón dentro del átomo, entonces este elemento fue sustituido en las cuentas por la probabilidad de transición del electrón de un

estado a otro. Con esto se le dijo adiós a las certezas; ahora las predicciones teóricas se plantearían en términos probabilísticos.

Al principio ni el mismo Werner sabía a ciencia cierta cuáles eran los conceptos matemáticos con que estaba trabajando, realmente estaba a ciegas. Esto no debe extrañarnos; en aquel entonces, los físicos no tenían una formación matemática tan sólida como la de la actualidad. La prioridad en la formación, incluso en la investigación, era entender los conceptos y hasta después se buscaba plantearlos de forma analítica en un lenguaje matemático. Grandes hombres de ciencia como Einstein, Bohr y Rutherford tenían cimientos matemáticos muy débiles; incluso, ya siendo doctores, el desarrollo de sus teorías los obligó a estudiar más para poder construir los formalismos necesarios para sus ideas.

En fin, a Heisenberg no le quedó otra que desarrollar sus ecuaciones de forma intuitiva y llegó a unas distribuciones parecidas a tablas de datos; fue arreglándoselas sobre la marcha para establecer reglas que permitieran realizar operaciones con ellas y esto lo llevó a las condiciones de multiplicación no conmutativas. Aunque la propuesta aún no estaba del todo madura, la acomodó en forma de artículo y la mandó a publicación con copias para Pauli y Max Born.

La cosa tomó más claridad poco tiempo después, cuando regresó a Gotinga y discutió la idea con Born. Inicialmente, el maestro estaba tan confundido como Werner pero al final —luego de una semana en que literalmente perdió el sueño— se dio cuenta de que Heisenberg estaba usando, sin saberlo, algo parecido a unos objetos matemáticos llamados matrices.

Las matrices son arreglos rectangulares de números, formados por series de filas y columnas de elementos. En general, sirven para describir sistemas de ecuaciones

lineales (en las que sus incógnitas están elevadas solamente a la primera potencia). Hasta la década de 1920, las matrices habían sido utilizadas muy poco por los físicos; se creía que eran un concepto abstracto casi sin aplicación práctica. Por suerte, Born era más matemático que físico y tenía alguna experiencia en la materia, al igual que su principal asistente en ese momento: Pascual Jordan.

Born y Jordan se dieron a la tarea de traducir por completo el planteamiento de Heisenberg a matrices y escribieron un segundo artículo que rápidamente mandaron a publicación. Para entonces Pauli —quien era la conciencia científica de Heisenberg— ya había recibido el trabajo original y estaba entusiasmado con la idea. Poco tiempo después se encontró con Born —justo cuando Max estaba más metido en la teoría— y con el tacto que le caracterizaba le dijo: «Sé que tienes una tendencia por los formalismos tediosos y complicados. Solo vas a arruinar las ideas físicas de Heisenberg con tus matemáticas inútiles».

Ni tan inútiles. Por el contrario, los resultados de la colaboración Heisenberg–Born–Jordan fueron mucho más claros y permitieron el avance de la nueva teoría. Por su parte, Pauli empezó a hacer cuentas como poseído para demostrar, luego de un arduo trabajo, que el espectro del átomo de hidrógeno podía deducirse a partir de la mecánica matricial creada por su amigo. Al ver estos resultados, Bohr afirmó que no sabía de quién sentirse más orgulloso, si de Heisenberg o de Pauli. Finalmente se había creado una mecánica cuántica a partir de principios fundamentales, con predicciones que embonaban con los datos observados experimentalmente (al menos para el hidrógeno, pues llevar a cabo las cuentas para el helio —y sus dos electrones— resultaba muy complicado en ese momento).

Aunque la traducción al lenguaje matricial le daba una estructura más accesible a la teoría, los cálculos seguían siendo muy engorrosos y requerían métodos desconocidos para muchos físicos. Esto hizo que pocos científicos se hicieran fanáticos de la propuesta; de hecho, solo hubo uno que realmente se enamoró de ella a tal grado que logró plantearla mejor que sus creadores: Paul Dirac.

Su asesor doctoral en la Universidad de Cambridge, Ralph Fowler (el yerno de Rutherford), había asistido a una conferencia de Heisenberg y platicó con el alemán al terminar el evento. Werner le contó sobre la nueva propuesta con la que estaba trabajando y entablaron un interesante intercambio de ideas. Tiempo después, Fowler recibió una copia del borrador del primer artículo de la nueva mecánica cuántica y, pensando que podría interesarle, se lo envió a Dirac.

Inicialmente, Paul no le hizo mucho caso pero conforme el tiempo pasaba no podía sacarse la idea de la cabeza. Realizó un análisis más profundo, reconoció la estructura matricial detrás de los cálculos en el artículo y decidió darle una forma más agradable al planteamiento. No solamente logró esto con increíble rapidez, además se siguió de corrido para obtener la serie de Balmer y publicar los resultados en una revista británica antes de que los artículos originales de Heisenberg, Born, Jordan y Pauli aparecieran en Alemania.

Un nuevo investigador se incorporaba a la carrera cuántica, pero no era alguien a quien le interesara acaparar el protagonismo, su único afán era llegar a una buena explicación de las cosas. Se colocó como un gran pilar para fortalecer la incipiente teoría y darle legitimidad, aunque este no sería su principal aporte. Todavía le faltaba mucho por hacer al buen Paul Adrien Maurice (PAM) Dirac, y ya lo veremos en el siguiente capítulo.

Gracias a las colaboraciones entre varios centros científicos, la teoría cuántica al fin parecía viva, con todo y que su apariencia era más matemática que física. Se formuló una descripción de lo que sucedía con los electrones al interior del átomo, pero los términos usados para lograrlo no tenían mucho significado físico. Irónicamente, la teoría que explicaba el interior del átomo lo convertía en una caja negra; todo parecía indicar que ya no sería posible visualizar lo que sucedía en su interior. Esto no les causaba mayor problema a matemáticos como Born, Jordan y Dirac, pero a los científicos de la vieja guardia —digamos Bohr y Einstein— no les hacía mucha gracia.

Sin embargo, pese a las dificultades para establecer conceptos físicos asociados con los mecanismos cuánticos, Niels Bohr no podía estar más feliz: un discípulo suyo había redondeado sus esfuerzos para construir la ansiada teoría cuántica y, en su opinión, el mérito debía ser atribuido a Copenhague. Se convirtió en un apasionado promotor de la teoría de Heisenberg, pero en el proceso se vio muy manchado, porque no le reconocía el mérito debido al trabajo de Born y de Jordan.

Estos no hicieron mucho por defender su crédito: pronto estuvieron ocupados en asuntos más importantes; justo cuando pensaban que debían ser coronados como los nuevos ídolos del mundo científico apareció una nueva teoría cuántica, aún más loca que la suya y que desvió por completo los reflectores. A alguien se le había ocurrido que los electrones podrían ser ondas y había una propuesta —aparentemente válida— respaldando esta idea. Una nueva batalla de teorías se avecinaba.

BUENA ONDA

Mi interés por la física empezó a despertar por ahí de los 15 años, mientras estudiaba la prepa; el gusto y la curiosidad le dieron paso a una verdadera pasión al toparme con la posibilidad de descubrir algo completamente nuevo. Por aquellos días se me ocurrió una idea revolucionaria —según yo— que no había leído ni escuchado en ningún lugar hasta entonces. Estaba convencido de que, así como la Luna se mueve en una órbita alrededor de la Tierra y ésta hace lo propio en torno al Sol, nuestra estrella —con todo y Sistema Solar— tendría que moverse alrededor del centro de la Vía Láctea.

Estaba tan prendido con mi «teoría» que —para iniciar su ascenso a la grandeza— tenía planeado inscribirla a un concurso de creatividad científica organizado por el Museo de Ciencias. Pensaba hacer cuentas para calcular el movimiento del Sol, incluir muchos gráficos y hasta construir una maqueta para ilustrar la idea. Casi estaba seguro de que con esta propuesta revolucionaría la visión del Cosmos y abriría el paso a mi fama internacional. Era un ingenuo adolescente.

Poco antes de poner manos a la obra recibí dos noticias, una buena y una mala. La buena era que yo tenía toda la razón: efectivamente, el Sol describe órbitas alrededor del centro de nuestra galaxia (se tarda unos 226 millones de años en dar una vuelta completa). La mala fue que esto no era un hallazgo inédito, hacía mucho tiempo que se sabía. Oh desilusión, la fama internacional tendría que esperar.

Esta experiencia me enseñó la importancia de leer lo que han hecho otros antes de buscar algo nuevo; de otra forma desperdicias un enorme esfuerzo queriendo inventar la rueda, el hilo negro o el agua tibia. Antes de ponerse a investigar a fondo, los científicos se empapan con todo lo que se ha producido previamente en su área de interés; de esta forma, se suben en los famosos «hombros de gigantes» —señalados por Isaac Newton— para poder ver más lejos. A partir de aquí es que se toman los cabos sueltos, las preguntas sin resolver o los datos que no cuadran para intentar construir nuevos conocimientos.

Con el impresionante incremento en el número de investigadores activos, ha aumentado la frecuencia de un fenómeno interesante: no ha sido nada raro que en los últimos cien años dos personas (o equipos) hayan resuelto el mismo problema de forma independiente casi al mismo tiempo. A veces las soluciones son prácticamente idénticas; en otros casos, los caminos usados son completamente distintos pero, a pesar de sus diferencias, igual de efectivos.

Acabamos de ver que en 1925 Heisenberg logró crear una propuesta de mecánica cuántica para explicar el comportamiento de los electrones dentro del átomo. Su teoría parecía tener el potencial para ponerlo en la cima del mundo científico, con un trabajo revolucionario que lo haría destacar del resto de sus colegas. Ejem, bueno, ¿qué creen? Pues justo al mismo tiempo se estaba construyendo otra teoría que vendría hacerle competencia y afectar sus planes de éxito. Era la propuesta ondulatoria creada por Louis de Broglie y Erwin Schrödinger, y tenía un sustento muy interesante.

Para abordarlo tenemos que recordar algunos aspectos clave del estudio de la naturaleza de la luz. A inicios del siglo XIX, el buen Thomas Young demostró que la luz se comportaba como onda —con la ayuda de su experimento

de la doble rendija— y casi todo mundo descartó automáticamente que pudiera estar formada por partículas. El error era sutil pero se encontraba ahí: las pruebas indicaban que era onda, pero no había nada que dijera claramente que no podía estar formada por corpúsculos. Este pensamiento prevaleció durante casi cien años, hasta que llegó un tipo lo suficientemente loco como para hacer notar que los locos eran todos los demás.

En 1905, Albert Einstein estableció, sin descartar la idea ondulatoria, que la radiación electromagnética — como la luz, los rayos infrarrojos, el ultravioleta, etcétera— estaría compuesta por cuantos de energía, paquetes parecidos a las partículas (los fotones). Para esto, se apoyó en la recién descubierta discontinuidad de la energía; el tamaño de los paquetes se obtenía al multiplicar la frecuencia de la onda por la constante de Planck (con ese diminuto pero significativo valor de $6.6 \times 10^{-34} \text{ j} \cdot \text{s}$).

La respuesta a la propuesta fue mixta; muchos investigadores la consideraron genial y otros tantos la despreciaron. Al final de cuentas todo se reducía a una pregunta: ¿era esto realmente posible? Después de décadas de experimentos la respuesta fue un rotundo sí, la luz presentaba un comportamiento dual de onda y partícula. Aunque nunca se mostraba de las dos formas al mismo tiempo; todo dependía del experimento con el que se investigara: cuando buscaban medir sus atributos ondulatorios se mostraba como onda y al medir condiciones de partícula se portaba como corpúsculo. Realmente les daba por su lado a los científicos.

Pues bien, ya fuera por entender el retorcido sentido del humor de la naturaleza o por cualquier otra razón, a inicios de la década de 1920 la mayoría de los físicos creían en esta dualidad. Incluso algunos que —como Bohr— se oponían inicialmente a la idea acabaron por doblar las manitas. Sin embargo, a ninguno se le había

ocurrido llevar la idea a una visión más general, que involucrara otras cosas aparte de las «ondas» electromagnéticas. A ninguno, hasta que llegó Louis Victor Pierre Raymond de Broglie.¹

Louis era un fresita hecho y derecho. Nació en el seno de una noble familia francesa con un linaje que se remontaba a la época de Luis XV y suficiente dinero para garantizar una vida de comodidades. Nunca le faltó nada, seguramente hubiera podido ir por la vida sin necesidad de trabajar o estudiar con ahínco; aun así, desde pequeño mostró talento académico: poseía una memoria prodigiosa, era un orador de gran aplomo y podía discutir con suficiencia acerca de los principales sucesos políticos de la época. Su familia esperaba grandes cosas de él, pintaba para ser todo un hombre de Estado.

Una vez que llegó a la edad para ingresar a la universidad, dirigió su atención al estudio de la historia pero no se enganchó en la materia; luego probó con la filosofía y siguió un intento por hacer una carrera en derecho, pero no llegó a sentirse realmente inspirado en esos ámbitos. Llevaba tres intentos y tres pifias. Poniéndome en su lugar, imagino que ya empezaba a desesperarse; ninguna de sus opciones profesionales cuajaba y, aunque no tenía que trabajar para vivir, ya vimos que debía cargar con expectativas enormes.

Afortunadamente, cuando estaba en el clímax de la confusión, recibió una buena dosis de orientación vocacional por parte de su hermano mayor. Maurice —sexto Duque de Broglie— era un reconocido físico experimental. Gracias a la fortuna de su familia, contaba con uno de los laboratorios mejor equipados de Francia y de toda Europa. Sucede que Maurice fue el secretario científico de la Primera Conferencia Solvay, realizada en 1911 en Bruselas, Bélgica. ¿Y de qué se trataba ese evento? Pues

1. Sin duda, el científico con el nombre más telenovelerero de la historia.

«nada más» fue la primera reunión mundial de físicos. Se asistía solamente por invitación y los participantes discutieron por una semana los problemas más importantes del momento en la física: «La Radiación y los Cuantos». Al evento asistieron grandes luminarias como Marie Curie, Albert Einstein, Henri Poincaré, Hendrik Lorentz, Arnold Sommerfeld, Paul Langevin, Ernest Rutherford y Max Planck.

El nombre del congreso se debía a que se celebraba un homenaje a Ernest Solvay. ¿Un reconocido científico? Más bien un generoso patrocinador; era un astuto tecnólogo e industrial belga que soltó un buen billete para realizar en su país el máximo evento de la física a nivel internacional (el cual sigue realizándose en Bélgica cada tres años).

Maurice era un buen hermano y se llevó al joven Louis, de 19 años, como su acompañante en la conferencia. Es poco probable que el indeciso muchacho hubiera podido entrar a las sesiones de discusión científica, pero durante algunos días pudo convivir —casi codearse— con la crema y nata de la física de inicios del siglo XX. ¡Que envidia!

Tras esta experiencia, como era de esperarse, Louis regresó a París convencido de su verdadera vocación: se convertiría en físico teórico. Rápidamente se matriculó en la Universidad de París, estudió en la Sorbona bajo la tutela de Poincaré y Langevin; todo pintaba para el arranque de una brillante carrera, pero al terminar la licenciatura, justo cuando estaba puesto para empezar a investigar en las entrañas de la naturaleza, estalló la Primera Guerra Mundial. A diferencia de muchos jóvenes de la época que perecieron en combate, para De Broglie esto no fue una tragedia sino un simple retraso. Louis no era del populacho: en vez de cumplir su servicio militar en el frente de combate —Dios libre a un señorito de tanta alcurnia de mezclarse con la pelusa del ejército—, sirvió a su nación en la seguridad de la estación telegráfica ubicada en la cima de la Torre Eiffel.

Finalizó la guerra y el «principito» De Broglie ya contaba 29 años de edad. Quería destacar cuanto antes en el mundo de la ciencia pero no tenía ninguna publicación de relevancia y se sentía rezagado, especialmente en comparación con los físicos jóvenes que llenaban la escena científica con ideas innovadoras. Pero no crean que Louis se detuvo a lamentarse, por el contrario, en cuanto pudo puso manos a la obra.

En uno de sus primeros trabajos trascendentes intentó darle nuevas perspectivas al Principio de Correspondencia de Niels Bohr, pero su trabajo solamente se ganó una iracunda respuesta de Kramers (el lugarteniente del danés). El holandés no podía permitir que se profanara la formulación hecha por su sacrosanto maestro; su respuesta llegó a través de un artículo publicado en Inglaterra y fue solo el inicio de una serie de ridiculizaciones que le aplicaron a De Broglie los miembros de la escuela de Copenhague.² Fiel a su casta, el francés no se achicó ante los ataques y contestó las agresiones con varios artículos que contradecían las ideas científicas de sus detractores; sin embargo, esos trabajos le ofrecieron más pena que gloria.

Dejando atrás las peleas estériles, en 1922 empezó a trabajar sobre el comportamiento dual de la luz y fue ahí donde encontró la idea que lo llevó a la fama. Originalmente, Einstein había asociado a las ondas una propiedad de partícula y, con ayuda de derivaciones matemáticas, ahora Louis se atrevía a sugerir que cualquier partícula en movimiento podría considerarse como una onda.

Aunque en principio la propuesta sonaba bastante «pacheca» —pues nunca se había visto un cuerpo compor-

2. Con frecuencia lo asociaron de forma despectiva con la imagen del cómico Charles Chaplin, comparación que no estaba tan perdida si consideramos la forma que Louis de Broglie daba a su bigote.

tarse como onda— tenía la ventaja de contar con una formulación muy sencilla: para obtener la longitud de onda de un cuerpo solamente había que dividir la constante de Planck entre su momento (se trata de la cantidad de movimiento de un objeto y se obtiene multiplicando la masa del mismo por su velocidad).

Uf, pero si la constante de Planck de por si es pequeña y todavía hay que dividirla entre el momento; eso da un número menos que diminuto. Aun con la tecnología de la actualidad sería imposible medir la longitud de onda de un avión, un carro o incluso una mosca. Pero a Louis de Broglie no le interesaba abordar los fenómenos relacionados con objetos que tienen un gran momento, tenía en mente partículas como los electrones que —por su masa tan pequeña (9.1×10^{-31} kg)— tendrían una longitud de onda parecida a la de los rayos X. En teoría, sería posible medirla para comprobar su atrevida propuesta.

Él concebía el electrón como una onda estacionaria vibrando alrededor del núcleo. Imaginemos una onda vibrando en una cuerda amarrada a un poste, ahora quitamos el poste y atamos los extremos de la cuerda mientras la onda sigue vibrando; sería como una liga que está oscilando continuamente. Más o menos en esto consiste la idea del electrón/onda en el átomo. Los niveles de energía, que Bohr había forzado en su teoría, aparecían aquí como una consecuencia de los diferentes estados de vibración. Incluso, al sacar cuentas, De Broglie logró calcular la longitud de onda del electrón en cada uno de los niveles de energía.

La idea le entusiasmó tanto que decidió usarla como base para su tesis doctoral, cuyo asesor era Paul Langevin. Don Paul leyó el trabajo pero no se sintió capaz de establecer si era una propuesta genial o una tomadura de pelo, así que lo envió a alguien que podía darle claridad al asunto: el primer hombre en proponer la dualidad onda-partícula.

Albert Einstein inmediatamente reconoció el valor de la propuesta, apoyó a De Broglie con Langevin y elaboró un artículo para explorar, redondear y promover la idea del «principito». A partir de esta publicación de don Beto, el audaz trabajo se dio a conocer a nivel internacional; fue así como llegó a las manos de un investigador que lo llevaría a un nuevo nivel.

Erwin Schrödinger era un profesor originario de Viena que entonces trabajaba en Suiza; vio la nueva idea como una gran oportunidad para deshacerse de las «horrorosas» discontinuidades que la teoría de Bohr le aplicaba al átomo. Inmediatamente empezó a predicar las bondades de la nueva propuesta desde su cátedra de física en la Universidad de Zurich, aunque él realmente no estaba investigando al respecto. Sin embargo, al finalizar una conferencia, un profesor señaló que debería desarrollarse una ecuación de onda para describir el comportamiento de los electrones si se los quería tomar en serio como ondas. Alguien debía hacer ese trabajo y Schrödinger decidió que él iba a ser ese alguien.

Tal como De Broglie, Erwin se sentía un poco frustrado respecto de su producción científica. Ya estaba grandecito y aún no lograba trascender en la física; había publicado algunos artículos respetables sobre teoría del color pero no se trataba de nada revolucionario. Al sentirse insatisfecho con su trabajo, Schrödinger frecuentemente cambiaba de línea de investigación sin dar con ningún tema relevante; ahora se le presentaba la oportunidad de establecerse como un investigador importante, desarrollando una propuesta que lo entusiasmaba bastante.

Empezó a trabajar con todo en la construcción de la ecuación de onda pero no acababa de darle forma, mucho menos cuando intentaba aplicar los efectos de la Teoría Especial de la Relatividad (debían de considerarse las altas velocidades de los electrones al moverse en el

átomo). Un tanto frustrado —con el problema a medio resolver— se tomó unas románticas vacaciones en los Alpes; nada fuera de lo normal, ¿verdad? Pero el detalle es que dejó a su esposa en casa. Santo enmascarado de plata, ¿entonces a quién se llevó?

Aquí vale la pena darnos un momento para jugar a ser Pato Chafoy y meternos en los chismes de la vida romántica de don Erwin. Sucede que desde muy joven tuvo una gran fascinación por las mujeres: le encantaba ser el objeto de atención de las damas, especialmente si eran más jóvenes. A los 23 años se enamoró perdidamente de Felicie, una chica 8 años menor que él pero de mayor alcurnia; los padres de ella no le permitieron formalizar la relación con un hombre que consideraban socialmente inferior.

La decepción orilló a Schrödinger a convertirse en un sensualista empedernido. Buscaba la compañía de muchas mujeres pero no se acababa de comprometer con ninguna. Vivía como mujeriego, brincando de una compañera a otra, hasta que conoció a Anny. Solo con ella se animó a establecer de nuevo una relación formal, con la fortuna de que ahora sí le hacían caso y de que no tenía problemas con los suegros. Curiosamente, aunque en ese momento Erwin ya era todo un profesor de física, ella ganaba más que él en su trabajo como secretaria. Esto no fue problema por mucho tiempo, en cuanto Schrödinger consiguió un puesto con mejor salario la sacó de trabajar para que se dedicara de lleno al hogar. Sin embargo, inicialmente sus puestos académicos no fueron muy estables que digamos: desarrolló estancias temporales en Jena, Stuttgart y Breslau hasta que finalmente apareció la gran oportunidad de una plaza en la Universidad de Zurich.

En Suiza, la pareja encajó a la perfección, no precisamente por la belleza del país, el delicioso chocolate o la tranquilidad; se acomodaron especialmente bien gracias a la moral relajada que encontraron en la capital. Los

Schrödinger tenían un matrimonio sumamente liberal, ambos tenían la libertad de buscar sensuales aventuras donde mejor les pareciera. Aunque resulte increíble, a Erwin en verdad no le molestaba saber de las travesuras de su señora; incluso llegó a colaborar científicamente con uno de sus «socios» (un reconocido matemático de su universidad). Irónicamente, aunque le parecía genial que le dieran chanza de andar de coscolino, y tampoco tenía problema con que su mujer le diera vuelo a la hila-cha, quería que Anny se pusiera celosa con sus aventuras, probablemente para sentirse apreciado.

Ya visto de esta forma, nos damos cuenta de que —dentro del matrimonio Schrödinger— llevarse a su segundo frente de vacaciones a los Alpes no era extraño ni tampoco injusto; seguramente, la señora no se quedaba a aburrirse en su casa. Lo curioso es que la amante específica de este viaje —cuyo nombre no pude averiguar para darle el crédito que merece— funcionó como musa inspiradora: al regresar a casa, Erwin ya había desarrollado una ecuación de onda no relativista para el electrón.

La ecuación fue puesta a prueba y ofrecía buenos resultados para los datos espectrales del hidrógeno, tal como lo hacía la teoría matricial, pero con un desarrollo matemático mucho más sencillo. Los físicos de la época estaban bien familiarizados con las ecuaciones diferenciales usadas para describir las ondas —era un abordaje que casi todos estudiaban durante la carrera—, pero muy pocos conocían las matemáticas usadas en la laboriosa propuesta de Werner Heisenberg.

La teoría ondulatoria se publicó casi de forma simultánea a la matricial y esto mató la poca ventaja inicial que podría haber tenido esta última. Para la mayoría de los físicos era más fácil trabajar con las ecuaciones de onda que con las matrices, lo cual favoreció de forma notable el trabajo de Schrödinger. Esto fue un gran golpe para

Heisenberg, quien sentía que le robaban la gloria antes de que pudiera siquiera disfrutarla.

A inicios de 1926, el joven alemán acababa de asumir el puesto de asistente de Bohr, luego de que Kramers aceptara una plaza de profesor en su natal Holanda. Aunque le gustaba la posición, no quería quedarse ahí para siempre y tenía la esperanza de que su nueva teoría lo condujera a una plaza en alguna universidad de prestigio.

Inició una pelea encarnizada para establecer cada teoría como superior a la otra, los contendientes empezaron a lanzar ofensas a diestra y siniestra. Werner decía que la ecuación de onda era una mierda, algo abominable y repulsivo, que solamente era útil como una herramienta matemática, pues esas ondas no tenían sentido físico. Obviamente, Erwin no se quedó callado: contestó que la mecánica cuántica matricial era repulsiva, irracional y horrosa, su falta de visualización era una rendición para el avance de la ciencia.

Se estaban dando hasta con la cubeta en una disputa científica de época que no se veía desde los pleitos Newton/Huygens (recordemos que Bohr y Einstein fueron mucho más civilizados en sus discusiones). Sin embargo, había una gran diferencia en el estatus de los «broncudos»; los protagonistas del primer debate onda-partícula ya tenían un lugar bien ganado en la escena científica antes de pelearse entre ellos, mientras que estos nuevos personajes no habían logrado gran cosa. Se estaban jugando toda la posibilidad de hacerse con un gran prestigio, reconocimiento y mejores puestos de trabajo.

A mediados de ese mismo año, justo cuando el pleito se ponía mejor, sucedió algo inesperado; se presentó uno de esos momentos que marcan una diferencia en la historia de la ciencia, o al menos en su relato. En la Universidad de Berlín se realizaba un concurrido coloquio dedicado a los temas cuánticos, estaban presentes más de 200 físicos

y estudiantes de diferentes instituciones. Al final del evento, Einstein se levantó y dijo: «¡Escuchen! Hasta ahora no teníamos una teoría cuántica exacta y hoy, de repente, tenemos dos... Estarán de acuerdo que estas dos teorías deben ser mutuamente excluyentes. ¿Cuál teoría es la correcta? Quizá ninguna de ellas lo es». En ese momento, otro físico se paró y dijo: «Acabo de llegar de Hamburgo. Pauli demostró que las dos teorías son idénticas».

Resulta que Heisenberg y Schrödinger se estaban peleando por defender dos propuestas que, al menos matemáticamente, eran equivalentes. Claro está que surgieron de forma muy distinta y que tenían claras diferencias conceptuales: en su esquema, Werner veía los electrones como partículas, ubicándolas en diferentes estados de energía y realizando transiciones entre ellas; por su parte, Erwin se mantenía en una idea ondulatoria, intentando romper con las discontinuidades y los latosos saltos.

Una vez que quedó claro que ambos tenían algo de razón, una de las preguntas que muchos físicos se hicieron fue: «si los electrones pueden portarse como ondas, ¿de qué son ondas?». Sabemos que las ondas pueden formarse al lanzar una piedra en un estanque, o al hacer vibrar el aire con nuestra voz, o al generar alteraciones en campos electromagnéticos (como en la luz y otros tipos de radiación); pero no parecía existir un sentido físico para la onda del electrón.

Max Born —el profesor de la Universidad de Gotinga que colaboró con Heisenberg en el desarrollo de su teoría matricial— fue el primero en darle cierta idea real a la función de onda. Demostró que si *la* elevamos al cuadrado se obtienen todas las formas posibles en que se puede comportar un electrón en ciertas condiciones, es decir, se obtienen todos sus estados posibles. A partir de esta superposición de estados, usando los datos para una situación específica, sería posible obtener la probabilidad

de que un suceso se lleve a cabo de tal forma en cierto momento. Décadas después de los aportes de Boltzmann, Planck y Rutherford, las probabilidades seguían apoderándose de la escena atómica.

Entonces, el aspecto ondulatorio de los electrones —o para el caso de otras partículas subatómicas— no hace otra cosa que describir su comportamiento estadístico. Uno por uno, los electrones se comportan de forma aparentemente aleatoria, no podemos saber exactamente qué va a ocurrir en un caso específico, pero en grupos grandes podemos establecer claramente la probabilidad de que las cosas ocurran de tal o cual manera. Esto me remite al comportamiento de la desintegración de los átomos radiactivos, ¿los recuerdan? Sabemos que después de cierto tiempo (la vida media), la mitad de los núcleos en un material radiactivo se habrán dividido en átomos más ligeros, aunque no podamos establecer específicamente cuáles átomos se desintegrarán y cuáles no. «Misterio cuántico», diría Sergio de Régules.

Volviendo a la historia, la escuela de Copenhague no se podía quedar atrás en un desarrollo de esta magnitud. Tras el debate que perdió con Einstein, Bohr ya estaba completamente convencido de la naturaleza dual de la luz y le fascinaba la simetría de encontrar una nueva situación de onda-partícula en los electrones. La demostración de equivalencia de las teorías de partículas y de ondas reforzó esta idea, así que se puso a trabajar en el desarrollo de un planteamiento intermedio entre las dos propuestas.

En el mismo Instituto, mientras trabajaba como mano derecha de Bohr, Heisenberg también involucró algunos elementos de la propuesta ondulatoria al intentar desarrollar una teoría cuántica mejorada. Pero para darle más impacto a su trabajo y conseguir apoyo de un buen número de científicos, tenía que hacer destacar su nueva propuesta: como Schrödinger se rehusaba a aceptar las

discontinuidades cuánticas en su teoría, decidió que él las iba a convertir en una importante bandera para la suya. Este probó ser un movimiento clave, pues al resaltar la crucial diferencia entre las teorías logró que los integrantes de las escuelas de Gotinga y Copenhague se alinearan a su favor.

Sin sospechar la fuerte embestida que se gestaba contra su trabajo, Erwin se encontraba viajando de un lugar a otro promoviendo el lanzamiento de la teoría ondulatoria (algo así como la versión académica de lo que hacen actualmente los artistas cuando tienen un disco nuevo). La gira se desarrolló de forma realmente alentadora para su propuesta, estaba causando sensación, hasta que hizo una parada en casa y su señora le informó que lo había comprometido para dar asesorías durante el verano.

¿Qué, qué, qué?

Mujer ingenua, ¿a poco don Erwin iba a detener su espectacular racha científica por ponerse a dar clases a jóvenes con problemas escolares? Pues —aunque ustedes no lo crean— así fue. Sucede que las alumnas eran las guapas hijas de un amigo de la familia, y de buena gana aceptó trabajar con las gemelas de 16 años Withi e Ithi. Ante el buen ver de las damitas, el profesor no sintió mucho dolor al poner en espera la gloria de la física para dedicarse a trabajar con ellas. Al poco tiempo, oh sorpresa, el profesor estaba enamorado de Ithi; apenas se acordaba que todavía tenía trabajo por hacer en su ecuación de onda.

Mientras tanto, en Cambridge, Inglaterra, a Paul Adrien Maurice Dirac —PAM para los cuates— las «trivialidades» como el amor o las mujeres no lograban distraerlo; estaba completamente dedicado a la física y su labor lo conducía a resultados importantes. El compromiso académico no era algo reciente. Desde su infancia había centrado su atención en la escuela; siempre fue muy tímido, tirando

a introvertido, tanto así que su principal distracción era escalar montañas en solitario; cuando no podía acceder a una, practicaba trepando en los árboles (realmente era un chico raro). Durante sus años de estudiante no tuvo novia y cuentan que vio a su primer mujer desnuda hasta los 25 años, cuando visitó un balneario en Rusia en 1927. Se casó hasta diez años después con Margit, la hermana del físico Eugene Wigner (al parecer las pocas mujeres que conocía se las presentaban sus colegas). Ya en la vida conyugal, cuando Paul tenía visitas en casa no presentaba a Margit como su esposa, sino como la hermana de Wigner.

Dirac realmente vivía entregado a la ciencia y poseía grandes aptitudes para hacerlo: combinaba en una sola persona el talento matemático de Born, la intuición de Heisenberg y el rigor de Pauli; solamente le faltaba la habilidad experimental de Rutherford para tener el paquete completo (pero eso ya hubiera sido demasiado pedir). Muchos físicos, mitad en broma, mitad en serio, decían que no podía ser humano; no era normal poseer todos esos atributos. Quizá a esta suma de talentos se le podría haber dado explicación divina —era como un regalo de Dios— pero esto jamás habría sido permitido por Paul; era famoso por su ateísmo empedernido. Los pícaros de Heisenberg y Pauli decían: «Dios no existe y Dirac es su profeta».

A pesar de la separación geográfica, nuestro amigo mantenía una estrecha relación con Bohr y sus pupilos. Su tesis de doctorado fue un elegante trabajo matricial derivado de la propuesta de Heisenberg; logró mostrarla de forma más elegante y clara que el propio Werner en sus artículos. Inmediatamente después de obtener el grado se fue varios meses a Copenhague para una estancia de investigación. A partir de ahí se mantuvo en contacto permanente por correo con Niels Bohr, a quien admiraba hasta el grado de pensar que era para la teoría atómica lo que Newton había sido para la mecánica clásica.

Aunque toda esa admiración nunca le impidió ser crítico con el profesor; a Dirac le desesperaban especialmente dos cosas: una era su insistencia a buscarle sentido físico a todos los resultados matemáticos, y la otra era su tendencia a iniciar una frase sin saber cómo la iba a terminar.

Inicialmente, Paul no se interesó mucho en la mecánica cuántica ondulatoria, en parte por lealtad y en parte por convicción de la validez de la propuesta matricial. Sin embargo, empezó a trabajar con ella en cuanto supo de la equivalencia de las teorías. Vio la oportunidad de profundizar en el desarrollo de la física cuántica y empezó a trabajar con los resultados de Schrödinger; les encontró varias bondades y trabajó con la idea de incluir en ellos el Principio de Exclusión de Pauli, para calcular la probabilidad de la transición de un electrón entre dos estados de energía.

Sin embargo, Born y Jordan estaban haciendo lo mismo en Gotinga, sus resultados vieron la luz prácticamente al mismo tiempo. Dirac se sintió lleno de frustración; hasta ese momento ninguno de sus aportes había sido inédito. PAM quería la satisfacción de descubrir algo que nadie más hubiera encontrado, salir finalmente de la sombra de Gotinga y Copenhague. Para conseguirlo, se aseguró de no soltar información sobre el nuevo esfuerzo que iba a emprender: el desarrollo completo de la primera ecuación de onda relativista. No era una tarea sencilla, muchos habían fracasado en el intento, y le tuvo que dedicar mucho tiempo a la empresa, pero su perseverancia le daría frutos espectaculares que en breve les voy a comentar.

Mientras tanto, regresemos al mes de octubre de 1926, cuando Dirac todavía estaba en Copenhague, y Schrödinger salía de Zurich para someter sus ideas a una prueba de fuego: visitar el Instituto Bohr. Llegó con la fuerte convicción de que se deberían abandonar los saltos cuánticos y, por si eso fuera poco, se oponía de forma tajante a la visión probabilística planteada por Born.

Desde su primer conferencia, despertó polémica con sus ideas; todos los presentes se le echaron encima más rápido de lo que se dice «onda», le dijeron hasta de lo que se iba a morir, parecía que querían comérselo vivo. Pero Niels Bohr puso orden, pidió a sus pupilos que respetaran y dejaran tranquilo al visitante: si alguien se lo iba a comer sería él.

Niels atacaba las ideas de Erwin día y noche, por uno y otro lado, sin darle más que el mínimo respiro para dormir. Nunca en su vida el vienés se había sentido tan hostigado como cuando estuvo en la implacable mira del director del Instituto de Física de Copenhague. Tal fue el desgaste, que el visitante acabó exhausto y enfermo, con Bohr al lado de su lecho, ¿para cuidarlo? Claro que no, seguía agobiándolo con argumentos contra su propuesta.

Pese a todo, Schrödinger resistió de forma casi heroica y no dio paso atrás en su teoría, salió de Copenhague muy maltrecho pero sin darles la satisfacción de ceder terreno. Considerando la situación, esto casi podía verse como un triunfo para su causa. Aunque, sin duda, su anfitrión fue quien sacó más provecho de la «batalla» recién librada. Los desgastantes debates fueron de gran valor para Bohr, quien los usó para aclarar sus ideas y avanzar considerablemente en el desarrollo de su versión conciliadora de la mecánica cuántica.

Para inicios de 1927, Bohr ya estaba muy avanzado en la propuesta que abrazaba por completo la dualidad onda/partícula. Involucraba en gran medida las ideas de Heisenberg pero veía la necesidad de hacer muchos ajustes, mientras que Werner —con su propia versión— creía que ya tenía entre manos una teoría completa: la última palabra de la mecánica cuántica. Durante los meses siguientes, los dos científicos se enfrentaron constantemente por esta situación, generando una tensión que llegó a enfriar su relación hasta el punto de prácticamente dejar de hablarse.

Y es que el alemán estaba realmente satisfecho con su teoría. Había trabajado a todo vapor en su nuevo planteamiento e incluso contaba con el visto bueno de Wolfgang Pauli (el látigo de Dios). Antes de comunicárselas a nadie más, le había mandado una carta a Pauli con la esencia de sus ideas: una parte clave señalaba que la posición de una partícula sería observable, pero la trayectoria sería discontinua y solo podría tratarse de forma estadística. La posición —el lugar en el trayecto, representado con la letra q — y el momento —el viaje entre lugares, anotado con la p — no podrían determinarse al mismo tiempo. Pauli ya había considerado ideas parecidas un poco antes, incluso llegó a decir: «puedes ver el mundo con el ojo p o con el ojo q , pero si abres los dos al mismo tiempo, te vuelves loco», así que respondió con una entusiasta aprobación a la propuesta de Heisenberg.

Con una opinión favorable de uno de los científicos que más respetaba, Werner siguió adelante en el proceso de publicación de su trabajo y dio a conocer la relación que llegaría a ser su salto a la fama:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq h/4\pi$$

La Δp (se lee delta p) representa el rango en el que sabemos que se encuentra el momento de una partícula. Podemos determinar que está entre dos valores p_1 y p_2 ; si estos dos valores son muy cercanos, tenemos una Δp pequeña que representa una medición muy exacta; si están más separados, Δp es grande y no tenemos una idea clara del valor del momento. Lo mismo ocurre para la Δq (delta q , que también podría anotarse como Δx , por tratarse de una posición): es el rango de espacio en que podemos encontrar la partícula en cuestión.

La relación indica que no importa lo que hagamos, siempre que multipliquemos el rango de exactitud de p por el de q el resultado tiene que ser mayor o igual a la constante de Planck dividida sobre 4π . Esto significa que

no es posible determinar al mismo tiempo la posición y el momento de un electrón con exactitud; entre mejor se conoce uno menos se sabe del otro. Werner también estableció una relación casi idéntica para el tiempo y la energía de un suceso: tampoco podemos establecerlos exactamente a ambos. Esto se conoce como el Principio de Incertidumbre de Heisenberg³ (o como Principio de Indeterminación).

El trabajo parecía estar a punto, resultaba muy interesante y no podría haberse terminado en mejor momento: se avecinaba la quinta Conferencia Solvay para octubre de 1927, y el tema sería «La Teoría Cuántica y las Teorías Clásicas de Radiación». Parecía que todo se resolvería ahí, finalmente habría de establecerse quién tenía la razón y —después del éxito inicial de la teoría ondulatoria— Heisenberg necesitaba presentar algo nuevo, radical y verificable para ganarse el apoyo de los físicos más importantes de la época.

Originalmente, Schrödinger no estaba programado para hablar en el evento pero Einstein le cedió su lugar, pues sentía que no tenía nada nuevo o importante que decir. A Erwin se le abría una gran oportunidad para brillar en el principal escenario científico de la época, y muchos elementos parecían indicar que así sería. Aunque había pocos físicos defendiendo «a muerte» la teoría ondulatoria, muchos simpatizaban con ella y varios resultados experimentales parecían darle un buen empujón.

A inicios de ese mismo año se habían publicado dos artículos de gran importancia. Dos grupos de científicos repitieron —de forma independiente— el famoso experimento de Young de la doble rendija, pero usaron electrones en lugar de luz. Como ya no se trataba de emisiones

3. De ahí salió el chiste picante que sostenía que Heisenberg era un pésimo amante porque cuando encontraba la posición no encontraba el momento y cuando encontraba el momento no tenía idea de la posición.

luminosas, se usó una pantalla fluorescente para medir el resultado. Al chocar en ella, cada uno de los electrones causaría un pequeño destello. Si solo fueran partículas en la pantalla únicamente se habrían formado dos manchas separadas; sin embargo no fue así, las «partículas» se difractaron y crearon un patrón de interferencia. ¡De Broglie y Schrödinger tenían razón, los electrones también pueden comportarse como ondas!

Vaya que fue algo interesante, la dualidad en su máxima expresión: en el camino, los electrones se portaban como ondas, y al chocar con la pantalla se mostraban como partículas. La demostración no fue fácil de hacer, probablemente no hubiera sido posible 15 o 20 años antes. Para lograr la difracción de una onda —así como producir patrones de interferencia— se requieren ranuras con un grosor del mismo tamaño que la longitud de onda en cuestión. Se esperaba que los electrones tuvieran una longitud de onda similar a la de los rayos x —del orden de nanómetros, 10^{-9} metros— algo muy pequeño para que el ser humano pudiera construir rendijas apropiadas en la década de 1920. Sin embargo, este problema ya había sido resuelto con los primeros experimentos de difracción de rayos x: se usaron como rendijas las redes atómicas de materiales cristalinos.

El primer equipo en develar el comportamiento ondulatorio de los electrones trabajaba en los laboratorios Bell; estaba liderado por Clinton Davisson, quien inicialmente no se dio cuenta de lo que había hecho. El experimento se había realizado con otro fin (en 1923, cuando aún no se publicaba la propuesta ondulatoria de Louis de Broglie); aunque los resultados fueron aparentemente disparatados, los dieron a conocer de todos modos. Tres años después, Davisson se enteró de que Born citaba sus datos como evidencia de la existencia de las ondas materiales, así que los revisó, volvió a realizar el experimento

y confirmó que los electrones podían exhibir un comportamiento ondulatorio. Tan pronto como pudo mandó un artículo a la prestigiosa revista *Nature* para dar a conocer el trabajo que confirmaba la existencia de las ondas materiales del «principito».

Casi al mismo tiempo aparecieron resultados muy parecidos obtenidos por el hijo de J. J. Thomson, George Paget Thomson. Se hizo pasar un haz de electrones por una película delgada de metal con el objetivo específico de verificar la posible naturaleza ondulatoria de estas partículas. Tal como el equipo estadounidense, se consiguió difractarlos para obtener un patrón de interferencia. Este proceso acabó por contradecir el mayor aporte científico de su padre —salió medio rebelde el muchacho— pero al mismo tiempo ganó un Nobel de Física (el cual compartió con Davisson en 1937).

¡Qué bonita familia! ¡Qué bonita familia! Padre e hijo ganadores del Premio Nobel, no es cualquier cosa. Aunque los Thomson no son el único caso de esta situación —ahí están Marie e Irène Curie, así como Niels y Aage Bohr— sí nos ofrecen una situación singular: recibieron el premio por demostrar cosas aparentemente contradictorias. El padre descubrió que los rayos catódicos están hechos de unas partículas subatómicas con carga eléctrica negativa, los electrones. El hijo demostró que estas partículas pueden comportarse como ondas, esencialmente lo opuesto de lo que intentó establecer su papá. Y ambos tenían razón, son ondas y partículas, aunque nunca se porten de las dos formas al mismo tiempo. Así es la física cuántica.

Pero este sería el menor de los conflictos originados por la dualidad onda-partícula. Una vez que los físicos encontraron algo tan interesante como el comportamiento ondulatorio del electrón no quisieron dejarlo en paz y empezaron a experimentar con él de una y otra forma

para tratar de obtener la mayor información posible. Por ejemplo, taparon una de las dos rendijas para ver lo que ocurría: los electrones volvieron a portarse como partículas, sin difracción formaron una sola mancha en la pantalla. Más adelante quisieron ver qué ocurría si en lugar de enviar un gran número de electrones —que pudieran interferir unos con otros— se mandaban de forma muy gradual para evitar que se diera esa interferencia; se llegó a enviar uno por uno. Se esperaba que volvieran a aparecer dos manchas, características de las partículas, pero no sucedió así; seguía apareciendo el patrón de franjas claras y oscuras aunque aparentemente ningún electrón tuviera otro que lo afectara. Parecía que los electrones interferían con ellos mismos.

Esto daba lugar a una explicación que desafiaba toda lógica: el mismo electrón debía atravesar ambas rendijas al mismo tiempo. La cosa no podía quedar así, se hizo un nuevo experimento para saber por cuál de las dos rendijas pasaba. La información se obtuvo con éxito, los científicos pudieron establecer con claridad cuál de las dos ranuras había sido atravesada, pero no fue gratis: al hacerlo el patrón de interferencia desapareció y se mostraron las dos manchas de partículas «clásicas».

¿Misterio cuántico? Más o menos, aunque yo más bien lo entendería como una de esas fascinantes oportunidades de lucimiento para las teorías científicas (para las que funcionan, claro). No pasaría mucho tiempo antes de que alguien le saltara a esta liebre; con el tiempo, la propuesta cuántica de Heisenberg–Born–Bohr buscó darle cierto sentido al asunto.

De acuerdo con esta teoría —influida por importantes elementos de la primera propuesta matricial—, en un experimento solamente se puede tener certeza de las condiciones iniciales, que controlamos, y de la situación final, que podemos medir. Qué sucede entre las dos situaciones

es algo que no podemos saber exactamente. Aquí entra en juego el sentido físico de la función de onda. Recuerden que Born demostró que, elevada al cuadrado, la función de onda representa la superposición de todos los estados posibles, de todas las formas en que un suceso puede llevarse a cabo. Al realizar una medición se establecen condiciones muy específicas que hacen colapsar la función de onda en una situación concreta; todas las demás posibilidades desaparecen y solo quedan los atributos específicos que se obtienen del experimento. Puesto de otra forma: si no interactúan con nada, las partículas están al mismo tiempo en todos lados y en ninguno; no se localizan en el espacio sino hasta que interactúan con algo cuando son medidas.

Después de ser lanzado hacia las rendijas, un electrón se comportaría de todas las formas posibles hasta llegar a la pantalla donde choca, colapsa su función de onda, haciendo posible medir el resultado. Se trata del comportamiento estadístico asociado a la función de onda, por eso no importa si lanzamos millones de electrones juntos a las dos rendijas, o si los enviamos uno por uno durante un largo periodo de tiempo: el resultado será el mismo. Incluso, nada cambia si el experimento se distribuye en un millón de laboratorios de todo el mundo. Imaginemos que en cada lugar se manda un solo electrón hacia las rendijas, chocando después en la proverbial pantalla fluorescente. Se toman fotos a todas las pantallas, las placas se empalman en una sola imagen y el resultado es prácticamente el mismo que si se hubiera hecho el experimento con un millón de electrones en un mismo lugar en un corto periodo de tiempo. Todo viene del comportamiento estadístico asociado a la función de onda.

Por eso mismo, se afirma que —mientras no interactúe con nada en el camino— el electrón pasa por las dos rendijas y por ninguna al mismo tiempo. Cuando se realiza la medición en las ranuras para ver por dónde pasa el

electrón se ocasiona el colapso de este comportamiento antes de que pueda presentarse la interferencia; se impone la condición de partícula y se generan dos manchas aisladas en lugar del patrón de franjas claras y oscuras.

Las ideas derivadas de la teoría de Copenhague–Gotinga resultaron realmente seductoras y provocativas, ofreciendo explicaciones muy interesantes para muchos científicos, aunque para otros —como Einstein— las interpretaciones estadísticas fueran algo inconcebible dentro de la ciencia. Don Beto y otros científicos tenían sus esperanzas puestas en lo que se conoce como Teoría de Variables Ocultas. La propuesta afirma que los electrones —y otras partículas en el dominio cuántico— pueden ser localizados en todo momento; nunca desaparecen ni están en todos lados. Las probabilidades de la función de onda no describen el comportamiento estadístico de una sola partícula, sino de la distribución de un gran número de partículas. La clave de la teoría es que la causa de este comportamiento se encuentra en variables ocultas, principios naturales aún desconocidos para nosotros.

Einstein no se resignaba a que el comportamiento estadístico ocurriera solo porque sí, debía existir una explicación detrás de todo aunque los científicos no fueran capaces de encontrarla. Claro está que, tratándose de variables ocultas, no es posible establecer si su influencia se ejerce en cada partícula para hacer que esté en todos lados y en ninguno al mismo tiempo, o bien si solamente afecta la distribución en el comportamiento de grandes grupos. En todo caso, la discusión es estéril; hasta ahora no hay nada que indique con certeza si estas variables existen o no.

Uy, con la emoción de las explicaciones nos adelantamos bastante. Regresemos al estado de las cosas un poco antes de la Conferencia Solvay de 1927. A pesar de las resistencias a la visión probabilística de Heisenberg–Born–Bohr, la propuesta estaba arropada por el frente

común de varias instituciones, con la ventaja extra —que no tenían los de la competencia— de aprovechar las principales virtudes del planteamiento rival.

Durante los meses previos al importante evento se presentó un cambio súbito el panorama de la contienda. Max Planck se jubiló y dejó vacante uno de los puestos más prestigiosos —y codiciados— en la ciencia de la época: la cátedra de física de la Universidad de Berlín. Había muchísimos aspirantes, pero el puesto acabó en manos de Schrödinger. En el terreno profesional, Erwin tenía en la bolsa una posición prácticamente inmejorable; da la impresión de que —sin cambiar en lo más mínimo sus convicciones científicas— su interés por hacer prevalecer su teoría en la Conferencia Solvay pudo disminuir considerablemente al conseguir el puesto: él ya había ganado.

Mientras tanto, Born y Heisenberg trabajaban para pulir la ponencia que presentarían en la Conferencia Solvay; querían apantallar a la concurrencia con una propuesta que consideraban un producto terminado. Unas semanas antes del evento de Bruselas, Bohr realizó una presentación en un congreso en Como, Italia, donde presentó su propia versión, muy parecida a la de Born–Heisenberg, pero dándole todo el crédito a su Instituto (y negándole a Göttinga el mérito que le correspondía).

De Broglie, trabajando esencialmente solo, elaboró una tercer propuesta para incluir en la discusión. La idea central se desprendía de su primer trabajo de ondas, pero también buscó conciliar las ideas corpuscular y ondulatoria de los electrones (así como la de la materia en general). El noble francés propuso que todos los cuerpos en movimiento llevan asociada una onda piloto. La función de onda servía como guía para el comportamiento de la partícula, pero con una posición bien establecida en todo momento, alejándose de los caminos desconocidos. La misma onda piloto sería la responsable de los

líos de interferencia y, una vez realizada esa interacción, guiaría a la partícula a su lugar correspondiente, sin dejar de tener, en el sentido clásico, una trayectoria. Era una postura mucho más determinista, compatible con la visión de Einstein y otros científicos conservadores, pero su principal falla era la falta de adeptos.

La Quinta Conferencia Solvay inició el 24 de octubre de 1927. Para aquellos que esperaban un ríspido choque entre Bohr y Einstein hubo una gran decepción. Sus intercambios públicos fueron bastante civilizados, con muy pocas discusiones directas. Lo más cercano a una pelea fue cuando, en un desplante contra el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, Albert dijo: «Dios no juega a los dados», a lo que Niels contestó: «Einstein, deje de decirle qué hacer a Dios».

Ya en lo académico, las tres teorías que competían en el evento recibieron respuestas contrastantes: las ondas piloto de De Broglie y las ondas semiclásicas de Schrödinger dieron lugar a abundantes discusiones, recibiendo muchas críticas. Por otro lado, después de la presentación de la versión de Heisenberg–Born–Bohr, nadie dijo ni pío; no los contradijeron ni cuando aseguraron tener una teoría cuántica terminada, dando a entender que su propuesta era la buena.

Lo único que siguió fue un festival de «guayabazos», en el que los integrantes de las escuelas de Copenhague y Gotinga, con ayuda de Paul Dirac, se la pasaron echándole piropos científicos a su trabajo. Dentro de este festín, el que se vio bastante mal fue Bohr, pues se refería a la propuesta como la teoría de Heisenberg e hizo lo posible para que pareciera que todo el crédito le correspondía a su Instituto. Born estaba medio maltrecho por diferentes problemas personales y profesionales, así que no metió las manos y acabó dejando que —al menos en ese momento— le quitaran su legítima parte del mérito académico.

En lo estrictamente científico no hubo un «ganador»⁴ en la Conferencia pero, al ir prácticamente solos, Schrödinger y De Broglie sucumbieron ante el trabajo en equipo de sus rivales. Por varios años se tuvo la impresión de que la «Interpretación de Copenhague» era la última palabra, la visión ortodoxa, caracterizada por considerar que durante el desarrollo de un fenómeno cuántico solo era posible determinar las condiciones inicial y final; el trayecto o la forma de desarrollo no podrían saberse hasta hacer una medición. Antes de obtener ese resultado, solamente se podían conocer las probabilidades de que el evento se llevara a cabo de cierta manera.

En 1935, Schrödinger buscó ridiculizar esta visión al plantear como un experimento mental la famosa paradoja del gato: ¡el célebre Gato de Schrödinger!

La idea funciona más o menos de la siguiente manera: encerramos a un gato en una caja; dentro de ella hay una pequeña cantidad de material radiactivo y si algún átomo en él decae se activará un dispositivo que matará al pobre gato. El dispositivo consiste en un contador Geiger que generaría una descarga al medir una emisión radiactiva; esto haría caer un martillo que rompería un frasco con ácido cianhídrico (un veneno para matar al gato). Después de una hora, hay un 50% de probabilidad de que haya decaído un átomo del material radiactivo, pero mientras no realicemos una observación —abriendo la caja— el animal estará en una superposición de estados vivo/muerto.

4. A la larga, casi todos los involucrados acabaron recibiendo el merecido reconocimiento y pasaron a la historia como creadores de la teoría cuántica. Heisenberg fue contratado como profesor en la Universidad de Leipzig ese mismo año y recibió el Nobel de Física en 1932. Pauli asumió la cátedra de Zurich, que había dejado vacante Schrödinger, y también ganó el Nobel, pero hasta 1945. Schrödinger y Dirac compartieron el galardón en 1933. De Broglie fue el primero en recibirlo, en 1929, aunque le llegó un poco tarde; su madre había muerto un año antes pensando que «el principito» no había logrado nada importante en la física.

El objetivo de este experimento mental era asociar un fenómeno clásico con la noción cuántica de superposición de estados para reducir esta última al absurdo. Todos sabemos que un ser vivo, como el gato, está sujeto a condiciones clásicas; por lo mismo, no es compatible con una dualidad vivo/muerto. Parecía que Schrödinger había logrado darle en la torre a la visión ortodoxa. Sin embargo, Bohr se sacudió la paradoja sin mucho lío; aclaró que, en todo momento, el gato estaba vivo o muerto —no había superposición— pues la función de onda colapsaba en el momento en que el contador Geiger medía la emisión radiactiva. El observador no tiene que estar vivo —o ser consciente— para producir el colapso, basta con que exista una interacción física con el sistema cuántico.

Después de la Conferencia Solvay de 1927 muchos científicos se centraron, de una u otra manera, en la Interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica; ya fuera para presumirla (como Heisenberg, Born y Bohr) o para buscarle fallas (como Einstein y Schrödinger). Sin embargo, Paul Dirac estaba en otra sintonía; aunque le dio su apoyo público, él sabía que el trabajo no estaba terminado y estaba convencido de la importancia de desarrollar una ecuación de onda relativista; con ella se echaría al hombro un logro colosal. Claro que ni en sus sueños más ambiciosos podría haber previsto los espectaculares resultados que estaba por obtener.

En 1928 logró terminar «la ecuación de Dirac», la función de onda del electrón con efectos relativistas, de la que se desprendieron consecuencias de gran trascendencia. Para empezar, el *spin* —ese giro del campo eléctrico del electrón— aparecía de forma prácticamente natural, en lugar de ser un parche agregado para hacer cuadrar las cosas. Además, al realizar cálculos de la energía aparecía una raíz cuadrada en el resultado; recordemos que una operación como esta puede arrojar valores con signo

positivo o negativo; esto se debe a que un número positivo resulta siempre que multiplicamos dos signos iguales. Por ejemplo, se puede obtener 4 elevando al cuadrado 2, pero también elevando -2 . Sin embargo, en las cuentas científicas es común descartar las soluciones con tiempo negativo o energía negativa bajo el argumento de que no tienen sentido físico. Dirac no hizo esto; se le ocurrió que esa energía «contraria» significaba algo, y que había que tomarla en cuenta.

Si asumía el electrón como la solución positiva, entonces el signo «menos» indicaba la existencia de una partícula prácticamente idéntica a él, pero con carga eléctrica opuesta. Inicialmente se pensó que podría tratarse del protón pero la idea quedó descartada dado que su masa es mucho más grande que la del electrón. La teoría predecía un antielectrón: un aspecto clave de esta partícula, que parecía sacada de los libros de ciencia ficción, era que al chocar con un electrón se aniquilaría con él. Es decir, al tocarse, ambos corpúsculos desaparecerían; detrás de ellos solo quedaría energía⁵ proporcional a sus masas —de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein ($E=mc^2$)— en forma de radiación electromagnética.

La idea, aparentemente «jalada de los pelos», quedó en lo anecdótico por cuatro años. Nadie conseguía identificar algo parecido a la partícula predicha por Dirac, pero en 1932 se obtuvo evidencia del carácter visionario del físico inglés. Carl David Anderson, al trabajar con rayos

5. Décadas después, esta idea sería usada como inspiración para la fuente de energía del *Enterprise*, famosa nave de la serie *Viaje a las Estrellas*. En la actualidad, hay muchas personas (como Tita, mi patrona) que tienen la esperanza de que eventualmente la antimateria llegue a ser la solución para nuestros problemas de energía. Sin embargo, existen tres grandes retos para lograrlo: se necesita mucha energía para producir antimateria (muchas veces más de la que le podemos sacar), no está claro cómo habríamos de guardarla y, por si fuera poco, nos hace falta alguna forma de capturar los rayos de alta frecuencia producidos en la aniquilación.

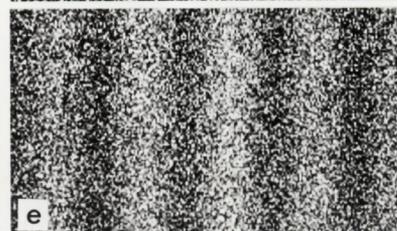
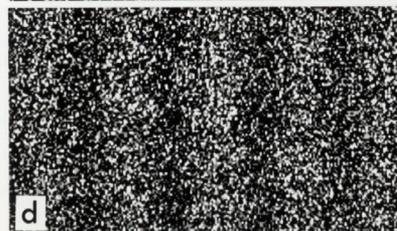
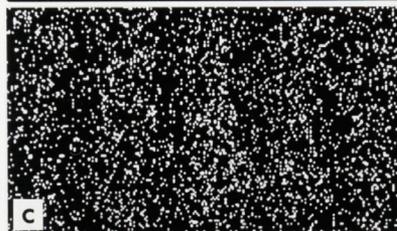
cósmicos⁶ en Caltech, se encontró con una partícula que tenía una proporción masa–carga idéntica a la del electrón pero que, bajo los efectos de un campo magnético, se movía en dirección contraria. Esto significaba que su carga era del signo opuesto. Se trataba del antielectrón. Anderson rápidamente mandó publicar un artículo. Como dijo Pasteur: «la suerte favorece a las mentes preparadas»; precisamente esa preparación les hizo falta a dos equipos que se habían topado previamente con la antipartícula sin darse cuenta, uno de ellos era el de Irène y Frédéric Joliot–Curie, la hija y el yerno de Marie Curie.

Curiosamente, el editor de la revista científica donde se publicó el trabajo no quiso aceptar el nombre de «antielectrón» y, aunque Anderson estaba convencido de llamarlo así, el artículo acabó bautizándolo como «positrón» (un nombre genial, si me preguntan a mí).

Más adelante, se demostraría que la simetría electrón/positrón no es un caso aislado, sino que todas las partículas subatómicas cuentan con antipartículas. El protón tiene su antiprotón y el fotón demostró ser su propia antipartícula, qué loco, ¿no?

La física de partículas estaba poniéndose muy interesante con los nuevos hallazgos, y eso que aún no aparecía en escena una tercera partícula subatómica que hacía falta para completar el rompecabezas del átomo y que vendría a cambiar la historia de la ciencia y de la humanidad entera, un escurridizo actor que mantendría ocupados —y preocupados— a gran parte de los físicos durante la década de 1930, un agente que ayudaría al ser humano a dominar la enorme energía disponible en el núcleo del átomo: el neutrón.

6. Se trata de partículas subatómicas con gran energía que provienen del espacio exterior y que, al entrar a nuestra atmósfera, producen impactos con energías mucho mayores a las que se pueden encontrar en laboratorios.



Resultados de experimento de doble ranura con electrones.

El número de partículas para cada caso es:

- a) 11
- b) 200
- c) 6,000
- d) 40,000
- e) 140,000

Imágenes cortesía del Dr. Akira Tomonaga

Imagen tomada de Wikimedia Commons

La eminencia gris

«**T**odos para uno y uno para todos»; una frase sensacional que podría aplicarse a cualquier actividad colectiva y que podemos relacionar también con el trabajo científico. Un investigador aprovecha las publicaciones de todos sus colegas (pasados y presentes) para prepararse, y es así como está en condiciones de averiguar cosas nuevas sobre la naturaleza. Por otro lado, cuando descubre algo, elabora artículos para compartir sus hallazgos con toda la comunidad científica (y para llevarse una buena dosis de reconocimiento en el proceso). El trabajo de todos le sirve al individuo y el aporte de un investigador puede enriquecer a todos sus colegas.

Aunque por mucho tiempo —en mayor o menor medida— la ciencia ha actuado de esta manera, el lector ya sabrá que la frase citada no se le ocurrió a ningún científico; en realidad procede de uno de mis libros favoritos: *Los tres mosqueteros*. Fue una de las primeras aventuras que mi mamá me leía en la infancia¹ y desde entonces me encanta, nunca me cansaré de leer las aventuras de D'Artagnan y sus intrépidos amigos que le dan nombre al libro: Athos, Porthos y Aramis.

No están ustedes para saberlo ni yo para contarlo, pero el protagonista de la historia es un personaje de la vida real. D'Artagnan de verdad vivió y caminó en las calles de París. Alejandro Dumas tomó elementos de la vida de este hombre y de la historia de Francia, los aderezó con

1. ¡Gracias, Lolita!

tramas de su cosecha y consiguió crear un gran clásico de la literatura. Pero, con todo y la gran inspiración del autor, hay un ilustre personaje cuya trascendencia real quizá hasta superó la fantasía: el astuto cardenal Richelieu. Siempre me ha fascinado el papel del poderoso hombre detrás del trono de Luis XIII, aquel que realmente movía los hilos del reino.

Cosa curiosa, Richelieu no era el único poder detrás del trono; había otro personaje actuando de forma equivalente sobre él. Aunque casi pasa desapercibido, si ponemos atención en el relato podemos identificar al hombre con una gran influencia política sobre el mismísimo cardenal; era «la eminencia gris», el Padre José. También él fue un hombre de carne y hueso; respondía al nombre de François Leclerc du Tremblay, un sacerdote capuchino que antes de ser la mano derecha del cardenal Richelieu ya había sido consejero de María de Médicis (Reina de Francia, madre de Luis XIII).

Contrario a lo que podría sugerir el sobrenombre de «eminencia», el Padre José nunca llegó a cardenal, y ni falta le hizo; aun sin el capelo, llegó a tener un poder enorme. Su impacto histórico fue tal que desde entonces se usa el término de «eminencia gris» para designar a los asesores de gobernantes cuyo poder se manifiesta por debajo del agua, sin ser notados.

Y mis buenos lectores dirán: «Toda esta historia de mosqueteros y eminencias está muy bonita pero, ¿qué diantres tiene que ver con la ciencia del átomo? ¿Los mosqueteros hacían experimentos? ¿Richelieu financió a los científicos de la época? ¿El Padre José tenía ideas cuánticas? ¿Alguno de estos célebres franceses tenía parentesco con Pierre Curie, Paul Langevin o Louis de Broglie?»

Bueno, en realidad la relación no es tan directa. Traje este relato a colación para llegar al personaje central de nuestro capítulo; una eminencia gris de la ciencia que

realizó un aporte colosal, solo comparable en dimensiones a la oscuridad que tiene su nombre para el público. No es que nuestro personaje quisiera pasar desapercibido de forma premeditada; pero se notó muy poco, en parte por su carácter reservado y en parte porque el protagonismo de muchos de sus colegas lo opacaba. Sin embargo, su descubrimiento del neutrón cambió por completo la historia de la humanidad: abrió la puerta para la creación de la bomba atómica y para la producción de electricidad a partir de energía nuclear.

¿Saben ustedes el nombre de la persona que descubrió el neutrón? ¿Sí? Felicidades, tienen una cultura científica envidiable. Pero no se preocupen en caso de que su respuesta sea negativa, no están solos, a muchos nos ha ocurrido lo mismo. Yo pasé por la secundaria, preparatoria y toda la universidad sin tener la menor idea del artífice de este hallazgo; lo averigüé cuando ya trabajaba en el Museo de Ciencias y eso porque me di a la tarea específica de encontrarlo. La eminencia gris del núcleo atómico fue James Chadwick.

Este hombre fue el responsable de mover los hilos en el laboratorio Cavendish durante gran parte de la administración de Rutherford; era su mano derecha. Precisamente, al descubrir el neutrón, Chadwick amarró algunos de los más importantes cabos sueltos en el trabajo científico del legendario neozelandés, sobre todo para explicar el problema de la estabilidad de un diminuto núcleo hecho de partículas con carga eléctrica positiva. Fue un aporte de gran importancia para la ciencia; cuando me enteré de él, resultó especialmente trascendente para mí, pues resolvió uno de los conflictos lógicos que había atormentado mi mente adolescente por un buen tiempo.

A los 13 años, la aparente paradoja del núcleo me inquietaba sobremanera. Yo no creía que pudiera ser cierto que todos los protones del átomo estuvieran

amontonados en un espacio pequeñísimo. La maestra de ciencias naturales de la secundaria nos explicó una y otra vez la estructura atómica —con el modelo de sistema solar— pero, por más vueltas que le daba, no me cabía en la cabeza ese acomodo. Yo era un chiquillo, sabía muy poco de la vida y de la ciencia, pero tenía las nociones suficientes para darme cuenta de que algo no cuadraba.

Veamos: si bien el átomo es eléctricamente neutro, tiene en su interior el mismo número de partículas con carga negativa (electrones) y positiva (protones). Hasta ahí todo va bien, se equilibran a las mil maravillas, pero luego la cosa se complica; uno pensaría que las cargas diferentes los harían atraerse eléctricamente para estar juntos; pero no, no podía ser tan sencillo: las partículas con carga positiva están concentradas en un núcleo diminuto —con un diámetro 10,000 veces menor al del átomo— mientras los electrones se distribuyen en niveles de energía a su alrededor.

Aquí estaba el problema. Las cargas iguales se rechazan: tener muchos protones en un lugar tan pequeño como el núcleo generaría una enorme fuerza de repulsión; a raíz de esta fuerza, las partículas positivas no podrían mantenerse juntas y el núcleo atómico acabaría por desintegrarse.

Vayamos a algunos ejemplos. El caso del hidrógeno no tiene problema, pues su núcleo está hecho solamente de un protón que no podría rechazarse a sí mismo. Sin embargo el resto de los elementos, en menor o mayor medida, enfrentarían una situación que a primera vista parece insostenible. El Helio tiene dos protones, el litio cuenta con tres, el carbono con seis y el número sigue aumentando hasta llegar a elementos pesados, como el plomo, con 82 partículas positivas; en casos así, debe haber fuerzas enormes empujando el núcleo hacia la división. Ya ni que decir del radio, con 88 protones, o del uranio, con 92.

A propósito de esta duda, así como del problema de disparidad entre el número atómico y la masa atómica,² Ernest Rutherford elaboró una primera propuesta medio sacada de la manga en 1919. Según su idea, debería haber más protones en el núcleo que los que señala el número atómico para justificar la masa, así como electrones extra para mantener el equilibrio de carga. En esta primera hipótesis, la presencia de partículas negativas y positivas dentro del núcleo ofrecería una fuerza de atracción, ayudando a mantenerlo unido.

Era una idea sostenida con alfileres; el número de los hipotéticos electrones dentro del núcleo siempre era menor al de los protones totales; debido a la desventaja numérica, la fuerza atractiva sería menor a la repulsiva y el meollo acabaría por romperse. Hacía falta descubrir algo completamente nuevo para poder explicar satisfactoriamente el comportamiento del núcleo.

El propio Ernest —por ahí de 1920— postuló la existencia de una partícula neutra que ayudaría a resolver los problemas de la estabilidad del núcleo y de la masa atómica: el neutrón. Sin embargo, como consecuencia de sus múltiples compromisos sociales, institucionales y científicos, simplemente no tuvo tiempo para dedicarse de lleno a la búsqueda del neutrón; afortunadamente —gracias a su gran trabajo como maestro y líder de investigación— no hizo mucha falta que se comprometiera con el tema.

2. En la tabla periódica se usa la masa del hidrógeno, el elemento más ligero, como la unidad de referencia para expresar la masa de cualquier átomo. Ya vimos en el quinto capítulo que la cantidad de protones o electrones en los átomos de los elementos en la tabla periódica (número atómico) aumenta de uno en uno; sin embargo, la masa total del átomo crece de forma desproporcionada y aparentemente arbitraria. Veamos algunos casos de número atómico, el primer número, y masa atómica promedio (en los paréntesis): 1. hidrógeno (1), 2. helio (4), 3 litio (7), 4. berilio (9), 5. boro (11), 6. carbono (12), 7. nitrógeno (14), 8. oxígeno (16)... 47. plata (108)... 80. mercurio (200)... 88. radio (226)... 92. uranio (238). No parece haber una tendencia lógica en la distribución.

¿Cómo está eso? Bueno, pues para qué molestarse en descubrir todo él mismo, si podía formar pupilos capaces de hacerse cargo de los «pendientes» de su trabajo. Así como en su momento Bohr encontró y ayudó a resolver las primeras inconsistencias teóricas de su modelo atómico, otro alumno llegó a encontrar la clave del problema de la estabilidad nuclear: el ya mencionado James Chadwick.

Chadwick fue estudiante de Rutherford y, con el tiempo, se convirtió en su más importante colaborador. Desde que el neozelandés planteó por vez primera la idea del neutrón, a James se le metió en la cabeza que debería de existir, y no descansó hasta encontrarlo. Sin embargo, ésta no fue una tarea sencilla; le llevó más de diez años, pues la falta de carga eléctrica dificultaba considerablemente su detección. Tuvo muchos fracasos en la búsqueda de esta partícula, e incluso sus propios alumnos llegaron a agarrarlo de botana, diciendo que el hecho de que no se vieran trayectorias de partículas en el aparato detector era prueba de que el «pocotrón»³ había pasado por ahí.

Pero las mofas y los intentos fallidos nunca afectaron la determinación de este hombre; estaba preparado para aguantar eso y más: era el segundo de a bordo en el laboratorio Cavendish, el principal centro experimental del mundo en ese momento, y su camino hasta ahí no fue nada sencillo; tenía un gran trecho recorrido que lo había preparado para el gran hallazgo que habría de realizar.

James nació en 1891, en el poblado rural de Bollington, Inglaterra, en el seno de una familia de escasos recursos. Cuando James tenía diez años, los Chadwick se mudaron a Manchester con la esperanza de encontrar mejores oportunidades; el padre intentó establecer una lavandería pero fracasó en su empresa, así que debió conformarse con empleos de poca remuneración para intentar mantener a los suyos en la nueva ciudad.

3. El original en inglés era *Fentron*, que rima mucho mejor con neutrón.

Desde niño, James se caracterizó por su timidez; me atrevería a decir que fue aún más retraído que Paul Dirac, si eso fuera posible. Su desempeño escolar siempre fue sobresaliente y gracias a esto consiguió becas que le permitieron seguir estudiando aun cuando su familia no tenía los recursos para apoyarlo en una carrera académica. Cuando llegó el momento de entrar a la universidad, James estaba convencido de estudiar matemáticas, pero el destino tenía otra cosa planeada para él.

Las entrevistas para entrar a la Universidad de Manchester se llevaron a cabo en un gran salón dividido en secciones de bancas. Las secciones de física y matemáticas estaban muy cerca una de la otra y el joven Chadwick se sentó en el lugar equivocado. Era tan tímido que le dio vergüenza decir que la había regado; finalmente —inspirado por el entusiasmo y carisma de la persona que lo entrevistó— decidió quedarse en la escuela de física.

Coincidió que, precisamente el mismo año del ingreso de James, la Universidad de Manchester contrató a Ernest Rutherford para hacerse cargo de la cátedra de física y su excelente laboratorio. Cuando Chadwick cursó el segundo año, le tocaron clases con el nuevo maestro y quedó cautivado por las demostraciones experimentales que realizaba en el aula. Encontró en ellas una física apasionante, muy diferente a la visión teórica que había visto en la escuela hasta entonces, y acabó de enamorarse de esta área de la ciencia.

Rutherford tenía la política de involucrar cuanto antes a sus pupilos en la investigación de vanguardia. Aunque esto significó dejar grandes huecos en la formación de muchos estudiantes —sobre todo en temas de física clásica— nadie se quejaba; les estaban dando la oportunidad de indagar en la frontera del conocimiento, trabajando hombro con hombro con un científico que acababa de ganar el Nobel y que ya era toda una leyenda. Chadwick

tenía solo 19 años cuando el profesor le asignó la tarea de realizar un arreglo experimental para comparar el grado de emisión de rayos gama con los de emisiones alfa y beta en diferentes materiales.

El joven vio una falla en el esquema que originalmente le planteó Rutherford, pero no se atrevió a señalarla porque se sentía intimidado por su maestro; le tenía miedo. Pronto, el mismo profesor se dio cuenta del problema y pareció decepcionarse porque el alumno no lo había detectado. James se sacó la espina al terminar con éxito la tarea solicitada en un tiempo bastante razonable, recuperando un poco la estima de su maestro. Tiempo después, el método de balanceo —así le llamaron al trabajo de Chadwick— sirvió para comparar diferentes materiales cuando se estableció el primer estándar internacional de radiactividad (aquel que definió Marie Curie por sus calzones). Nada mal para ser el primer trabajo científico del joven James.

Chadwick se graduó con honores en 1911, pero para complementar su habilitación debía entregar un trabajo escrito y realizar un examen práctico. La primera parte no le causó el menor problema; sin embargo, el terror lo atacó cuando se dio cuenta de que el legendario J. J. Thomson sería su sinodal en el aspecto experimental; se hizo un manojo de nervios y no pudo terminar nada de lo que se le había pedido. Para su fortuna, Thomson y Rutherford fueron muy comprensivos, así que con base en sus excelentes antecedentes logró obtener su licenciatura en física. Al poco tiempo ya trabajaba como investigador de posgrado en el mismo laboratorio de Manchester, colaborando con hombres de la talla de Hans Geiger, Ernest Marsden y Harry Moseley. Los dos primeros fueron los encargados de realizar el experimento que condujo al descubrimiento del núcleo atómico; Moseley, por su parte, destacó por su uso de rayos X para estudiar la estructura del átomo.

Gracias a la fama internacional del director del laboratorio de física, Manchester era un verdadero imán de jóvenes promesas científicas en esa época. En 1912, Niels Bohr llegó procedente de Cambridge y trabajó por varios meses en el mismo laboratorio que Chadwick. A pesar de la barrera del lenguaje, los jóvenes llegaron a entenderse muy bien e iniciaron una amistad que duraría varias décadas.

Por otra parte, las investigaciones de James dieron lugar a varios artículos publicados en revistas reconocidas, y su prestigio iba en ascenso. Desafortunadamente, el prestigio no se puede comer ni tiene valor económico; Chadwick no contaba con muchos recursos para mantenerse mientras seguía estudiando. Solicitó una beca de la «Exhibición Mundial de 1851» —la misma que aprovechó Rutherford para ir de Nueva Zelanda al Cavendish— y le fue otorgada, pero con una condición: no podía seguir en Manchester. El objetivo del apoyo era que realizara investigación en una institución diferente a la que lo había propuesto; pese a todos los esfuerzos de don Ernest para retenerlo, se tuvo que ir a Alemania para trabajar con Hans Geiger (quien acababa de regresar a su país luego de su estancia en Manchester).

James todavía era un joven tímido e ingenuo cuando —a los 22 años— se dirigió a Berlín. Ahí Geiger lo trató lo mejor que pudo, apoyando sus investigaciones y dándolo a conocer en «sociedad»: lo presentó con grandes científicos locales, como Otto Hahn, Lise Meitner (quien era algo así como la Madame Curie alemana) y, por supuesto, Albert Einstein, a quien James tuvo el orgullo de presumir sus principales hallazgos en los primeros seis meses de estancia en el Instituto Reichsanstalt. Chadwick había encontrado que el espectro de energía de los electrones lanzados por un material radiactivo — las emisiones beta— es continuo; las partículas pueden tomar cualquier valor de energía dentro de un rango de

emisiones. Esto chocaba con los valores discretos y bien determinados que se esperaban, pues eran los tipos de resultados que presentaban las emisiones alfa y los rayos gama. Einstein se quedó pasmado con los hallazgos de este chicuelo y ahí mismo afirmó que no era capaz de explicar esos resultados; de hecho, nadie podría hacerlo en los siguientes 19 años.

En agosto de 1914, la agradable estancia de investigación de Chadwick se vio abruptamente afectada con el inicio de la Primera Guerra Mundial; la guerra lo sorprendió justo en territorio enemigo, eso sí que es mala pata. Inicialmente, gracias al apoyo de sus colegas en el instituto, logró evitar las situaciones peligrosas y no hubo gran problema. Todo cambió un día en que, mientras leía el periódico en la calle con un amigo, lo acusaron —sin fundamento— de criticar al Kaiser y fue encarcelado. Estuvo 10 días en prisión, viviendo a base de pan mohoso y café, hasta que el jefe del Instituto Reichsanstalt intervino a su favor para conseguir liberarlo.

Regresó al trabajo pero, al poco tiempo, el gobierno mandó arrestar a todos los ciudadanos ingleses bajo sospecha de ser posibles agentes enemigos. Lo encerraron en los establos del hipódromo junto a un ecléctico grupo de paisanos: tenían cautivos a marinos mercantes, empresarios, artistas y académicos. La comida ahí era terrible, les daban una especie de salchichas de guerra —hechas a base de pan viejo, sangre y grasa— que le dejaron problemas estomacales durante el resto de su vida. El hospedaje tampoco era mucho mejor, dormían 10 personas en un establo para tres caballos; en invierno, el frío era horroroso (a diario despertaba con los pies congelados), mientras que en verano debían aguantar un calor abrazador.

Para distraerse de esta complicada situación, Chadwick acudió a su lado ñoño y se dedicó a dar conferencias de electricidad, magnetismo y radiactividad a los demás

internos. Además, para su beneplácito, la reclusión no detuvo su espíritu científico; le permitían recibir envíos de su familia en Inglaterra y sus amigos del Instituto. Geiger se las arregló para entregarle algo de equipo de laboratorio y usó pasta de dientes con torio⁴ como fuente radiactiva para seguir realizando experimentos. Aun en las condiciones en que se encontraba siempre buscó hacer investigaciones inéditas; se mantenía en comunicación constante con Rutherford, informándole de todos sus avances y recibiendo noticias de los descubrimientos científicos más relevantes.

James fue liberado en noviembre de 1918, una vez que terminó la guerra. Volvió a casa de sus padres a Manchester e inmediatamente elaboró un reporte para el comité que le había dado la beca, detallando todos los experimentos que había realizado durante su cautiverio; tenía la esperanza de que le acabaran de dar la parte de la beca que no pudieron enviarle por la guerra. No hubo suerte.

Sin embargo, en la Universidad encontró mejor fortuna. Rutherford lo recibió de regreso en el laboratorio con los brazos abiertos, e incluso le consiguió un trabajo de medio tiempo como su asistente. En este puesto, se dedicó a realizar experimentos para demostrar que la carga eléctrica del núcleo corresponde perfectamente con el número atómico, lo que corroboraba que el puesto que ocupa cada elemento en la tabla periódica indica también la cantidad de protones en el núcleo, así como los electrones a su alrededor.

No duró mucho tiempo en ese cargo, pues en abril de 1919 se presentó un cambio importante en la escena científica inglesa. J. J. Thomson dejó la dirección del Cavendish para asumir funciones como Rector de la Universidad de

4. Entonces la vendían con la promesa de una sonrisa radiante. Era la etapa en que aún no había mucha conciencia de los peligros que implicaban los materiales radiactivos y todo el mundo creía que eran panaceas maravillosas.

Cambridge; Rutherford fue designado como su sucesor y, antes de mudarse, le pidió a Chadwick que lo acompañara en esta nueva empresa. James aceptó de buena gana; juntos lograrían establecer a Cambridge como el lugar más importante de la época en cuanto al estudio de la estructura del núcleo atómico. Recibieron cierta competencia de Lise Meitner y Otto Hahn en Berlín, así como de Irène y Frederic Joliot–Curie en París, pero sin duda estaban en la cresta de la ola.

Al poco tiempo de establecerse en el laboratorio Cavendish, James realizó una serie de experimentos con la idea de medir las fuerzas a las que se sujetaban las partículas alfa cuando se acercaban mucho a núcleos de hidrógeno. Si la distancia era en verdad pequeña —cercana al tamaño del mismo núcleo, unos 10^{-14} metros— no se presentaba la desviación esperada como consecuencia de la repulsión, sino que parecía existir una fuerza atractiva de gran intensidad pero de muy corto alcance; esta fuerza bien podía ser la responsable de mantener unido el núcleo, pero en ese momento no se contaba con nada que pudiera sugerir de qué se trataba, de dónde salía o cómo funcionaba. Aún así, en un trabajo publicado al respecto en 1921, Chadwick dio inicio a la discusión sobre la posible existencia de una interacción nuclear fuerte.

Mientras el prestigio y los honores académicos de Rutherford iban en ascenso —con la correspondiente carga de compromisos— fue creciendo el rol de James como segundo de a bordo y jefe administrativo del laboratorio, la cual no era una tarea pequeña, sobre todo por el alud de estudiantes doctorales que recibían año con año. Por si esto fuera poco, se convirtió en el control de calidad del Cavendish: antes de publicar un artículo, los estudiantes debían someterlo a la revisión de Chadwick. Esto fue de gran ayuda para muchos investigadores, pues las sugerencias y aportes directos de James ayudaron a

mejorar un gran número de trabajos. Su impacto fue tal que, en muchos casos, cuando los jóvenes científicos se iban a trabajar a otras universidades, la calidad de su trabajo era considerablemente menor a la obtenida bajo la supervisión de la eminencia gris.

A James no le molestaba realizar tanto trabajo. Aunque realmente cargaba con mucha responsabilidad y acababa exhausto después de cada jornada, no estaba sacrificando en lo más mínimo su vida social o familiar, porque no tenía, todo giraba alrededor del laboratorio. Sus padres seguían viviendo en Manchester y desde su traslado a Cambridge casi no mantuvo contacto con ellos. En cuanto a la posible distracción de relaciones con damas, la cosa era peor, pues desde su graduación de la preparatoria este hombre prácticamente no había tenido interacción con el sexo opuesto. Estuvo aislado de este tipo de oportunidades hasta que las cosas cambiaron de forma radical.

Corría el año 1925 cuando le presentaron a Aileen Stewart–Brown, una vivaz chica que tuvo un efecto monumental en el hombre previamente seco y abstraído. Se enamoró como un loco al poco tiempo de conocerla y, prueba de que los opuestos se atraen, la chica carismática y sociable parecía disfrutar de su compañía. Pronto formaron una buena relación a pesar de todas sus grandes diferencias de origen y carácter; ya vimos que James era de ascendencia humilde y naturaleza reservada, mientras que Aileen venía de una distinguida familia de Liverpool —era hija de un corredor de bolsa— y tenía un carácter alegre, extrovertido y de mucha confianza que supo usar para alentar al tímido científico a conquistarla. El apoyo de verdad fue útil; ese mismo año se casaron y 18 meses más tarde recibieron a sus únicas hijas, las gemelas Judy y Joanna. A partir de ahí, aunque nunca fue un hombre realmente hogareño, James siempre supo darse el tiempo para disfrutar a su familia.

Con todo y los nuevos compromisos personales, Chadwick siguió siendo muy productivo; con frecuencia realizaba aportes importantes, tanto en sus propias investigaciones como en los proyectos de sus alumnos. Sin embargo, en términos científicos, siempre había algo más importante en su mente, esa gran meta de la que no podía desprenderse: la búsqueda del neutrón. En época de clases, a Chadwick le resultaba muy difícil dedicarse por entero a la búsqueda de esta partícula; eran tantas sus labores administrativas y de asesoría de estudiantes, que su única oportunidad para avanzar significativamente en su investigación era trabajar cuando no había estudiantes en el laboratorio; es decir, debía violar la regla de Rutherford de no trabajar después de las 6 de la tarde, o hacer sus experimentos en vacaciones.

James había empezado a trabajar con la división de berilio —elemento con una masa atómica de 9— a inicios de la década de 1930, tenía la esperanza de encontrarse cerca de un hallazgo importante. Esperaba que, al ser bombardeados, los átomos se dividirían en dos partículas alfa (núcleos de helio) y un neutrón. Los primeros experimentos fueron muy alentadores al detectar una emisión más penetrante que cualquiera de las conocidas hasta ese momento. Sin embargo, más adelante, en un experimento complementario orientado a corroborar la existencia del neutrón, no se obtuvieron resultados satisfactorios. En parte, esta falla se presentó porque —muy a su pesar— Chadwick dejó el trabajo en manos de unos estudiantes doctorales que no supieron realizar el experimento de forma totalmente adecuada. ¿Y por qué les dejó la responsabilidad a ellos, si él hubiera podido hacerlo mucho mejor? Bueno, antes de saber lo cerca que estaría de su ansiado descubrimiento, le había prometido a su esposa e hijas que las llevaría de vacaciones, y no se podía a echar para atrás; primero cumplió con su familia.

Afortunadamente, la oportunidad no se le fue del todo; poco tiempo después, en enero de 1932, James recibió una copia de la edición más reciente de la revista francesa *Comptes rendus*, en la cual Irène y Frédéric Joliot–Curie publicaron los resultados de sus propias investigaciones en la división del berilio. Usaron polonio como fuente radiactiva para dividir átomos del cuarto elemento de la tabla periódica e hicieron pasar la radiación generada por la división a través de cera de parafina. Se llevaron una gran sorpresa al ver que la intensidad de los rayos resultantes del proceso aumentó conforme pasaban por la cera; las emisiones del berilio le estaban sacando protones a la parafina. Los Joliot–Curie supusieron que esto se debía a la emisión de rayos gama de muy alta energía, mucho mayor a cualquiera detectada hasta entonces. Dejaron ir viva la liebre.

En realidad la explicación del equipo francés era mucho brinco estando el suelo tan parejo. ¿Para qué manejar rayos que no se esperaban y que nunca se habían detectado, si podías explicar las cosas de manera más sencilla? Chadwick creía que una partícula con masa grande, como la que debía tener el neutrón, necesitaría relativamente poca energía para sacar los protones de la cera; la idea parecía buena, pero con eso no bastaba, había que demostrarla experimentalmente. Tenía frente a él una pequeña ventana de oportunidad para cubrirse con la gloria de descubrir el neutrón, así que debía obtener resultados rápido; dejó de lado todas sus otras responsabilidades y trabajó día y noche en el laboratorio durante tres semanas. Extendió los resultados de los Joliot–Curie y logró sacarle protones a los átomos de diferentes elementos: hidrógeno, helio, berilio, carbón, nitrógeno y argón. Así, comprobó la existencia del neutrón y, tan solo un mes después de leer el trabajo de los franceses, envió dos cartas para dar a conocer sus hallazgos; una estaba dirigida a

la revista *Nature*, con una nota titulada «Posible existencia de un neutrón»; la otra viajó a Copenhague para comunicarle sus conclusiones a Bohr.

El resto fue mero trámite para consagrar a Chadwick como uno de los grandes científicos de la historia: había descubierto la partícula que tanto buscaba, carente de carga eléctrica y con una masa prácticamente igual a la del protón. Pronto el neutrón se estableció como una herramienta fundamental para el estudio de la estructura atómica. Hasta entonces, los bombardeos nucleares se realizaban con partículas alfa o protones, en ambos casos con carga eléctrica positiva; se necesitaba de grandes energías para lograr colisiones con núcleos, pues debían vencer la fuerza de repulsión eléctrica. El neutrón no experimentaba este rechazo, por lo que podría ayudar a alterar los núcleos con más facilidad.

Gracias a James, el Cavendish volvía a colocarse en la cima del mundo científico, pero los logros de 1932 no se quedaron ahí. Tan solo unos meses después del descubrimiento del neutrón, John Cockcroft y Ernest Walton se convirtieron en los primeros seres humanos en desintegrar núcleos de forma completamente artificial; lanzaron protones a gran velocidad contra átomos de litio y lograron fisiónarlos, gracias a una maravilla tecnológica en que venían trabajando desde 4 años atrás. Tenían un acelerador de partículas de gran poder para la época, capaz de acumular un potencial eléctrico de hasta 600,000 volts para lanzar protones contra átomos.

Aunque su acelerador sirvió para obtener un gran logro, no era el más poderoso de su tiempo; ese honor le pertenecía al ciclotrón, diseñado y operado por Ernest Lawrence en la Universidad de California, en Berkeley. El dispositivo aceleraba partículas cargadas usando campos eléctricos y magnéticos en una trayectoria espiral; al dar vueltas, se podían alcanzar energías mucho mayores a las

del acelerador lineal de Cambridge. Ya se habían realizado numerosos experimentos con el ciclotrón para 1932 pero, a pesar de contar con el poder necesario, no hicieron ningún experimento orientado a la división artificial de núcleos. En cuanto Lawrence se enteró del logro de Cockcroft y Walton, ordenó la réplica del experimento, pero ya era tarde, le habían comido el mandado. Su equipo tenía un gran instrumento pero, al menos inicialmente, no supieron aprovecharlo.

Actualmente, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) es el último heredero de la tradición de aceleradores de partículas iniciada en Cavendish y Berkeley; se encuentra en la frontera entre Suiza y Francia y le pertenece a la Organización Europea para la Investigación Nuclear. El LHC cuenta con las condiciones para —trabajando a tope— acelerar partículas con energías de hasta 7 Tera electronvolts, es decir 7×10^{12} eV (7'000,000'000,000 eV).

¿Y qué es eso de un electronvolt (eV)? Se trata de la energía que adquiere un electrón al pasar por una diferencia de potencial de un volt; es la unidad más usada en los aceleradores de partículas y también sirve como referencia de masa para los componentes del mundo subatómico. Puesto que la masa de ese tipo de partículas es exageradamente pequeña, no resultaría muy práctico el uso del gramo como unidad. Había que encontrar algo más adecuado; es así que los físicos de partículas adoptaron los electronvolts como unidades de masa en una aplicación de la equivalencia entre materia y energía planteada por Einstein.

Bueno, el caso es que, aunque comparados con el LHC, los primeros aceleradores casi parecen juguetes, en su momento fueron un parte aguas, ya que ofrecieron las condiciones para realizar grandes hazañas en la física de partículas. Varias de estas proezas iniciaron en el Cavendish,

aunque no se quedaron ahí; casi de inmediato provocaron importantes reacciones en la comunidad de los físicos.

Bohr fue de los primeros científicos en enterarse de ambos logros —el descubrimiento del neutrón y la desintegración artificial de elementos— gracias a la información de primera mano que recibió del puño y letra de Chadwick y Rutherford, pero Niels no se quedó la información para él solo; en ese entonces, el danés seguía en estrecha comunicación con Werner Heisenberg y juntos empezaron a discutir diferentes problemas asociados con la existencia del neutrón.

Heisenberg empezó a trabajar para aplicar los efectos de la mecánica cuántica al modelo de núcleo hecho de protones y neutrones. Pero eso fue poca cosa comparado con lo que propondría después: se le ocurrió que las dos partículas serían manifestaciones diferentes de una misma cosa, a la cual llamó nucleón. De acuerdo con esta idea, los protones y neutrones serían idénticos en todos los sentidos, excepto en la carga eléctrica (positiva para unos y neutra para los otros); Werner se inventó una nueva propiedad encargada de marcar la diferencia: más tarde la llamarían «*isospin*» (*spin* isotópico). El científico alemán tenía bien claro que entre todos los nucleones existiría una fuerza de atracción con gran intensidad en distancias muy pequeñas, independientemente de si se trataba de protones o neutrones; esta era la misma que Chadwick vislumbrara de forma borrosa poco más de diez años antes, la cual luego sería conocida como «la interacción fuerte», la gran fuerza que mantiene unido el núcleo.

Mientras tanto, James intentaba justificar la idea del neutrón como partícula fundamental; es decir, buscaba establecer que no podría estar hecho de alguna otra cosa. En este sentido, el descubrimiento del positrón planteó a Chadwick una posibilidad sumamente seductora: el protón podría estar hecho de un neutrón y un positrón.

La idea no prosperó mucho porque había otra cara en la moneda: existen procesos en que un neutrón decae en un protón y un electrón. Podría ser que las partículas en cuestión estuvieran hechas unas de otras sin que ninguna fuera realmente elemental; o bien, los científicos tenían entre manos una contradicción apuntando la existencia de componentes más pequeños en los nucleones.⁵

Justo entonces empezaron los preparativos para la Séptima Conferencia Solvay; se realizaría en octubre de 1933, en Bruselas, Bélgica (como siempre). Así como el evento de 1927 fue clave para el desarrollo de la física cuántica, esta nueva edición se convirtió en la gran cumbre mundial de la física nuclear. La conferencia fue organizada por Einstein y Bohr, quienes prepararon un cartel de primerísima línea; participaron, entre otros, Chadwick, Rutherford, Madame Curie, los Joliot–Curie, Enrico Fermi, John Cockcroft, Dirac, Pauli, Heisenberg y Schrödinger.

Chadwick realizó una presentación y en ella anunció con bombo y platillo el descubrimiento del neutrón, aunque para entonces ya todos los asistentes estaban al tanto del hallazgo; también mencionó la posible existencia de una fuerza atractiva de gran intensidad que solo estaría presente a una gran cercanía del núcleo (o sea, la ya mencionada interacción fuerte). Para completar una faena redonda, cerró discutiendo la posible existencia de los niveles de energía en el núcleo, idea que fue adoptada con entusiasmo por los físicos cuánticos.⁶

A propósito de cuantización, en las discusiones salió a relucir el problema del espectro continuo de emisión de

5. De cualquier forma, la conclusión sería fascinante, pero —como veremos en el siguiente capítulo— fue hasta la década de 1960 cuando se resolvió esta situación.

6. Años más tarde, el físico mexicano Marcos Moshinsky realizó importantes aportes a la teoría de niveles en el núcleo. Moshinsky fue graduado de física por la UNAM, pero hizo su doctorado en Princeton bajo la supervisión de Eugene Wigner, el cuñado de Paul Dirac.

partículas beta, ese primer gran aporte experimental con que Chadwick apantalló a Einstein durante su estancia en Alemania en 1914. Aunque habían pasado 19 años desde su hallazgo, este fenómeno seguía sin tener una explicación satisfactoria. El comportamiento de los electrones lanzados chocaba por completo con la teoría cuántica; si los núcleos tenían niveles de energía, las emisiones beta deberían estar sujetas a cuantización, pero en vez de que su energía cambiara a saltos lo hacía de forma continua. Esto amenazaba conceptos importantes, como el de la conservación de la energía o el de la generalidad de la cuantización, a menos que alguien pudiera poner un buen parche.

Nuestro viejo amigo Wolfgang Pauli venía trabajando en una solución para el problema desde dos años antes y la dio a conocer en la misma Conferencia Solvay. Según él, debía existir una partícula neutra muy penetrante que aún no habría sido detectada; esta sería la responsable de la diferencia de energías. Originalmente Pauli quería bautizarla como neutrón pero, como el nombre ya estaba ocupado, Fermi propuso llamarla neutrino (en italiano, pequeño neutral, o neutroncito) para evitar confusiones.

Ese mismo año, el propio Enrico Fermi, en la Universidad de Roma, desarrolló una teoría para el polémico decaimiento beta, proceso en que los núcleos emiten electrones o positrones. Don Enrico sugirió que un neutrón podría decaer en un protón y un electrón, emitiendo un antineutrino. De forma parecida se explicaría cómo un protón podría decaer en neutrón, positrón y neutrino. Pero nada de esto podía funcionar por arte de magia, alguien tenía que ser responsable de estos cambios, así que para dar coherencia al asunto se sugirió la existencia de una «interacción nuclear débil».⁷

7. Su nombre viene del hecho de que su fuerza es mucho menor a la de la interacción fuerte o la electromagnética, aunque su acción es 10^{25} veces más poderosa que la de la gravedad.

Todo sonaba muy bien, incluso la aparición de una nueva fuerza; sin embargo, aún no pasaba de ser un parche muy bien acomodado para hacer funcionar las cosas. Para darle verdadera credibilidad a la propuesta, primero debía demostrarse la existencia del neutrino. Recordemos que no importa la belleza o elegancia de una teoría; si los experimentos no la respaldan, no sirve para nada.

El neutrino era una partícula hipotética muy útil para cuadrar los números, pero no había aparecido en ningún experimento; no era nada sencillo encontrar la condescrita partícula sin carga eléctrica y con una masa prácticamente nula. Siempre que los científicos detectan una partícula es mediante su interacción con otras cosas, así que la única forma de encontrar el neutrino tendría que venir de la misma interacción débil, aunque no estaba muy claro cómo hacerlo. La solución a este problema requirió de varias décadas, millones y millones de dólares de inversión y gran astucia por parte de los investigadores. Más adelante volveremos a este tema, pero por ahora sigamos con nuestro relato.

A mediados de 1935, Chadwick recibió una jugosa oferta de la Universidad de Liverpool; se le presentaba la oportunidad de tener su propia cátedra de física y salir de la sombra de Rutherford. Ante esto, la única persona más feliz que James era su esposa Aileen, quien regresaría a su ciudad natal —donde aún vivía su familia— como la esposa de un gran profesor. Aunque a Thomson (como rector de la Universidad de Cambridge) y a Rutherford (como director del laboratorio Cavendish) no les hizo gracia perder a un científico tan valioso, siempre le mostraron su apoyo a Chadwick en esta gran oportunidad y se «despidieron» de él en términos muy cordiales.

Poco antes de mudarse, un alumno suyo —Maurice Goldhaber— encontró algo muy curioso: los neutrones libres —es decir, aquellos afuera de un núcleo— no son

estables; después de quince minutos acaban por decaer en un protón y un electrón (ah, y en un neutrino, suponiendo que existieran, claro). Al discutir el asunto, Chadwick y Goldhaber llegaron a la sorprendente conclusión de que una partícula supuestamente fundamental podía tener vida media; como sucedía con los inestables átomos radiactivos. Las señales de algo nuevo, escondido en el núcleo, seguían apareciendo.

En el mes de noviembre, ya instalado en Liverpool, James recibió una noticia que coronó un gran año para él y que sería de gran trascendencia para su carrera científica: había ganado el Premio Nobel de Física. Diantre; ahora sí que se cargó el payaso la idea de la eminencia gris. Ya tenía su propio departamento de física, y estaría adornado con la medalla del Nobel. De todo el mundo llegaron cartas felicitándolo, e incluso señalando que debería haberlo ganado antes. Para acabar de celebrar —y aprovechando el gran respaldo económico que le ofrecía su nueva Universidad—, Chadwick cerró 1935 con el arranque del trabajo para construir su propio ciclotrón en Liverpool.

Así como James no paraba, el resto del mundo científico seguía trabajando a todo vapor y realizando hallazgos realmente sobresalientes. A inicios de 1936, Carl David Anderson, el mismo hombre que descubrió el positrón, descubrió una partícula completamente nueva con carga negativa y una masa intermedia entre la del electrón y la del protón. La masa prácticamente coincidía con la de los mesones,⁸ que eran una predicción teórica hecha por el físico japonés Hideki Yukawa; este tipo de corpúsculos serían los agentes de la interacción fuerte, los encargados de formar un enlace entre protones y neutrones. Así, inicialmente la nueva partícula fue conocida como el mesón μ —se lee mu—, pero más adelante se descubrió que no

8. «Mesón» viene del griego «*mesos*», que significa medio, nombre que surge de la masa esperada para esas partículas.

se ven afectados por la interacción fuerte y que en realidad no tenían nada que ver con las partículas de Yukawa;⁹ ahora se le conoce como muón, y sabemos que es una versión «gorda» del electrón, es decir, con más masa.

En Roma, Fermi y su grupo de trabajo lograron dividir núcleos atómicos al usar neutrones como proyectiles y produjeron 40 nuevos elementos radiactivos. ¡Guau! Eso es trabajo y no fregaderas; cuando Enrico Fermi se proponía obtener algo bueno realmente lo conseguía. Estos logros lo hicieron acreedor al Nobel de Física de 1938, el cual se vio obligado a «celebrar» abandonando su país, ya que su esposa Laura era judía y las condiciones del régimen fascista de Benito Mussolini en Italia los hicieron viajar de Suecia (donde se entrega el Premio) a Estados Unidos. Jamás volvieron a vivir en Europa.

Y es que la situación no era para menos: el poder en Italia y Alemania estaba en manos de regímenes fatalmente intolerantes contra lo no ario (en donde entraban un gran número de judíos); la situación era insufrible para muchos; otros que intentaron aguantar pronto se vieron desterrados o incluso reclusos. El éxodo de académicos en Alemania adquirió dimensiones colosales: encabezados por Albert Einstein, muchos científicos huyeron de la represión del régimen nazi. Hombres como Wolfgang Pauli, Eugene Wigner (el cuñado de Dirac), Hans Bethe (que llegaría a ser el líder teórico del Proyecto Manhattan), y muchos, muchos más, consiguieron buenas ofertas en universidades norteamericanas que facilitaron su migración.

De esta manera, Adolf Hitler se convirtió —sin querer— en el principal impulsor del desarrollo en la ciencia estadounidense, pues les llenó el equipo de refuerzos.

9. Tuvieron que pasar 11 años para que se encontraran los mesones π , las primeras partículas que realmente coincidían con las predicciones de Yukawa.

Antes del «éxodo» había científicos norteamericanos de muy buen nivel, pero eran muy pocos y el eje mundial de la investigación, sobre todo en física, se encontraba en el viejo continente. Con el traslado multitudinario, el ombligo del mundo científico se movió a Estados Unidos y dio lugar a grandes camadas de investigadores formados por los notables europeos; tal fue el caso de hombres como Richard Feynman, Murray Gell–mann, Julian Schwinger, Leon Lederman y Steven Weinberg.

Sin embargo, con todo y los huecos dejados por muchos científicos, en Europa aún se realizaron hallazgos de gran trascendencia. A finales de 1938 —precisamente en Alemania— Otto Hahn, Lise Meitner y Otto Frisch (otro que estuvo muy cerca de descubrir el neutrón) consiguieron fisiónar átomos de uranio. Bombardearon uranio 235^{10} con neutrones y se produjeron isótopos inestables de uranio 236; ahí se produjo una división que resultó en átomos de kriptón 92, bario 141, así como en la liberación de energía y 3 neutrones. Fue un resultado colosal: probaron la factibilidad de la fisión nuclear y —en el proceso— demostraron un potencial para multiplicar el poder de la reacción, pues los tres neutrones liberados podrían dividir nuevos núcleos.

Ya desde 1933, después de enterarse del descubrimiento del neutrón, el físico húngaro Léo Szilárd fue el primero en considerar la posibilidad de una reacción nuclear en cadena, iniciada por neutrones que podrían fisiónar átomos de uranio. Muchos científicos lo tiraron a loco, no creían que tal cosa fuera posible; el mismo Rutherford

10. Recuerden que los números que se mencionan después del nombre de un elemento se refieren a los diferentes isótopos existentes y tienen que ver con su masa atómica. El uranio más común es el 238, con 92 protones y 146 neutrones; el U^{235} tiene exactamente el mismo número de protones, pero el número de neutrones baja a 143. ¿Qué significa esto? Menos interacción fuerte para mantener unidos a los protones y, por tanto, más inestabilidad en los átomos; son más fáciles de dividir.

consideraba que la energía liberada en las rupturas del núcleo era miserable. Pero ahora Hahn, Meitner y Frisch habían demostrado el carácter visionario de la idea de Szilárd.

Aquí se abrió la caja de Pandora, pues la división de los núcleos mostró una situación de gran trascendencia: la masa original del núcleo era ligeramente mayor a la del total de los fragmentos producidos en el proceso; aunque el faltante era muy pequeño, no podía simplemente desaparecer. Si no lo encontraban como materia, entonces solamente había un camino posible: la energía liberada provenía de la diferencia de masas. Esto obedecía a la proverbial ecuación einsteiniana $E=mc^2$: puesto que c —la velocidad de la luz en el vacío— vale 299,792 km/s, la diminuta masa se convertiría en una gran cantidad de energía.

Cada fisión nuclear produciría energía y emitiría neutrones que irían a chocar con otros núcleos, desencadenando una nueva fisión que liberaría más energía y neutrones, en un proceso que podría seguir y seguir. Parecían existir las condiciones para una reacción en cadena autosustentable. En teoría, se abría la puerta para la creación de una bomba atómica; de hecho, el propio Szilárd ya había patentado la idea y cedió los derechos a la Marina Británica en 1936, con todo y el escepticismo de la mayoría de sus colegas. A inicios de 1939, las cosas habían cambiado radicalmente, el artefacto no solo parecía factible sino inevitable; cuando Chadwick se enteró de todo esto se alteró tanto que necesitaba tranquilizantes para poder dormir.

El nuevo hallazgo no podía haber llegado en un momento político más complicado; prácticamente coincidió con el inicio de la Segunda Guerra Mundial. Los países del eje —Alemania, Italia y Japón— pretendían construir un imperio en sus diferentes regiones; Alemania empezó invadiendo Checoslovaquia y Polonia, lo cual provocó

que Francia e Inglaterra le declararan la guerra. Japón, por su parte, realizó ataques en el sureste asiático. Nada tontos, en sus primeras acciones, los países del eje no se metieron con las grandes potencias, pero en 1941 realizaron acciones hostiles que involucraron a Estados Unidos y la Unión Soviética en el conflicto.

No nos adelantemos, sigamos en 1939. Niels Bohr se enteró que Hahn, Meitner y Frisch habían conseguido la fisión con átomos de uranio y llevó la información a Estados Unidos. La comunidad de científicos refugiados en ese país —encabezada por Eugene Wigner y el propio Leó Szilárd— empezó a moverse para alertar de esto al gobierno, especialmente del peligro de que los nazis pudieran contar con un arma nuclear. Sin embargo, en ese momento, los gringos aún no estaban involucrados en la guerra y el asunto no les parecía tan urgente; nadie pelaba a los preocupados científicos. Necesitaban el apoyo de alguien más conocido, una figura tan respetada que pudiera incidir en las más altas esferas de poder; su hombre era Albert Einstein. No fue sencillo, pero lo convencieron de firmar una carta que enviaron el 2 de agosto de ese mismo año, dirigida al presidente Franklin D. Roosevelt, urgiendo a emprender acciones para crear la bomba antes que Alemania. Esta carta cambió el rumbo de la historia y Einstein lamentaría por el resto de su vida haberla firmado.

Una vez que Roosevelt leyó la misiva quedó convencido de involucrarse directamente; se creó el Comité Briggs de Asesoría sobre el Uranio para explorar las condiciones necesarias para crear un artefacto explosivo nuclear. Inglaterra no se quedó cruzada de brazos, y estableció el Comité de Aplicación Militar de la Detonación de Uranio (MAUD, por sus siglas en inglés); este comité estaba encabezado por George Paget Thomson (el hijo de J. J. Thomson) y contaba con el aporte experto de

James Chadwick, junto a otros prominentes científicos británicos.¹¹

Antes del trabajo del comité MAUD se creía que podrían necesitarse varias toneladas de uranio 235 para hacer una bomba. Luego de analizar el problema a fondo, se concluyó que con 10.4kg del material se podría crear un artefacto con un poder explosivo equivalente a 1800 toneladas de trinitrotolueno (TNT). Además, se llegó a la conclusión de que dicho material podría servir como fuente de energía para la producción de electricidad. Todo esto sería factible en unos cuantos años de trabajo intensivo.

En agosto de 1941, Mark Oliphant, exalumno de Chadwick y representante del proyecto MAUD, se reunió en Estados Unidos con los integrantes del comité Briggs y les dejó dos cosas en claro: era factible crear una bomba, pero Inglaterra no tenía los recursos para hacerlo, estaban ocupados a manos llenas con las batallas de la Guerra; si los aliados querían tener una bomba, tendría que ser construida por Estados Unidos. Aunque inicialmente se vieron lentos para animarse, el ataque a Pearl Harbor —en 1941— hizo que los gringos empezaran a tomar la situación más en serio.

El resto es historia. Roosevelt decidió arrancar el Proyecto Manhattan con el mando militar a cargo del General Leslie Groves y el liderazgo científico en manos de Robert Oppenheimer (otro exalumno de Rutherford y Chadwick). Sin duda, se trató de uno de los proyectos más grandes en la historia de la humanidad; participaron en él más de 130,000 personas en diferentes tareas y requirió de un gasto de 2 mil millones de dólares (equivalentes a casi 25 mil millones de dólares de la actualidad). Se llevó a cabo en tres sedes principales: Hanford Site (Washington), Oak Ridge (Tennessee) y, el centro de todo, Los

11. A Rutherford ya no le alcanzó la vida para participar en este comité, falleció el 19 de octubre de 1937.

Álamos (un rancho en Nuevo México que después del proyecto se convirtió en un Laboratorio Nacional); sin embargo, también se realizaron tareas importantes en las universidades de Berkeley y Chicago.

Precisamente fue en Chicago, la ciudad de los vientos, donde Fermi se había establecido después de migrar. Ahí se encargó de construir un reactor nuclear, el Chicago Pile-1, en una cancha de squash de la Universidad de Chicago. En ese espacio, el 2 de diciembre de 1942, se realizó la primera reacción nuclear en cadena autosustentable; una vez iniciado, el proceso no necesitó de ningún estímulo exterior para incrementar su liberación de energía. Al poco tiempo de este hito científico/histórico, don Enrico se incorporó como asesor al equipo de Los Álamos para ayudar a concluir la creación de la bomba.

Antes de que arrancara el Proyecto Manhattan, los alemanes también contaban con un equipo dedicado a crear un arma nuclear; tenían en sus filas un gran número de físicos encabezados por el mismísimo Werner Heisenberg. Aunque los nazis llevaban la ventaja de haber iniciado primero, hubo errores en los cálculos de la masa crítica —la cantidad de material radiactivo necesario para conseguir una reacción en cadena autosustentable— y la opción de construir una bomba se dejó de lado para explorar el potencial de la energía nuclear para generar electricidad.

No crean que la falla en las cuentas la cometió cualquier asistente de medio pelo; fue el propio Heisenberg quien se equivocó; según sus cálculos, se requerían varias toneladas de material radiactivo para crear un artefacto explosivo. Con estos resultados erróneos se adoptó una perspectiva pesimista respecto del proyecto de una bomba, de manera que el trabajo de los alemanes se enfocó hacia la construcción de un reactor nuclear para producir energía. Nunca se sabrá si Werner cometió un error «honesto» o si alteró

sus cuentas a propósito para evitar que los nazis pudieran contar con un arma tan poderosa; lo que sí es claro es que sus acciones —sin tener mucha notoriedad— afectaron considerablemente el rumbo de la historia.

Pero en Estados Unidos no estaban al tanto de lo que ocurría con Heisenberg y los alemanes; el trabajo del Proyecto Manhattan se desarrolló como una carrera frenética por el temor a ser derrotados por el equipo alemán. Todas las divisiones —teóricas, experimentales y técnicas— trabajaban a marchas forzadas para asegurarse de ser los primeros en crear la bomba atómica. Aquí cabe resaltar que en Los Álamos el equipo era realmente internacional; si bien el financiamiento venía del gobierno estadounidense y la estructura militar también era gringa, la mayor parte del trabajo científico era aportado por investigadores extranjeros. Entre ellos, en su calidad de delegado del Imperio Británico, se encontraba nuestro amigo James Chadwick como uno de los principales hombres en la conducción del proyecto.

Inicialmente, las investigaciones giraban alrededor del elemento radiactivo por excelencia, el uranio, pero al poco tiempo se presentó otro material de gran importancia. Hacia 1941, en Berkeley, Glenn Seaborg y su equipo, al bombardear uranio con deuterio¹² en el ciclotrón, produjeron un extraño isótopo de uranio 240 que después de un tiempo decayó en un nuevo elemento. Una serie de estudios confirmaron el hallazgo del plutonio, como fue bautizado el material, y se hizo saber que tiene un número atómico de 94.

La comunidad científica, al menos lo que quedaba de ella fuera del Proyecto Manhattan, no se enteró de esto hasta un año después del final de la Segunda Guerra Mundial; por razones de seguridad se impidió la publicación de los resultados. Para bien o para mal, había iniciado la época

12. Isótopo del hidrógeno que tiene un neutrón en el núcleo.

en que los intereses políticos, económicos y bélicos estarían por encima de la libre comunicación de los hallazgos científicos. Pero eso no era problema para los investigadores en Chicago y Los Álamos; en 1942 ya estudiaban las propiedades nucleares del plutonio y encontraron que en su fisión se liberaban más neutrones que los liberados en la fisión del uranio; la masa crítica para una bomba sería menor.

Paralelamente a las actividades de enriquecimiento de uranio;¹³ se empezó a trabajar en la producción de plutonio en Hanford Site y Oak Ridge. Mientras tanto, Los Álamos orquestaba todo y trabajaba en los diferentes aspectos técnicos de las bombas (ahora ya se pensaba crear una de uranio y una de plutonio). El proceso de diseño y creación de los artefactos estaba completamente centralizado, al grado que los dos centros de producción de materiales radiactivos no tenían una noción real del trabajo que estaban llevando a cabo ni del peligro implícito en su labor. Sin saberlo, en cualquier momento podrían acumular suficiente material radiactivo para alcanzar una masa crítica y... adiós Nicanor, una explosión acabaría con ellos; simplemente no tenían las condiciones necesarias de seguridad. Existía el riesgo latente de un accidente terrible, pero nadie parecía decidido a hacer algo, hasta que Richard Feynman y Hans Bethe —científicos del proyecto— dieron una gran pelea para que les permitieran explicarles a los empleados en las plantas qué estaban haciendo, cuáles eran los principales riesgos y cómo podrían evitarlos.

13. El 99.28% del uranio en la naturaleza es U^{238} , mientras que solamente el 0.71% es del isótopo U^{235} que, por su mayor inestabilidad, resulta muy útil para los procesos de fisión nuclear. El uranio enriquecido contiene una mayor proporción del U^{235} ; para el uso en un reactor, se eleva el nivel a un 4%, mientras que para las armas nucleares se requieren niveles superiores al 85%.

En fin, después de innumerables peripecias —que no mencionaremos aquí porque nos extenderíamos mucho más de lo necesario— el equipo del Proyecto Manhattan logró crear dos tipos de armas nucleares. El primero consistía en un sistema de disparo: al detonar, se lanzaría una bala hueca de uranio 235 que iría a encajarse en un cilindro del mismo material; una vez juntas, alcanzarían la masa crítica que conduciría a una explosión. Este modelo fue bautizado como *Little Boy* (Niño Pequeño).

El segundo prototipo consistía en una pequeña esfera de plutonio rodeada, a cierta distancia, de otra más grande. Al activar la bomba, la esfera grande sería obligada a implotar y juntarse con la de menor tamaño; el material se unía de forma muy rápida para alcanzar la masa crítica. Este tipo de artefacto recibió el nombre de *Fat Man* (Hombre Gordo).

En total, se necesitaban 64kg de uranio enriquecido para crear una bomba *Little Boy*, mientras que solamente se requerían 6.2kg de plutonio para la *Fat Man*. Como no había suficiente uranio 235 para hacer pruebas de funcionamiento —y se confiaba mucho en el buen desempeño del primer tipo de dispositivo— solo se hizo una bomba del tipo *Little Boy*. En cambio, se hicieron dos artefactos ligeramente diferentes entre sí con modelos parecidos al *Fat Man*, uno para realizar una prueba y otro para atacar.

El 16 de julio de 1945, en el desierto de Nuevo México, se llevó a cabo la Prueba Trinity: la primer explosión en la historia de una bomba atómica. La detonación tuvo un poder equivalente a 20 mil toneladas de TNT, la onda de choque se sintió a más de 150 km de distancia y la explosión pudo escucharse hasta El Paso, Texas (ubicado a unos 320 km del sitio de la prueba). Encabezado por Robert Oppenheimer, un gran número de científicos fue testigo de la prueba a cierta distancia; Chadwick, Fermi, Bethe, Feynman, Eugene Wigner y Leó Szilárd, entre

muchos otros, observaron de primera mano —a varios kilómetros de distancia— el poder de la terrible arma que ayudaron a crear.

Menos de un mes después, el 6 de agosto, la ciudad de Hiroshima era atacada con *Little Boy*; 3 días más tarde, *Fat Man* fue lanzada sobre Nagasaki. Más de 150,000 civiles murieron en estas dos ciudades como consecuencia de los bombardeos; fue uno de los episodios más terribles, dolorosos y vergonzosos que puedan encontrarse en la historia de la humanidad. En esos momentos, Alemania ya había caído y Japón estaba a punto de rendirse, pero la combinación del orgullo nipón con la brutalidad norteamericana —y el interés por probar las costosas armas— llevaron a la fatal conclusión.

Una vez apagados el ánimo de competencia, el afán de alcanzar un logro histórico y el miedo al proyecto nazi, los científicos involucrados en el Proyecto Manhattan empezaron a asimilar la dimensión de lo que habían hecho; se dieron cuenta del potencial destructivo del arma que recién habían creado: una bomba atómica del tamaño adecuado podría destruir prácticamente cualquier ciudad en cuestión de minutos. La simple existencia de este tipo de armas representaba un peligro latente para la humanidad.

Al pasar los años, la situación se mostró aún más grave; una vez creadas las primeras bombas, solo fue cuestión de tiempo para que varios países desarrollaran su propio armamento nuclear. Y coincidió que las grandes potencias mundiales —Estados Unidos y la Unión Soviética— tenían arsenales con una capacidad destructiva de grandes proporciones justo cuando iniciaron entre ellas la Guerra Fría. Por varias décadas, el mundo entero vivió el temor de una guerra nuclear capaz de acabar con la humanidad.

Afortunadamente, no todo fue crear artefactos para destruir; al tiempo que se construían armas, se desarrollaron también aplicaciones pacíficas de la energía nuclear;

las principales consistieron en centrales dedicadas a la producción de electricidad, pero también se desarrollaron usos médicos y otros para diferentes ramas de la industria. La esencia de las centrales nucleares radica en aprovechar la gran cantidad de energía térmica (calor) que se desprende en un proceso de fisión para calentar agua, la cual hace mover turbinas que producen electricidad.

A final de cuentas, vemos que la energía nuclear llegó para quedarse; jugó un rol de gran importancia en la historia y aún hoy tiene una gran relevancia en nuestras vidas. Curiosamente, cuando pensamos en energía nuclear con frecuencia nos vienen a la mente Albert Einstein (aunque su aporte no fue más allá de la ecuación $E=mc^2$ y la carta a Roosevelt), Robert Oppenheimer o el mismo Enrico Fermi, pero es muy raro que pensemos en James Chadwick. Comparado con algunos de los científicos de su época, Chadwick nunca destacó mucho en la escena pública pero su impacto terminó siendo enorme, tal como el del neutrón.

¿Y los neutrinos? Ya que dejamos atrás a Chadwick, el descubrimiento de los neutrones y el desarrollo de la energía nuclear, podemos revisar qué ocurrió con los pequeños neutrinos; no crean que me olvidé de ellos. Después de que Fermi desarrolló su teoría del decaimiento beta, la cosa más o menos funcionaba, al menos desde el punto de vista teórico, «solo» hacía falta comprobar la existencia de las recién predichas partículas para darle sentido real a las cosas. Y la tarea no era sencilla.

Ya había mencionado que los neutrinos no tienen carga eléctrica, que no se ven afectados por la interacción fuerte y que tienen una masa mucho menor a la del electrón; todo esto quiere decir que prácticamente no interactúan con la materia. Aun así, los muy sinvergüenzas se están metiendo en ella todo el tiempo, sin el menor pudor (mientras el lector lee esta página, miles de millones de neutrinos

atravesan nuestro planeta sin desviarse siquiera). ¿Cómo podríamos medirlos o detectarlos?

Solamente queda una opción, la principal fuerza que los afecta y los trajo a colación: la interacción débil; si la emisión de un neutrino es resultado de un proceso de esta fuerza, las escurridizas partículas quizá pudieran detectarse a partir de posibles decaimientos débiles.

A partir del modelo iniciado por Fermi, los científicos pensaron en un proceso que pudiera servir para detectar neutrinos (o antineutrinos que, para el caso, sería lo mismo). La interacción entre un antineutrino y un protón da lugar a un decaimiento que genera un neutrón y un positrón; el positrón pronto encuentra un electrón y, al chocar, las partículas desaparecen por la aniquilación partícula/antipartícula; en este proceso se producen rayos gama que pueden ser detectados.

Clyde Cowan y Frederick Reines realizaron un experimento para comprobar la existencia de los antineutrinos: con la ayuda de un reactor nuclear crearon un flujo de 5×10^{13} (o sea 50'000,000'000,000) antineutrinos por segundo por centímetro cuadrado y lo dirigieron a un par de tanques con 200 litros de agua. El agua contenía disueltos 40 kg de cloruro de cadmio, en virtud de que el cadmio es un material que fácilmente absorbe neutrones y, al hacerlo, emite rayos gamma.

Cuando uno de los antineutrinos llegase a interactuar con un protón, se producirían un positrón y un neutrón; ambos causarían la emisión de rayos gama, uno al aniquilarse con un electrón y el otro al ser absorbido por el cadmio. Las paredes de los tanques se recubrieron con un material que emitiría flashes de luz al recibir rayos gama y los flashes serían captados por fotomultiplicadores (amplificadores de luz). El arreglo se hizo de tal manera que hubiera una diferencia de cinco microsegundos entre uno y otro destello para establecer con seguridad que se tra-

tara de un proceso desencadenado por los antineutrinos.

Luego de un intento fallido en 1951, el experimento fue repetido de manera exitosa en 1956: se obtuvieron datos de tres neutrinos por hora en los detectores. Finalmente, se comprobó la existencia de los escurridizos neutrinos y se validó el modelo de la interacción débil, así como los decaimientos asociados a ella. Por su trabajo, Reines recibió el Nobel de Física en 1995.¹⁴ Más adelante, se encontraría que el muón cuenta con su propio neutrino, más pesado que el del electrón y con el 40% de la masa de este. A la familia de partículas integrada por el electrón, el muón y sus neutrinos se le bautizó como los leptones.¹⁵

A pesar de que podría pensarse en los neutrinos como partículas insignificantes, su descubrimiento fue muy importante para dar coherencia a la forma en que entendemos la estructura de la materia y fortalecer el modelo estándar de las partículas elementales que componen toda la materia; sin embargo, no fueron el último componente del rompecabezas; aún faltaban nuevos descubrimientos —acompañados de nombres extravagantes y divertidos— para redondear el zoológico de partículas.

14. Lo bueno es que no se tardaron en reconocerlo... Desafortunadamente, debido a esta demora, Clyde Cowan no recibió el Nobel porque falleció en 1974 (habíamos dicho que el premio solo se entrega a científicos vivos).

15. El nombre viene de *leptos*, que en griego significa pequeño, delgado o ligero; comparados con los protones y neutrones, los electrones y muones (ya no se diga sus neutrinos) son partículas ligeras.

Dúo dinámico

Es 1957, hace ya más de una década que el final de la Segunda Guerra Mundial dio paso a la Guerra Fría entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Aunque estos, y muchos otros países, tienen equipos de científicos dedicados al desarrollo de nuevas armas con tecnología atómica, los físicos teóricos hace mucho que dejaron eso atrás y trabajan afanosamente para crear teorías que expliquen las interacciones nucleares (débil y fuerte) y, al mismo tiempo, intentan clasificar todas las partículas conocidas de la forma más sencilla posible.

¿Qué fácil, verdad? Pues no, no tanto, porque se trata de metas enormes. El ritmo de trabajo es tan vertiginoso que cada vez es más frecuente que dos equipos, o incluso más, resuelvan el mismo problema de forma equivalente casi al mismo tiempo. La visión de la física planteada como una carrera por Rutherford 60 años antes está más vigente que nunca.

En Pasadena, Robert Bocher —director del Departamento de Física del Instituto de Tecnología de California (Caltech)— tiene a su cargo a dos de los físicos más brillantes de toda la historia; Murray Gell-mann y Richard Feynman; sin embargo, al menos en ese momento, la situación parece causarle más conflictos que satisfacciones.

Bocher se acaba de enterar de que cada uno de ellos realiza investigaciones que lo pueden conducir a crear una teoría de gran trascendencia, capaz de unificar los diferentes fenómenos asociados a la interacción débil; las propuestas tienen potencial hasta para llegar a ganar un Nobel. El detalle es que la competencia se desarrolla entre ellos y existe el riesgo de hacer ver mal al Instituto si

se empiezan a contradecir —incluso pelear— en publicaciones y eventos científicos.

Si bien al director le gusta darle libertad a sus investigadores, ha llegado la hora de poner orden, fajarse los pantalones y dejarles una cosa clara a sus luminarias de la física: no le importa lo que opinen, tienen que trabajar juntos. La idea no les hace gracia; probablemente, si sus deseos más profundos se hicieran realidad en el momento del anuncio, el director sufriría el peor de los tormentos chinos; desafortunadamente para ellos, sus poderes mentales no han alcanzado ese grado de desarrollo y tienen que apechugar, poniéndose a colaborar con alguien a quien en ese momento quisieran mandar lo más lejos posible.

Lo curioso es que, originalmente, estos dos grandes hombres de ciencia se llevaban a las mil maravillas; por desgracia, esta relación no se sostuvo así por mucho tiempo, en gran medida por la combinación de su afán de protagonismo y las marcadas diferencias en su carácter. Y es que, pese a la coincidencia en su gran habilidad para indagar en las entrañas de la naturaleza, en lo personal no podrían ser más distintos.

Gell-mann fue un niño prodigio que ya tenía doctorado a los 21 años. Serio, con un carácter obsesivo, se tomaba todo muy a pecho y encontraba gran placer en corregir a quienes lo rodeaban en cuanto cometían un error (incluso aunque no incurrieran en falla alguna) pero, eso sí, no le gustaba que nadie lo criticara. Feynman disfrutaba tanto de la física como de la compañía de guapas muchachas, tocar los bongós o echarse un buen trago en un bar; vivía la vida de modo más ameno, repartiendo tantas bromas y burlas como las que él mismo estaba dispuesto a recibir.

Eran una pareja dispareja en todos los aspectos, excepto en la física, donde probablemente constituyeron el dueto más talentoso de científicos que jamás haya trabajado en el mismo centro al mismo tiempo. Lograron crear

teorías de gran importancia trabajando prácticamente en el mismo pasillo¹ y —entre bromas y peleas— nos llevaron a niveles más profundos en el entendimiento de la estructura de la materia.

Richard Feynman fue el primero en destacar en el mundo de la física y también se integró primero al equipo de Caltech, no necesariamente por ser más capaz o agradable sino porque era once años mayor que Murray.

Richard llegó al mundo en una familia de judíos en Far Rockaway, un suburbio de Nueva York. Melville Feynman, su padre, era un migrante que había llegado de Bielorrusia a los cinco años; siempre fue un apasionado de la ciencia pero no tuvo los medios para perseguir una carrera científica así que proyectó sus deseos frustrados con su hijo. Cuando el bebé todavía estaba en el vientre materno, Melville dijo: «si es niño, será científico».² Desde pequeño, Richard recibió mucha estimulación en aspectos de lógica y matemáticas por parte de su padre, quien también lo llevaba con frecuencia a museos y parques; además, le compró una Enciclopedia Británica que el niño devoró.

Toda esta riqueza cultural se vio complementada de manera fenomenal por su mamá, llamada Lucille, quien le transmitió a su hijo su gracia, sentido del humor y la pasión por contar historias fascinantes. A la larga, esta herencia materna ayudó a convertir a Feynman en uno de los científicos más célebres de la historia: su gran gusto por los relatos hizo que sus aventuras llegaran a varios libros que nos han permitido a millones de personas conocer cómo era este señor, las muchas locuras que llevó a cabo en su vida y, sobre todo, interesantes pormenores de su trabajo; su talento científico y la habilidad para

1. Curiosamente, estos investigadores trabajaron en Caltech, el mismo centro donde se desarrollan las aventuras de Sheldon Cooper y Lenard Hofstadter en la serie de televisión *The Big Bang Theory*.

2. Al parecer, el señor no había escuchado hablar de grandes mujeres de ciencia como Lise Meitner y Marie Curie.

contar grandes historias lo convirtieron en una verdadera leyenda; en toda la historia, ningún otro investigador se ha abierto tanto para que el «público» lo conozca.

Desde muy pequeño, Ritty (como le decían), aceptó de buena gana la inducción de sus padres; lejos de ser una carga, los ánimos científicos de Melville fueron un aliciente para su enorme curiosidad. La casa entera era un laboratorio para él, se la pasaba construyendo pilas y alarmas antirrobo o mezclando sustancias químicas. Más adelante, a Feynman le entró el gusto por arreglar radios, empezando por el de su casa y los de sus familiares, para luego convertirse en el salvador de sus vecinos (sobre todo porque los reparaba sin cobrar). Las chispas, explosiones y fuegos accidentales eran cosa de casi todos los días en su casa.

Aunque no quería parecer delicado —o ñoño— en la escuela, Ritty era completamente inepto para los deportes. El único equipo en que participaba era el de matemáticas; eso sí, como capitán, lo guió a triunfos en todos los torneos de su último año de prepa, incluido el campeonato del Estado de Nueva York. En clases era excelente en todo lo relacionado con ciencia pero no llegaba siquiera a mediocre en las demás materias.

Intentaba evitar las artes a toda costa, hasta que conoció a la hermosa Arline Greenbaum —una chica que lo tenía completamente alucinado—; en un intento por llamar su atención entró al Club de Arte, así como a una liga de jóvenes patrocinada por la sinagoga. Sin embargo, sus primeros esfuerzos no lo hicieron trascender ante la chica de sus sueños.

A la hora de entrar a la universidad envió solicitudes a muchas instituciones; casi todas lo mandaron por un tubo por sus bajas calificaciones en temas como historia y literatura. Finalmente, logró entrar al Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) para estudiar ingeniería

eléctrica pero poco tiempo después decidió cambiar de perfil profesional y se centró en la física.

Justo en esa época, su amor platónico —la ya mencionada Arline Greenbaum— empezó a darle clases de piano a Joan, la hermanita de Feynman. La oportunidad se le puso de «pechito», así que Richard procuró coincidir cuando Arline estaba en su casa y aprovechó para hacer migas con ella y pedirle asesoría para mejorar su vida social en la universidad. El chicle empezó a pegar, al grado que la bella chica llegó a viajar de Nueva York a Massachusetts para visitarlo, asistir juntos a algunos bailes y, en el proceso, despertar la envidia de todos sus compañeros. Parecía que ya tenía novia.

Eran muy diferentes en cuanto a sus gustos pero ni sus caracteres opuestos evitaron que se llevaran bastante bien. Arline tocaba el piano, cantaba, dibujaba y le encantaba la literatura, mientras que Richard era, en palabras de ella, agresivamente inculto.³

Mientras tanto, en la escuela, Feynman se esforzaba por establecerse a través de su potencial ñoño; tomaba avanzados cursos de posgrado y con frecuencia deducía por su cuenta los principios científicos, en lugar de estudiarlos y aprenderlos. En esta época, Richard colaboró, como asistente, con el físico mexicano Manuel Sandoval Vallarta,⁴ quien realizaba estudios del esparcimiento de rayos cósmicos por el campo magnético de las estrellas de una galaxia.

3. Aunque, más adelante, Feynman se acercó a la música y la pintura, nunca hizo esfuerzos por adentrarse en la literatura, y si bien existen muchos libros publicados con su nombre, él nunca escribió uno solo de ellos; todos son transcripciones de sus conferencias o de entrevistas en las que platica sus aventuras.

4. En ese entonces, don Manuel era profesor titular en el MIT; en 1944 dejó esa cátedra para regresar a México y desempeñarse primero como Director del Instituto Politécnico Nacional y después, en la presidencia de Adolfo Ruiz Cortines, como Secretario de Educación Pública.

La habilidad matemática del joven estudiante resultó muy útil para la investigación; de este trabajo derivó su primer artículo científico, publicado en colaboración con Sandoval Vallarta. Aunque el trabajo no era nada revolucionario, sirvió para introducir una idea novedosa: los resultados estadísticos les permitían suponer que las antipartículas serían partículas comunes pero que viajan hacia atrás en el tiempo. Durante el resto de su vida, Feynman vivió convencido de esta noción y muchos otros científicos también la adoptaron, aunque también hubo quienes no la aceptaban del todo.⁵

En fin, volviendo al tema: al concluir la universidad, Richard vivió un *déjà vu* al enviar sus solicitudes de beca para los estudios de posgrado: Harvard lo rechazó pues sus calificaciones en el examen estaban dentro del 20% más bajo en historia y literatura, mientras que el 93% de quienes presentaron en artes salieron mejor que él. Pudo entrar a Princeton gracias a las recomendaciones de sus maestros en el MIT y a un examen de ingreso perfecto en física, nunca antes visto en esa Universidad.

En Princeton, empezó a trabajar como asistente de John Archibald Wheeler —un antiguo alumno de Niels Bohr— en algunos de los problemas pendientes de la mecánica cuántica. Es importante señalar que, a pesar de lo que habían dicho Heisenberg y Born en 1927, la teoría cuántica aún debía limar importantes asperezas para considerarse completa. Feynman y Wheeler empezaron por trabajar en el problema de la energía propia del electrón.

¿De qué se trataba? En ese entonces —como hasta ahora—, no se había logrado establecer el tamaño de los electrones y se especulaba con dos situaciones: podría ser un cuerpo que efectivamente tuviera ciertas dimensiones,

5. Hasta ahora, no se ha podido demostrar que las antipartículas no sean corpúsculos comunes viajando hacia atrás en el tiempo, aunque tampoco que sí lo sean; solamente sabemos que se trata de un modelo interesante que ayuda a explicar muchos fenómenos.

o bien un punto, algo que por definición no tiene tamaño. El problema era que las ecuaciones encargadas de asociar la energía y la carga del electrón tenían en importante consideración el radio de la partícula; si fuera una bolita con cierto tamaño, la carga eléctrica de un lado de la partícula generaría una repulsión sobre la del otro lado y la partícula tendría que desintegrarse por la fuerza eléctrica; en caso de que se tratara de un punto sin dimensión, el radio sería cero, y la energía del electrón aumentaría colosalmente, se iría a infinito.

En cierta medida, el reto era determinar el efecto del electrón sobre sí mismo, pero al aplicar la ecuación de onda los resultados eran desastrosos; se obtenían términos infinitos que no concordaban en nada con los resultados medidos en los experimentos. Esta diferencia no podía ignorarse. El mismo Paul Dirac señaló que había fallas terribles en la teoría cuántica; se necesitaban ideas físicas completamente nuevas para resolver la situación.

Tras muchas horas de pensar e intentar diferentes cosas, Feynman llegó a una idea tan radical que solo podía habersele ocurrido a alguien que —como él— no estuviera tan metido en la literatura de los físicos: renunció al concepto de campo electromagnético. Después de todo, este campo era el responsable de la acción del electrón sobre sí mismo. Ahora, según su idea, ya no funcionaría la noción de un campo inundándolo todo alrededor de las cargas, sino que las partículas tendrían algún mecanismo para interactuar directamente entre ellas.

Inicialmente todo el desarrollo se llevó a cabo de forma clásica, sin considerar los efectos cuánticos; sus resultados eran tan prometedores que los acomodó para dictar lo que sería su primera conferencia profesional, la cual fue un reto enorme. Entre los asistentes se encontraban luminarias científicas como Albert Einstein, Wolfgang Pauli y Eugene Wigner. Aunque Feynman, de 23 años,

inició hecho un manojó de nervios, una vez que empezó a hablar de física todo lo demás se le olvidó y dejó una grata impresión en su audiencia.

Después, empezaron los intentos para llevar su teoría a territorio cuántico; batalló mucho para encontrar el camino matemático adecuado hasta que la solución se le presentó en un lugar completamente inesperado. Richard se encontraba en una fiesta de cerveza de la universidad cuando llegó la información que le hacía falta; pero no crean que se puso hasta el gorro y en la borrachera se le ocurrió la idea, lo que sucedió fue que conoció a Herbert Jehle —un ex alumno de Schrödinger— que le sugirió revisar un artículo que Dirac había publicado ocho años antes.

En las ideas de Dirac, Dick —como era conocido por sus cuates— encontró un gran sustento para la solución del problema de la energía del electrón. A final de cuentas, la respuesta no estaba en deshacerse por completo del campo, sino en cambiar la esencia de su comportamiento: había que cuantizarlo. Era algo lógico, pues si la energía no puede ser continua tampoco podemos tener pedazos de campo arbitrariamente pequeños y, por tanto, el campo no puede inundarlo todo así como así. Entonces, en lugar de un campo omnipresente, la teoría contempló la existencia de partículas mensajeras que hacían interactuar entre sí a las partículas con carga eléctrica; además de los fotones de luz y otros tipos de radiación, existirían otros fotones virtuales que continuamente serían creados y absorbidos para funcionar como portadores de la interacción electromagnética.

Era un redondeo completo de la teoría cuántica, un logro grandioso para un físico joven, pero no crean que se presentó de la noche a la mañana como un simple chispazo de Richard; con todo y su talento, le llevó casi diez años construir esta teoría. Eso sí, probablemente le hubiera tomado un poco menos si no se le atraviesa ese

pequeño detalle de la Segunda Guerra Mundial y su participación en el Proyecto Manhattan.

Originalmente, Feynman no estaba convencido de involucrarse en esa gran empresa, no porque tuviera conflictos existenciales respecto de la bomba (esos vinieron después) o por falta de estímulo científico; sencillamente, en ese momento tenía otras prioridades. Había crecido su romance con Arline mientras realizaba sus estudios de doctorado y, poco después de concluirlos, se casaron; aun con la oposición de la familia de él, que temía por la salud de Richard. El problema era que ella estaba prácticamente desahuciada por una infección de tuberculosis en el sistema linfático, pero nada de eso le importó a Richard; no podía separarse de su amada en estas condiciones, ni siquiera por la oposición de su madre o por un proyecto tan apasionante como el de sacarle energía al núcleo atómico. Pasara lo que pasara, él seguiría al lado de Arline.

Para ese entonces, Dick ya se destacaba como una de las grandes mentes jóvenes de la época, contaba con muy buenas recomendaciones de sus antiguos profesores y de otras luminarias que habían conocido diferentes aspectos de su trabajo. Tal era el prestigio del joven Richard, que Robert Oppenheimer, el líder científico del Proyecto Manhattan, se tomó la molestia de reclutarlo personalmente y hacer arreglos para que la señora Feynman recibiera tratamiento médico de primer nivel en Albuquerque, Nuevo México, cerca de la sede. El plan convenció a los recién casados y pronto estaban en camino a Los Álamos.

Cuando realizaron el viaje les dieron instrucciones específicas de comprar su boleto de tren para cualquier parte del país menos para Albuquerque; de ahí podrían tomar otro pasaje a la sede del Proyecto Manhattan. Esto se debía a que muchísimos científicos de la ciudad de Princeton realizarían el mismo viaje y no querían levantar sospechas con un éxodo masivo hacia el mismo lugar.

Richard pensó que si todo el mundo iba a otros lados no habría problema con que él y su esposa viajaran directo a Albuquerque. Llegó a comprar los boletos y el encargado le dijo: «ah, entonces todas esas cosas son para usted». Sucede que por semanas se habían mandado muchos contenedores llenos de equipo para el Proyecto; curiosamente, no se preocuparon por hacer pasar desapercibidas las toneladas de artefactos pero, eso sí, les preocupaba mucho despistar con los itinerarios de los científicos.

Una vez que el joven Feynman —con solo 25 años de edad— empezó su labor en Los Álamos floreció su estatus de leyenda, incluso entre las vacas sagradas que trabajaban con él. Hans Bethe, el líder teórico, pronto reconoció su valor y lo hizo jefe de uno de sus equipos de trabajo. Ahí se destacó por su habilidad matemática para obtener resultados útiles en la predicción de cómo se comportaría la explosión de la bomba y también por su capacidad lógica para estructurar el procesamiento de datos en una época en que las computadoras, como las conocemos hoy, aún no existían.

Entre todo el trabajo, Dick realizaba hazañas que incrementaron su fama con la crema y nata de los científicos de la época: hacía cálculos fabulosos mentalmente, abría los candados de combinación que protegían grandes secretos de la bomba, supervisaba el proceso de producción de materiales radiactivos; además, se esforzó para que le dejaran explicarle a los empleados de la planta de Oak Ridge qué estaban haciendo y cómo debían cuidarse. Con todo y esto, lograba tener ratos libres en que se daba el lujo de seguir pensando en la teoría que aún no lograba concluir para explicar el comportamiento de los electrones y los fotones: la electrodinámica cuántica.

Pronto, muchos científicos estaban completamente apantallados con su mezcla de carácter, carisma y habilidad científica. Oppenheimer, intentando convencer a la

Universidad de Berkeley de contratarlo, afirmó que prefería perder a otros dos científicos en el Proyecto Manhattan que a Feynman; Eugene Wigner llegó a decir que Richard era «un nuevo Dirac, solo que esta vez es humano»; y vaya que lo decía con conocimiento de causa, recordemos que Wigner era cuñado de Dirac.

Por supuesto que también se daba tiempo de ir al hospital de Albuquerque para visitar a su amada, cuyo estado de salud era cada vez más delicado. Un día, ya hacia el final del proyecto, le avisaron que Arline estaba agonizando; la acompañó toda la noche —tomándole la mano— hasta que falleció. Había perdido a su primer amor, la chica que lo ayudó a fortalecer la confianza de su carácter y que sería su ideal de mujer prácticamente el resto de su vida. Inicialmente, Dick parecía estar en total negación, bloqueado ante la realidad de su pérdida, pero con el tiempo fue aflorando el gran impacto que la muerte de su esposa había dejado en él.

Al finalizar la guerra, varias universidades se peleaban por sus servicios, entre ellas Princeton y Berkeley, pero Feynman decidió aceptar su primer trabajo como profesor en la Universidad de Cornell (influido por la amistad que tenía con Hans Bethe, que trabajaba ahí). Una vez instalado, además de desarrollar sus actividades académicas, empezó a buscar distracciones; asistía a los bailes estudiantiles en los que buscaba conseguir pareja diciendo que era un físico que acababa de regresar de construir la bomba atómica. Sobra decir que ninguna muchacha le creía, pero aun así se las arreglaba para seducirlas. En esta época se convirtió en un galán consumado y mujeriego empedernido: se lanzaba sobre chicas que conocía en la calle, estudiantes universitarias o las novias/esposas de sus colegas.

Empezó a frecuentar bares con el único propósito de ligar chicas, sin la mínima intención de establecer una relación formal. Al principio, lo hacía portándose como un

perfecto caballero que disparaba todo pero no pescaba nada. Luego —con más experiencia y algo de asesoría de una amiga que conoció en un bar—, empezó a desarrollar la teoría de que un hombre que se desvive por una chica de bar no la va a conquistar porque ella no está estimulada con él, lo siente seguro y dominado. En cambio, si el hombre se da su taco, la trata con cierto desdén y no le invita nada, ella se sentirá mucho más atraída.

Al principio, ni el mismo Dick creía mucho en este planteamiento, pero pronto los resultados lo llevaron a adoptar esta estrategia como táctica permanente de batalla. Él mismo relataba que en una ocasión una hermosa mujer se sentó con él y le preguntó: «¿Puedo pedir una botella de champagne?», a lo que contestó: «Puedes pedir lo que quieras, tú lo vas a pagar». Tómala, ¿lo habrán abofeteado con esa respuesta? Nada de eso, al final de la velada la mujer le invitó la cena y acabó pasando la noche con él.

Ahora, si sus técnicas como conquistador estaban a la alza, sus estrategias científicas no eran menos. Gracias a su gran habilidad matemática y a su notable instinto físico,⁶ logró por fin terminar su teoría de la Electrodinámica Cuántica (QED, por sus siglas en inglés), que explicaría de forma prácticamente completa la interacción entre materia y radiación.

Al final lo logró gracias a unas herramientas matemáticas llamadas integrales de trayecto, con las cuales consideraba todos los caminos posibles para el desplazamiento de una partícula de un lugar a otro. A partir de ahí, introdujo el concepto de amplitud de probabilidad para un trayecto espacio-temporal: se trata de un número complejo⁷ que,

6. O sea, la noción intuitiva de cómo deberían funcionar las cosas.

7. Un número complejo está constituido por la suma de dos partes, una real y una imaginaria. La parte real representa los números con que convivimos y trabajamos todos los días; el otro término consiste en múltiplos de la unidad imaginaria (llamada i) que equivale a la raíz cuadrada de -1 ; se trata de números que al elevarse al cuadrado dan como resultado un número negativo, por eso se les llama imaginarios.

al ser elevado al cuadrado, da como resultado la probabilidad para que un evento se desarrolle de cierta manera.

Lo interesante es que las amplitudes de probabilidad de las diferentes formas en que se podría desarrollar un proceso no solamente se manejan aisladas; se pueden juntar las amplitudes de eventos sucesivos para obtener una amplitud de probabilidad total, desde el inicio hasta el final del proceso, que indicará la forma más probable de que se lleve a cabo.

Podemos resumir la propuesta de Feynman de la siguiente manera: la probabilidad de un evento que puede ocurrir de varias formas diferentes es el cuadrado absoluto de la suma de contribuciones complejas, una por cada forma diferente.

Esto, por sí mismo, era fenomenal, pero la cosa no terminó ahí. Desarrolló un sistema gráfico para representar las amplitudes de probabilidad con flechas que eran perfectamente válidas para los cálculos y que también hacían las ideas mucho más sencillas y visualizables. Luego creó un sistema gráfico más general para representar los procesos de interacción entre partículas de materia (fermiones) mediante la acción de las partículas mensajeras (bosones), los llamados «diagramas de Feynman». Originalmente, el sistema se aplicaba tan solo para la fuerza electromagnética, pero más adelante se probó que también resultaba válido para las interacciones débil y fuerte.

Finalmente, luego de casi diez años de cocinar y masticar las ideas, Dick logró terminar un trabajo que llegó a redondear la física cuántica desarrollada a lo largo de las décadas de 1920 y 1930. Aunque no fue una teoría que se le ocurriera a él desde el inicio, se sentía especialmente orgulloso de la precisión que demostraron tener las predicciones de la QED. Presumía que podía explicar todos los fenómenos aparte de los nucleares y los relacionados con la gravedad. Además, el margen de error —entre lo

que se esperaba a partir de la teoría y los datos obtenidos de los experimentos— era equivalente a medir la distancia de Los Angeles a Nueva York y equivocarse por el grosor de un cabello humano; en ese sentido la teoría era un éxito total.

Sin embargo, la satisfacción no fue completa, al menos no desde el inicio. Prácticamente al mismo tiempo que dio a conocer su trabajo aparecieron otras dos formulaciones de la Electrodinámica Cuántica: una hecha por Julian Schwinger, un profesor de Harvard que tenía casi su misma edad y también era de ascendencia judía y originario de Nueva York, y otra de Sin-Itiro Tomonaga, un reconocido físico japonés. Entonces, así como sucedió un par de décadas antes con Heisenberg y Schrödinger, empezó una batalla para demostrar la supremacía de una teoría sobre las demás.

El problema inicial para Feynman fue que su trabajo parecía algo sacado de la manga, así que muchos físicos no lo tomaron muy en serio. Por otro lado, la formulación de Schwinger tenía un fundamento impecable y —aunque no lograba predecir tantas cosas como la de Dick— se llevó muy buenas opiniones hasta de los críticos más duros. Con el tiempo —y una buena dosis de ayuda de Freeman Dyson (físico inglés y amigo de Feynman)— se demostró que las tres propuestas eran completamente equivalentes, además de ser totalmente confiables.

Con esto se abrieron las puertas de par en par para la consagración de Richard Phillips Feynman; la mayoría de los físicos adoptaron su versión porque —gracias a los diagramas— era mucho más sencillo trabajar con ella. A Schwinger esto le cayó como patada en el estómago: le estaban quitando buena parte de la gloria de un gran aporte. En alguna ocasión llegó a decir de forma despectiva que los diagramas de Feynman no eran física sino pedagogía. A final de cuentas —pese a los berrinches—

casi todos los involucrados recibieron el mérito que merecían (con la excepción de Dyson, que desempeñó un rol muy importante para demostrar la validez de todos los planteamientos, pero casi nadie lo reconoce más que como comparsa en la QED).

Mientras tanto, Richard estaba cada vez menos convencido de seguir en Cornell, no porque lo trataran mal o no apoyaran su trabajo, sino porque no aguantó el frío de Ithaca, Nueva York. Además, lo llamaba la oportunidad de salir de la sombra de su mentor (Bethe) para establecer su propio reino en otra universidad. La gota que derramó el vaso se presentó una noche en que, a la mitad de una nevada, Dick realmente sufrió para ponerle las cadenas de nieve a las llantas de su carro; los dedos congelados y el lío de las cadenas eran suficiente, eso no era vida.

Se dejó seducir por una jugosa oferta que lo llevó a trabajar a Pasadena con un privilegio adicional: su primer año de «labores» en Caltech sería un sabático. Ni tardo ni perezoso lo aprovechó para hacer un «gran sacrificio» e irse a Brasil. Ahí —además de enseñar física y seguir con sus investigaciones— se dio el lujo de aprender a tocar los bongós y participar en el Festival de Río con una escuela de samba.

Desde sus días en el Proyecto Manhattan, pasando por las clases en Cornell, Feynman ya tenía una fama enorme por su capacidad para darle claridad aun a las ideas más complicadas; algunos científicos llegaron a decir que después de escuchar sus explicaciones sobre los descubrimientos que habían hecho, ellos mismos los entendían mucho mejor. Y es que él realmente predicaba a partir de un principio muy importante: si no puedes explicarle algo a un estudiante de primer año, en realidad no lo entiendes.

Con la combinación de sus virtudes científicas, didácticas y sociales, Feynman —a los 36 años— ya estaba

establecido como toda una leyenda en el mundo de la física. A finales de ese año falleció Enrico Fermi y la Universidad de Chicago quería que Dick ocupara su puesto; sin embargo, él era muy feliz en Pasadena y ni siquiera quiso conocer la oferta económica por miedo a que lo pusiera a dudar.

Curiosamente, en ese entonces Murray Gell-mann era profesor asistente de Fermi en Chicago, pero después de la muerte de su maestro perdió el incentivo para permanecer ahí. Necesitaba colaborar con alguien a quien admirara; un líder capaz de jalarlo, motivarlo y enriquecer su trabajo. Estaba fascinado por la personalidad de Feynman y también por sus brillantes aportes científicos, así que en la primera oportunidad que tuvo le preguntó si sería posible que le consiguiera trabajo en el Instituto de Tecnología de California. Dick se entusiasmó con la idea, Murray era todo un talento.

Si bien Murray era 11 años más joven que Feynman y su carácter era notablemente diferente, las similitudes entre sus vidas no dejan de ser sorprendentes. Gell-mann también creció en el área de Nueva York, descendía de migrantes judíos —originarios de Viena, en su caso— y recibió mucha estimulación intelectual desde su infancia, solo que, en su caso, no venía tanto de su padre sino de su hermano Ben. Desde niño se devoraba los libros y siempre estaba listo para lucirse con toda la información que había acopiado, lo mismo en la casa que en la escuela; con frecuencia corregía incluso a sus profesores.

Cuando llegó la hora de elegir una vocación le dijo a su padre que quería ser lingüista o antropólogo, pero la respuesta fue como un balde de agua helada: «¿Estás loco?». Le dijo que moriría de hambre con esas opciones, que no eran carreras sino hobbies (eso pensaba el papá). Lo que el muchacho debía estudiar era algo más serio y seguro, como la ingeniería civil. Ahora la respuesta dejó

congelado a don Arthur Gell-mann: «Prefiero morir de hambre; quiero entender la naturaleza, no construir edificios». La discusión siguió por un buen tiempo hasta que, luego de mucho estira y afloja, Murray y su padre lograron coincidir en que no estaría mal estudiar física.

Gracias a su gran combinación de talento y trabajo, Gell-mann se había brincado varios años de la educación básica; a los 15 años dejaba atrás la prepa e iniciaba sus estudios superiores en la Universidad de Yale. Pero al finalizar su carrera se dio cuenta de que no todo en la vida es conocimiento y calificaciones. Aunque se graduó con muy buenas notas, no dejó una grata impresión en sus profesores —probablemente por otra combinación de arrogancia y la costumbre de corregirlos enfrente de todos— y tuvo grandes problemas para encontrar una beca para realizar estudios de posgrado.

Muchas universidades lo aceptaban como estudiante pero casi todas querían que pagara altas colegiaturas para obtener su doctorado; el problema era que su familia no tenía los medios para apoyarlo en esta situación y Murray no tenía trabajo. Finalmente, recibió una carta de invitación del profesor Victor Weiskopff, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), la misma escuela en que Feynman hizo su licenciatura.

Para Gell-mann, esta era una escuela técnica, algo inferior dentro de sus aspiraciones científicas; realmente sentía que estaría rebajándose si aceptaba entrar ahí. No estoy exagerando, la situación fue tan extrema para él que se vio enfrentado a una curiosa disyuntiva: MIT o suicidio. Tras reflexionar un rato, se dio cuenta de que el proceso no era conmutativo: si entraba al MIT y no le gustaba, podía matarse después, mientras que una vez cometido el suicidio no habría vuelta atrás. Entonces, con más dudas que otra cosa, se lanzó a su única opción real de posgrado.

Desde el inicio, la cosa le pintó mucho mejor, sobre todo en cuanto empezó a conocer al profesor que lo había invitado y que lo tomó como asistente. Viki (como le decían sus amigos) fue el primer maestro que lo impactó y se ganó su respecto completamente, tanto con su capacidad como con su trayectoria. Venía de desempeñar un papel muy importante en las altas esferas del Proyecto Manhattan y antes había tenido estancias de investigación en los más importantes centros de Europa.

Como buen físico, Murray ya había escuchado hablar acerca de la crema y nata de la física del siglo XX: Max Planck, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Max Born, Erwin Schrödinger y Paul Dirac. Sucede que el profesor Weiskopff no solo los conocía, sino que había trabajado con todos ellos. El brillante alumno, quien por ese entonces era un chicuelo de 18 años, quedó impactado con semejantes credenciales. Más adelante —con la arrogancia que por mucho tiempo le caracterizó— Gellmann llegó a decir que Viki fue el único maestro al que realmente le aprendió algo. Generalmente, él tomaba su información de los libros y las revistas científicas.

En fin, apantallado como estaba, se decidió a causar una gran impresión en su mentor y lo logró, a tal grado que, cuando terminó su doctorado, el mismo profesor le consiguió trabajo en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Ahí laboraban hombres como Albert Einstein y John Von Neumann, bajo la dirección de Robert Oppenheimer (el mismo hombre que encabezó el Proyecto Manhattan). Se ganó el respeto de las vacas sagradas a su alrededor a base de trabajo, pero no tuvo una gran permanencia: aunque le ofrecieron seguir trabajando en el mismo Instituto, después de un par de años aprovechó la oportunidad que un amigo le consiguió para trabajar con Fermi en Chicago.

Durante su estancia en la ciudad de los vientos, logró darse a conocer de forma definitiva con la solución de un problema que tenía perplejos a los físicos. En ciertos choques de muy altas energías, la interacción nuclear fuerte —la encargada de mantener unidos a los protones y neutrones en el núcleo atómico— producía partículas que debían existir muy, pero muy poco tiempo, puesto que la misma fuerza debería de hacerlas decaer con gran rapidez en otros objetos. El problema era que las partículas vivían considerablemente más tiempo del que predecían las teorías vigentes, algo no funcionaba.

Entre 1952 y 1953, Gell-mann propuso que debía existir una nueva propiedad de las partículas además de las ya conocidas como la masa, la carga, el *spin* y el *isospin*; la llamó «extrañeza». Las partículas más comunes, como los protones, neutrones, electrones o muones, tendrían un valor neutro para la extrañeza; por eso no presentaban ningún comportamiento importante en este sentido. Sin embargo, las partículas *V* —como las observadas en los experimentos conflictivos, entre las que entraban una serie de cosas raras llamadas *kaones* e *hyperones*— ofrecían un comportamiento diferente por tener extrañeza.

Esta propiedad podría tomar valores tanto positivos como negativos y sería conservativa para fuerzas como la gravedad, la electromagnética y la interacción fuerte. Esto quiere decir que las acciones de esas interacciones le harían los mandados, no podrían cambiarla. Sin embargo, la interacción débil se pasaría a la extrañeza por el arco del triunfo y, aunque lentamente, lograría causar el decaimiento de las partículas extrañas.

Recordemos que la interacción débil es la responsable de los procesos en que un neutrón se convierte en protón, electrón y antineutrino; o en los que un protón decae en positrón, neutrón y neutrino. También existen otros procesos débiles con partículas menos comunes.

La explicación de Gell–mann nos hizo ver que en los choques de altas energías las partículas con extrañeza eran creadas en pares por la interacción fuerte: aparecía una partícula con extrañeza positiva y la otra negativa, por lo que no había problema de conservación. Sin embargo, a la hora de la destrucción, cada una estaba por su lado y la conservación evitaba que la misma interacción las hiciera decaer por separado; la única que podía hacer el trabajo sería una fuerza insensible a la extrañeza, la lenta pero segura interacción débil.

Este fue el primer gran descubrimiento de Murray. Logró explicar un fenómeno conflictivo, mientras develaba una nueva propiedad de la materia. Además, dejó ver su habilidad para bautizar sus descubrimientos con nombres pegajosos, una característica que lo acompañaría a lo largo de toda su carrera.

Aquí debemos destacar una mala costumbre, o un defecto, en el trabajo científico de Murray: era rápido para pensar pero muy lento para escribir. Le encantaba trabajar para resolver problemas pero, una vez que lograba explicar lo que ocurría, le entraba la flojera; tardaba meses en convertirlos en artículos para dar a conocer sus ideas en forma. Con la extrañeza experimentó un gran bloqueo mental que por poco le costó el mérito de la explicación del fenómeno que acabamos de describir. Casi al mismo tiempo, en Japón, Kazuhiko Nishijima proponía la existencia de la carga η (eta) que, en esencia, sería lo mismo que la extrañeza pero con menos «punch» en el nombre. Si Gell–mann se hubiera tardado un poco más en publicar le habrían comido el mandado por completo. Para su fortuna, terminó el trabajo a tiempo, dándole a la nueva propiedad el nombre que todos adoptaron.

Por esta misma época en que la suerte científica le empezaba a sonreír, su fortuna romántica también se transformó de forma favorable. Nunca había sido muy

propenso a salir con chicas; aunque le agradaba la idea abstracta de tener novia, parece que no era una de sus prioridades. En una fiesta le presentaron a Margaret, una espectacular chica británica, rubia y de ojo azul. Si la imagen le agradó, su carácter y formación lo acabaron de cautivar. Ella poseía una gran cultura general y acababa de graduarse en arqueología griega por la Universidad de Cambridge. Desde su juventud, Murray era un apasionado de la arqueología; de hecho, aunque no era su profesión, le dedicaba mucho tiempo como aficionado. A Margaret el joven Gell-mann también la atrajo desde el principio, pocas veces había conocido a alguien tan ilustrado; hicieron *click* casi instantáneo aunque inicialmente no llegaron al romance.

Poco tiempo después, coincidió que Murray estaba por salir a Inglaterra para un congreso; el mismo día que salía encontró a Margaret en el aeropuerto. Su madre había fallecido y viajaba a casa para el funeral. Gell-mann ajustó sus planes para apoyar en cuanto le fue posible a la chica de sus sueños en un momento tan difícil; esto los hizo muy unidos, pasaron mucho tiempo juntos disfrutando de diferentes aficiones compartidas, y a su regreso a Estados Unidos ya estaban completamente enamorados. Se casaron el 19 de abril de 1955 en Princeton pero, por el trabajo del marido, establecieron su primer hogar en Chicago.

No duraron mucho en la ciudad de los vientos. A finales de ese mismo año, a la muerte de Enrico Fermi, Murray perdió el incentivo para seguir trabajando ahí; empezó a buscar opciones para migrar a otra universidad. Gell-mann estaba fascinado con las publicaciones científicas y el carácter de Feynman, así que —como ya habíamos dicho— en una reunión de físicos le preguntó si habría lugar para él en Caltech. Al poco tiempo lo invitaron a dar una conferencia en Pasadena y ahí mismo le presentaron la oferta económica para su contratación.

Para aquella época la cifra era muy buena —9,500 dólares al año—, pero lo que realmente lo convenció fue la oportunidad de trabajar con Dick.

En un principio, la cosa no habría podido ir mejor, los científicos se pasaban casi todo el día discutiendo sus ideas, realizando cálculos, creando maravillosas posibilidades para la explicación de diferentes aspectos de la naturaleza. Realmente se divertían con el desarrollo de discusiones muy estimulantes que los llevaban a expandir los límites de la ignorancia. Eran dos físicos talentosísimos trabajando en su máximo esplendor, un verdadero dúo dinámico; probablemente la más grandiosa pareja científica de toda la historia.

El problema se presentó cuando Gell-mann, con su enorme ego, se dio cuenta de que en ese par él era Robin y Feynman era el caballero de la noche. Dick estaba mucho más establecido, era más famoso y su carácter lo hacía un líder puro; las personas lo escuchaban y lo seguían de forma natural. Murray habría podido ser la máxima figura —el físico alfa, rey teórico, la mamá de Tarzán— en cualquier otra universidad; pero en Caltech siempre iría detrás de Richard.

Y es que realmente Robin, es decir, Gell-mann, era un hombre competitivo. Se molestaba mucho cuando algún científico publicaba una idea que él creía que se le había ocurrido primero, aunque por su flojera ni la hubiera puesto por escrito ni publicado de alguna otra forma. En este sentido de verdad se comportaba como un niño berrinchudo; llegó a arruinar relaciones con importantes científicos, incluso algunos que eran amigos cercanos, cuando los acusó de piratearle las ideas. Exactamente problemas del mismo tipo empezaron a presentarse con Feynman, pero había un agravante: Dick gozaba haciendo renegar a su colega mientras que no se afectaba mucho cuando Murray respondía a los ataques.

Así que, luego de un inicio como virtuales inseparables, se fueron apartando poco a poco en su labor de investigación hasta que cada uno quedó por su lado. Luego coincidió que ambos se dedicaron a resolver problemas de simetría que impedían la creación de una estructura general para la interacción débil. Se conocían muchos fenómenos asociados a esta fuerza, pero no había una sola teoría que los agrupara y los explicara todos; era como cuando se conocía la caída de los cuerpos en la Tierra, la formación de las olas y el movimiento de los planetas, pero no había una Teoría de la Gravedad para unificarlos.

De acuerdo con su costumbre, Murray iba con calma en su trabajo; en una charla de café con Robert Marshak había surgido una idea interesante sobre cómo se podría realizar el desarrollo matemático que podría dar paso a la creación de una teoría para la interacción débil. De hecho, le había prometido a Robert que no publicaría nada hasta que él hiciera lo propio para poder darle el crédito debido. Pronto se dio cuenta de que habría de romper su promesa, pues se enteró de que Feynman estaba trabajando en lo mismo y se apresuraba a terminar para publicarlo cuanto antes; completamente convencido de que todo se le había ocurrido a él (aunque muchos afirman que, por otro lado, también había escuchado las ideas de Marshak).

Fue precisamente en este momento que Bocher, el director del Departamento de Física de Caltech, obligó a Dick y a Murray a trabajar juntos para publicar una propuesta unificada para la interacción débil. A regañadientes se sentaron a colaborar y acabaron publicando un trabajo de gran importancia para entender esta fuerza de la naturaleza. Aunque la publicación que realizaron fue resultado de la colaboración del dúo dinámico, el texto y las ideas tenían más sabor a Feynman que a Gell-mann. Esto se debió en gran medida a que Gell-mann iba a medio camino en su investigación mientras que Feynman ya casi

estaba acabando su trabajo; además, su carácter se comió al de su colega para terminar escribiendo a su antojo.

Poco tiempo después, con su artículo como base, otros científicos lograron culminar la teoría de la interacción débil a través de una teoría cuántica de campo. Se pudo saber que la acción de esta fuerza también se lleva a cabo a través de bosones (partículas mensajeras) pero, a diferencia de lo que sucede con la electromagnética, aquí había tres agentes diferentes para la interacción débil: los bosones W^+ , W^- y Z^0 . La cosa iba agarrando más forma, dos de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza podían explicarse de forma muy parecida, pero aún faltaba un buen esquema para acomodar y entender las partículas elementales.

Para finales de la década de 1950, los científicos batallaban para dar sentido a la clasificación de partículas de materia (fermiones); solamente tenían la división de acuerdo a la masa entre leptones (ligeros), mesones (medianos) y bariones (pesados). En un artículo para *Scientific American*, publicado en 1957, Gell-mann afirmó que el conocimiento de las partículas subatómicas en ese momento era como la idea que se tenía de los elementos químicos antes de que se empezara a entender la estructura del átomo, entonces, hacían falta nuevos descubrimientos para entender los patrones de las partículas subatómicas.

Por esa época, el éxito empezaba a subírsele a la cabeza a don Murray, quien gozaba corrigiendo a los demás y mostrándose superior ante ellos. Era realmente insufrible, con actitudes que recuerdan las de Sheldon Cooper.⁸ Feynman era de los pocos científicos que le hacían frente y en términos científicos le daba bastante pelea, aunque Gell-mann lo aplastaba sacando de la manga datos cul-

8. El protagonista de la comedia de televisión *The Big Bang Theory*, un pedante físico de partículas que trabaja en Caltech... momento, creo que me recuerda a alguien. Algo me dice que Gell-mann ofreció inspiración para crear a Sheldon.

turales completamente desconocidos para Dick, quien nunca se preocupó mucho por aprender nada además de las cosas relacionadas con la física y las mujeres. De hecho, Mary Louise —su segunda esposa, con quien duró casado solamente de 1952 a 1956⁹— llegó a afirmar que Richard era un ignorante con doctorado.

Y es que Dick estaba más preocupado por aprender de la vida directamente que por cultivarse a través de la lectura; desde sus días en Cornell, había dedicado muchas horas a intrépidas expediciones en bares, había hecho diferentes viajes y había tenido otras tantas aventuras que compartió con todo el mundo en su libro autobiográfico *Surely you're joking Mr. Feynman*.

Para la época del trabajo de la interacción débil, Richard ya estaba por dejar atrás los días de casanova; y vaya que hubo conquistas, dejaba enamoradas por todos lados pero —a diferencia de Einstein, quien era como un *rockstar*— no era que las chavas se le aventaran nomás porque sí; en realidad, este hombre disfrutaba más de la caza que de la presa en sí misma.

Pero no se puede ir por la vida como marinero, con un amor en cada puerto, e incluso a Feynman le llegó la necesidad de estabilidad. Para su fortuna, no tuvo muchos problemas en encontrar su alma gemela, la única mujer con quien pudo acomodarse tras la muerte de Arline. Siguiendo con las similitudes con Gell-mann, también se trató de un amor británico: Richard conoció a Gwyneth, una chica de Yorkshire, mientras tomaba el sol en Geneva; se hicieron amigos al instante y se mantuvieron un contacto a distancia. Dick estaba fascinado con ella, tanto

9. Fue una mujer cautivada por su imagen de galán pero que no entendía para nada su vida de científico; en la solicitud de divorcio se quejó de la siguiente manera: «Empieza a hacer cálculos y resolver problemas en su cabeza desde que se despierta. Hacía cálculos mientras manejaba el carro, se sentaba en la sala o estaba acostado en la cama por la noche».

así que le propuso cortar a su novio, dejar su país e irse a vivir con él a California; que fácil ¿verdad? Suena medio loco, pero ella accedió, así era el poder de Feynman sobre las damas. La apuesta era grande para ambos pero funcionó a pedir de boca, embonaron a la perfección y se casaron al poco tiempo de la llegada de ella. En 1962 llegó al mundo su hijo Carl, seis años más tarde adoptaron una niña y la pareja siguió unida hasta la muerte de Richard.

Justo por esta época, a inicios de la década de 1960, los directivos de Caltech le pidieron a Dick que diera un curso de física universitaria para novatos que no se iban a especializar en esta área de la ciencia. Feynman se emocionó tanto con la idea que trabajó para replantear por completo la forma de enseñar física. Tradicionalmente, la enseñanza universitaria se iniciaba con temas generales y familiares como la mecánica, la óptica, el electromagnetismo, y se dejaban para el final las teorías inherentes a la estructura de la materia, pero a él esto no le convencía, así que partió de la situación imaginaria en que todo el conocimiento científico se perdería y solo podría preservarse una parte muy específica; estableció que él salvaría la información que se refiere al hecho de que todo está hecho de unas cosas llamadas átomos conformadas por protones, neutrones y electrones. A partir de esta noción fue construyendo un curso que se repitió varios años, con tal éxito que las clases que lo conformaban se transcribieron para luego ser convertidas en una serie de libros: las proverbiales «*Feynman Lectures on Physics*» (Conferencias Feynman de Física).

Cuando salió la publicación se vendió como pan caliente entre los físicos y hasta la fecha sigue siendo un referente para muchos investigadores. La forma de Richard para plantear las ideas científicas resultó sumamente atractiva, tanto así que se empezaron a sacar extractos de estas mismas conferencias para hacer otros libros, como

Seis piezas fáciles. Años más tarde, la publicación de las pláticas de Feynman se hizo una verdadera tradición, por no decir toda una industria, que lo convirtió en uno de los científicos con más libros vendidos de la historia a pesar de que nunca escribió siquiera un capítulo para ninguno de ellos;¹⁰ el máximo ejemplo de esto fue el ya mencionado libro de anécdotas *Surely you're joking Mr. Feynman*.

A lo largo de los años, Gell-mann mostró envidia considerable por la fama que Dick alcanzó gracias a sus libros, especialmente cuando sus esfuerzos literarios no alcanzaron los mismos resultados que los de su colega. Sin embargo, tampoco era algo que lo tuviera deprimido, él estaba metido en grandes investigaciones justo cuando su compañero empezaba a dominar el negocio de las clases/conferencias/ libros.

En 1962, después de algunos años de romperse la cabeza en busca de diferentes formas de dar orden al zoológico subatómico, en una charla con un alumno se dio cuenta de que había estado sufriendo para reinventar un concepto bien conocido en matemáticas: la teoría de grupos. Al fin encontró el camino correcto para producir un esquema que permitía hacer buenas clasificaciones de los bariones y mesones, así como de las ocho maneras en que pueden convertirse unos en otros.

Al trabajar en su primer modelo del nuevo planteamiento se dio cuenta de la presencia de grupos de ocho partículas y ocho operadores para transformarlas, lo cual le recordó los ocho caminos al nirvana que considera el Budhismo.¹¹ Entonces, fiel a su inclinación de bautizar

10. Ya hemos dicho que eso de la literatura nunca se le dio a Feynman, solamente se ponía escribir para sus artículos científicos, pero para los libros se limitaba a ofrecer su voz, ya fuera a través de conferencias o entrevistas. Incluso, para la revisión de las transcripciones se apoyaba en otros científicos.

11. Visión correcta, pensamiento correcto, hablar correcto, actuar correcto, medio de vida correcto, esfuerzo correcto, atención consciente correcta y concentración correcta.

descubrimientos con nombres inspirados y originales, a su nuevo aporte le dio el nombre de «esquema de los ocho caminos» (*Eightfold Way*).

Tal como había sucedido con el trabajo de la extrañeza, la publicación de esta idea se volvió a tardar. Ahora no fue por desidia o flojera, sino por pánico escénico. Gell-mann tenía mucho miedo a equivocarse y hacer el ridículo frente a toda la comunidad científica; su ánimo se alternaba en épocas de gran emoción y de terribles dudas respecto de su planteamiento. Finalmente, mandó la publicación justo a tiempo, porque en Inglaterra un estudiante de doctorado llamado Yuval Ne'eman —quien además era coronel del ejército israelí con licencia— estaba obteniendo prácticamente los mismos resultados (aunque sin ponerles un nombre tan pegajoso).

Para su fortuna, Murray alcanzó a hacer las cosas a tiempo y tener la primicia del aporte. Gracias al nuevo modelo se podían agrupar los bariones en un octete (que incluía los protones, neutrones y las raras partículas Ξ (ξ) y Σ (sigma)— y también se hacía lo propio con los mesones (que incluyen a los *piones* y *kaones*). Pero empezaron a aparecer nuevas partículas — Δ (deltas), Σ^* (sigmas asterisco) y Ξ^* (xis asterisco)— que totalizaban nueve y parecían salirse de la teoría. Chanfle, eso podía echar a perder todo.

En esto estaban las cosas cuando se llevó a cabo un congreso en el CERN, con la crema y nata de la física de partículas. Justo durante las sesiones, a Yuval Ne'eman le cayó el veinte de que la teoría de grupos también permitía la existencia de un decuplete, grupo de diez partículas, lo que significaba que debía existir otra partícula parecida a las recién descubiertas, así que se puso a hacer cuentas para proyectar las características que debía tener, quería anunciar su idea frente a los grandes científicos que lo rodeaban. Las cosas iban cuajando, la emoción se apoderaba de él, tenía el gran chispazo —el tipo de momento que

toda su vida los investigadores sueñan encontrar— y justo cuando acababa de organizar sus ideas para hablar vio que Gell-mann levantaba la mano. Con gran decepción escuchó a Murray explicar el esquema y predecir la existencia de una nueva partícula; en ese mismo instante, en ese mismo lugar, Murray acababa de tener la misma idea y, por cuestión de segundos, se quedó con la primicia. No era sencillo jugar a las carreras científicas con él.

En su intervención, Gell-mann bautizó a la una nueva partícula como Ω^- (omega menos), misma que —después de dos años y 97,024 intentos fallidos— fue descubierta en el laboratorio de Brookhaven, en Long Island. Esto ayudó a corroborar la validez del esquema de ocho caminos y a acabar de coronar el prestigio científico del más famoso de sus creadores.

Murray estaba enrachado con los buenos resultados de sus teorías, pero lo mejor aún estaba por venir. Escarbando en la teoría de grupos notó que, así como se les podía agrupar en los octetes y el decuplete, había razones para pensar que los bariones podían estar hechos de tríadas de otras partículas. ¿Sería posible que hubiera algo más allí adentro? ¿Los protones y neutrones no eran fundamentales?

Otros científicos, como Robert Serber y el frustrado Yuval Ne'eman, coincidieron en que al menos desde el punto de vista matemático esto sería viable. Gell-mann estaba intrigado con la idea; empezó a jugar con ella y a discutirla con colegas a pesar de que le inquietaba el problema de la carga eléctrica fraccionaria (nunca se ha detectado una carga eléctrica que no sea un múltiplo entero de la del electrón). De cualquier forma, Murray y muchos amigos se dieron el gusto de divagar, hablar sobre las posibilidades de esos disparatados, pequeños y graciosos *quirks* o *kworks*, palabras que hasta entonces Murray sacaba solamente de su cosecha.

En esas estaba el asunto cuando Gell–mann se topó con *Finnegan's Wake*, de James Joyce, libro que ya había leído en su juventud. En uno de los pasajes de Joyce aparece la frase «three quarks for Muster Mark» (una forma peculiar de decir «tres hurras para el Señor Mark») y el paralelo con el número tres le fascinó. Por si esto fuera poco, también se enteró de que la palabra *quark* significa requesón en alemán, y que también es jerga para patrañas.

A finales de 1963 publicó un minúsculo artículo de dos páginas, titulado «Un modelo esquemático de Bariones y Mesiones», en el que tímidamente sentó las bases de una propuesta radical: afirmó que, matemáticamente, la teoría sugería la existencia de unas nuevas partículas a las que llamó *quarks*; estos nuevos componentes se unirían de tres en tres para formar los bariones, y de dos en dos para formar los mesones. Existirían tres tipos de *quarks*, a los que llamó «sabores»: *up* (arriba), *down* (abajo) y *strange* (extraño); cada uno de ellos tendría su correspondiente antipartícula. Un protón estaría hecho de dos *up* y un *down*, mientras el neutrón se conformaría por dos *down* y un *up*. Las partículas con extrañeza tendrían un *quark strange* en su interior.

La idea se veía prometedora: así como el descubrimiento de los protones, neutrones y electrones le dio sentido a la tabla periódica, los *quarks* venían a fortalecer el modelo de ocho caminos. Aun así, presa del mismo miedo al fracaso que lo había afectado en el pasado, Gell–mann nunca se atrevió a predecir la detección física de los *quarks*; incluso insinuó que podrían ser objetos matemáticos no «observables», condenados a los confines de los mesones y bariones.

Al ver esta publicación, Feynman se sintió algo molesto, probablemente consigo mismo, por no haber colaborado en este aporte revolucionario. Le habría gustado participar en la creación de la novedosa teoría de su vecino, aunque pronto tuvo la oportunidad de vincularse

indirectamente a través de un asesorado: George Zweig. Zweig era un joven estudiante de doctorado en Caltech que quería hacer su tesis con Murray, pero fue rechazado y acabó trabajando con Dick, aunque al principio el maestro no se metió mucho con su trabajo.

A Zweig se le ocurrió un modelo de partículas que, tal como los *quarks*, formarían los mesones y los bariones. En un afán de simetría, se le ocurrió que si había cuatro leptones (el electrón, el muón y sus respectivos neutrinos) también deberían ser cuatro las nuevas partículas, número que lo llevó a llamarlos «ases». Muy emocionado, se comprometió completamente con la idea, y con gran esfuerzo logró crear un artículo de 80 páginas en que dejó clara su opinión de que las partículas debían existir en realidad y especuló que probablemente sería la misma interacción fuerte la que las unía.

Si bien los trabajos de Murray y Zweig se publicaron casi al mismo tiempo, el término *quark* empezó a predominar cuando alguien se refería a las nuevas partículas, probablemente por la combinación del prestigio de Gell-mann, la facilidad de leer un artículo mucho más corto y, sobre todo, el nombre pegajoso. Esa fue, de hecho, una gran ventaja de Murray siempre: su capacidad para darle a los descubrimientos nombres que a nadie más se le ocurrían pero que agradaban a la mayoría.

El concepto de los *quarks* empezó a entrar en boga, al menos en el mundo de la física de partículas pero, aun así, su autor no acababa de comprometerse del todo. Seguía bailando entre el miedo a equivocarse y la preocupación porque le quitaran el mérito; un colega describió así la postura de Murray: «Si no se encuentran los *quarks*, recuerden que nunca dije que podrían hallarse; si los encuentran, recuerden que se me ocurrieron a mí primero».

A pesar de las precauciones de Gell-mann, muchos físicos experimentales estaban a la caza de los *quarks*,

buscando la gloria de ser los primeros en detectar una nueva partícula fundamental. Sin embargo, como si el problema de la carga fraccionaria no fuera suficiente, apareció otra complicación: parecía que el esquema de las nuevas partículas debía producir una violación del Principio de Exclusión de Pauli. Si un protón tenía dos *quarks up*, o un neutrón tenía dos *quarks down*, las dos partículas iguales tendrían el mismo estado de energía al mismo tiempo, y eso no podía ocurrir. Entonces, los físicos empezaron a jugar con la idea de una nueva propiedad cuántica que pudiera resolver el conflicto, aunque en ese momento no tenían ni idea de qué podía ser o de dónde saldría.

Así estaban las cosas a finales de 1965, cuando anunciaron a los ganadores del Premio Nobel de Física; se lo iban a entregar a los creadores de la Electrodinámica Cuántica (QED). Richard Feynman estaba entre los galardonados pero, aunque su emoción era evidente, inicialmente se sintió abrumado por la avalancha de llamadas, entrevistas y atención que recibió de todos lados. Tal fue su impacto que por un momento consideró no aceptar el más prestigioso reconocimiento que puede recibir un científico; según Dick, era demasiada atención hacia él. Claro que un amigo lo hizo entrar en razón cuando le dijo: «¿Crees que esto es atención? ¿Sabes qué va a pasar si no aceptas el Premio?»

Si bien para entonces la relación del dúo dinámico era un poco más civilizada, no se puede decir que Murray se hubiera sentido feliz por el galardón que recibiría su compañero; por el contrario, la noticia casi hizo que le diera chorrillo, y por varios años le pesó que Feynman tuviera un Nobel mientras él no. Para nada importaba que Richard fuera considerablemente mayor o que Gell-mann aún fuera un adolescente cuando se publicó la QED, su ego aborrecía el hecho de sentirse atrás de él. ¡Maldito Batman!

Durante los años siguientes, Murray aparecía con frecuencia entre los candidatos para ganar el Premio, pero no se le hacía, y cada vez se apachurraba más por salir «derrotado». Probablemente, sus posibilidades de ganar se veían afectadas por su teoría más reciente —y audaz— que aún no era confirmada y hacía pender su prestigio de un hilo. Los *quarks* no aparecían por ningún lado, y vaya que los buscaban: en aceleradores de partículas, rayos cósmicos; incluso en el fondo del mar se hacían experimentos para detectarlos, pero no se dejaban detectar. ¿Acaso estarían verdaderamente confinados en los nucleones? ¿O simplemente no se habían usado los proyectiles indicados de la forma correcta?

Recordemos que cuando —casi por accidente— se descubrió el núcleo, el hallazgo se hizo gracias a que se lanzaron partículas alfa contra átomos de oro. El objeto que ayudó al hallazgo era básicamente del mismo tamaño que lo descubierto; de hecho, después se supo que las mismas partículas alfa eran núcleos de helio. La clave aquí es que si se habrían de encontrar *quarks* dentro de los nucleones, se tenía que usar proyectiles de un tamaño semejante al que se esperaba en ellos y solamente había un candidato para lograr esto: el electrón. Pero el bombardeo de núcleos con electrones no era nada nuevo, desde la Segunda Guerra Mundial se habían hecho experimentos en este sentido pero los científicos jamás habían encontrado algo remotamente parecido a un *quark*. Aunque después de los trabajos de Gell-Mann y Zweig la búsqueda se intensificó, los resultados favorables seguían sin llegar.

Entonces entró en escena James Bjorken, un joven físico que trabajaba en Stanford, para señalar que el problema estaba en que los electrones no llegaban con la energía suficiente para detectar los *quarks*. Tal como estaban llegando, solo chocaban con el protón o el neutrón como si se tratara de dos bolas de billar, pero no alcanzaban a entrar

en ellos para explorar su estructura. En su trabajo, Bjorken afirmaba que, después de chocar a altas energías con un nucleón, el comportamiento de los electrones ofrecería una buena idea de su estructura: si se desviaban en ángulos pequeños sería prueba de que los protones y neutrones no tenían estructura interna, sino que serían partículas elementales; la desviación en ángulos grandes mostraría la existencia de partículas puntuales en su interior: los *quarks*.

A partir de esta idea, George Zweig logró incitar a Feynman, su asesor, a participar activamente en el trabajo teórico de los posibles componentes de los mesones y bariones; aunque quizá esto no funcionó como esperaba, porque en lugar de apoyar sus ases, o los *quarks* de Murray, Dick elaboró su propia teoría, en la que llamó partones a las partículas. Richard explicó que para detectar los *quarks* (o partones), los electrones debían ir a velocidades cercanas a la de la luz, eran necesarios los efectos relativistas. ¿Cómo es esto?

Al parecer, los *quarks* son un verdadero desmadre en el interior de los nucleones y no se están quietos un solo instante; se mueven tan rápido en relación con la velocidad del electrón, que dan la impresión de una inexpugnable solidez dentro del nucleón. Sin embargo, cuando el electrón llega con velocidades cercanas a las de la luz, la cosa cambia radicalmente: el tiempo se empieza a dilatar, es decir, desde la perspectiva del electrón transcurre más despacio, y los *quarks* parecen moverse en cámara lenta. Con estas condiciones, se vuelve posible penetrar al interior de un protón o un neutrón y chocar con alguna de las partículas que lo componen.

En cuanto estas ideas vieron la luz pública, Gell-mann acabó de molestarse con Feynman; no solo tenía la desfachatez de copiar su idea inicial sobre la existencia de triadas de partículas en el interior de los bariones y mesones (lo cual, en gran medida, era cierto), sino que, al ponerle

un nuevo nombre, le tiraba una piedra a su trabajo. Eso sí, la propuesta contemplaba algo que no se le había ocurrido y prometía ser útil para explicar el comportamiento de los *quarks*; probablemente era esto lo que más le desagradaba. Con esta situación, la relación del dúo dinámico llegó a su punto más hostil, Murray no quería ni ver a Dick.

Mientras tanto, en el Centro del Acelerador Linear de Stanford (SLAC, por sus siglas en inglés) se realizaron los experimentos de choque a altas velocidades entre electrones y protones; en 1967, anunciaron resultados que confirmaban la existencia de partículas puntuales dentro del protón. Más adelante, los resultados fueron corroborados con otros experimentos en el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear). La cosa avanzaba, los *quarks* existían pero aún nadie podía explicar por qué; sin importar la energía de los choques, no podían ser liberados del nucleón en que se encontraban.

No sé si habrá sido coincidencia o influencia del hallazgo de los *quarks*, pero no pasó mucho tiempo antes de que Gell-mann recibiera el Nobel. Ya habíamos dicho que vivió varios años de corajes porque Richard recibió el suyo primero, pero al final se pudo quedar con una gran satisfacción: se lo dieron a él solito, mientras Feynman tuvo que compartirlo con Schwinger y Tomonaga. Al menos ese gusto le quedó a Robin, aunque fue una cosa realmente curiosa: el premio se lo entregaron por su aporte al estudio de las partículas elementales, en realidad fue como un reconocimiento a la trayectoria. Si hacemos memoria, todos sus aportes fueron realizados paralelamente por otros; la extrañeza fue desarrollada simultáneamente por Nishijima, el modelo de ocho caminos por Ne'eman y los *quarks*/ases por Zweig. El detalle fue que ninguno de los demás recibió jamás un Nobel.

Bueno, pero la cosa no acaba aquí, quedamos que aún había cabos sueltos con la teoría de los *quarks*. A inicios

de los años setenta, Murray se puso a trabajar con Harald Fritzsch con la idea de crear una teoría cuántica de campo para la los *quarks* y la interacción fuerte, tal como ya se había hecho para las fuerzas electromagnética y débil.

Coincidió que para ese entonces se realizaron estudios del momento de los *quarks* dentro de protones y neutrones. Las cuentas no cuadraban cuando se compararon los resultados con el momento del nucleón del cual los *quarks* formaban parte: no llegaban más que a la mitad del momento total. Ni tardos ni perezosos, los físicos crearon una teoría que sugería que el momento faltante correspondería a los bosones encargados de mantener los *quarks* unidos. No estoy muy seguro de a quién se le ocurrió el nombre de estas nuevas partículas mensajeras, pero —como son las encargadas de pegar los *quarks*— recibieron el nombre de gluones (el término viene de *glue* [pegamento] y se traduce más o menos como «pegones»).

Para ese entonces, Gell-mann y Fritzsch realizaban una estancia en el CERN; ahí trabajaron para combinar el estudio estadístico de los *quarks* con las investigaciones sobre los gluones y, buscando matar tres pájaros de un tiro, con el problema de violación del Principio de Exclusión de Pauli. Comenzó a cocinarse la idea del color, una nueva propiedad cuántica que sería exclusiva de los *quarks*.

Como parte de la interacción fuerte, los *quarks* podrían adoptar seis colores diferentes: rojo, verde, azul y sus correspondientes «anticolores». Así como las cargas de los protones y electrones se equilibran para formar átomos eléctricamente neutros, los *quarks* se combinarían para crear partículas neutras respecto del color. Los protones, neutrones y el resto de los bariones están formados por tres *quarks* y tienen uno rojo, uno verde y uno azul,¹² los

12. En óptica, la suma de estos tres colores resulta en blanco, lo cual le da sentido a la analogía que los físicos usaron para la nueva propiedad cuántica de los *quarks*.

mesones se forman con pares *quark-antiquark* y tienen una partícula con color y otra con anticolor para lograr la neutralidad «cromática».¹³

Una vez que los científicos establecieron las reglas del juego para la unión de los *quarks* por medio de gluones, con el concepto de color de por medio, nació la gran teoría de la interacción fuerte: la Cromodinámica Cuántica. Con base en esta teoría, se estableció la existencia de ocho diferentes gluones que les dan color a los *quarks* y ayudan a unirlos entre sí. Los *quarks* no siempre tienen el mismo color, pueden variar mediante el intercambio de gluones siempre que se respete la conservación cromática. También se explicó por qué la conservación de color hace que los *quarks* solo puedan encontrarse en grupos de dos y tres; es imposible encontrar combinaciones de cuatro o cinco que puedan formar partículas neutras al color.

¡Genial! Los científicos habían logrado grandes avances; sin embargo, una gran pregunta seguía en el aire: ¿por qué no se puede encontrar un *quark* aislado?

Por fin esta duda fue resuelta gracias a la acción de varios científicos, como Frank Wilczek, David Gross y David Politzer, para explicar que la culpable de este problema era «la libertad asintótica». ¿Eh? ¿Qué es eso? Resulta que la interacción fuerte, responsable de unir los *quarks*, tiene un comportamiento radicalmente diferente al de las otras fuerzas que conocemos en la naturaleza: varía directamente con la distancia. Si la separación es pequeña, la interacción también es reducida; al aumentar la primera, la otra también crece.

13. Debo aclarar que el color cuántico de los *quarks* no tiene nada que ver con los colores que observamos todos los días en nuestro mundo; pasa exactamente lo mismo con el sabor —*up, down, strange*— que no se relaciona en nada con el sentido del gusto. Como ya vimos en capítulos anteriores, la luz, y por lo tanto el color, surge de los saltos de electrones entre niveles de energía en el átomo; por esta razón es que no puede verse en su interior, y el concepto ordinario de color no tiene sentido.

Esto no ocurre con la interacción electromagnética; cuando uno juega con dos imanes se da cuenta de que la acción entre ellos es inversamente proporcional a la distancia; para separaciones cortas tenemos fuerzas —de atracción o repulsión— grandes; por el contrario, conforme aumenta la distancia entre los imanes, la influencia que ejercen entre sí se hace cada vez más débil. Sucede lo mismo con la gravedad: entre más alejados nos encontremos del centro de la Tierra será menor la fuerza de atracción experimentada.

El detalle es que con los *quarks* las cosas no funcionan así. Cuando las partículas están muy cerca unas de otras, la fuerza que las une es muy pequeña; conforme las separamos, la intensidad de la interacción se hace cada vez mayor; es como si los gluones que los unen fueran resortes.

Sin embargo, aun los mejores resortes se pueden romper; ¿será posible hacer lo mismo con la unión de los quarks? Pues sí y no. Para romper esta unión, es necesario darle mucha energía al sistema, tanta que es suficiente para generar materia de acuerdo a la proverbial ecuación einsteniana $E=mc^2$. Al llegar a cierta energía se separa un *quark* de sus «compañeros» pero, instantáneamente y con la misma energía usada para sacar ese *quark*, se crean otros dos; un *quark* normal que completa el triplete que habías roto y un *antiquark* que se junta con el que sacaste, creando un mesón. Total que, por mucho que le busques, al final no es posible aislar estas partículas.

Es así que, a final de cuentas, la cosa quedó en un equilibrio entre las ideas de Gell-mann y las de Zweig; entre el confinamiento absoluto y la existencia física de las nuevas partículas. Si bien Murray se quedó con la gloria de darles nombre, George tenía razón respecto de la cantidad que deberían existir, al menos en parte.

Zweig supuso que habría tantos «ases» como leptones, lo cual lo llevó a proponer la existencia de cuatro partículas. En 1974 se comprobó su idea con el descubrimiento del cuarto *quark* (llamado *charm*, «encanto» en inglés); sin embargo, para 1977 se comprobó la existencia de otros dos leptones; apareció en escena el *tau* —un hermano aún más «gordo» del electrón y el muón— junto a su correspondiente neutrino. Entonces, un físico llamado Haim Harari propuso que, si había razón en la lógica de la simetría, deberían existir otros dos *quarks*.

Originalmente se les quería llamar *beauty* (belleza) y *truth* (verdad), pero hasta a los físicos se les hizo que esto era demasiado y acabaron conservando solamente las iniciales para darles los nombres de *bottom* (fondo) y *top* (cima). El primero fue descubierto rápidamente, en el mismo año de 1977, pero tuvieron que pasar 18 años para que se lograra demostrar la existencia del *quark top* y, con él, redondear nuestro esquema de entendimiento de la materia.

Precisamente para este año, 1977, ya se veía prácticamente completo y demostrado el modelo de los *quarks*, tanto así que parecía el momento idóneo para que sus creadores recibieran un Premio Nobel. Al menos eso pensó Feynman, quien propuso a Gell-mann y Zweig como candidatos, lo que muestra que no tenía resentimientos por las «amistosas» —y casi cotidianas— peleas con su colega y vecino de Caltech, sobre todo considerando que él mismo había hecho aportes al modelo. De cualquier manera, se hizo a un lado para darle el crédito merecido a los otros dos.

Sin embargo, el comité no compartió la opinión de Dick. Resulta un poco extraño; el desarrollo del modelo *quark* tiene méritos de sobra para haber recibido esta gran distinción y contaba con el apoyo de uno de los más grandes físicos de la época; aún así, no ganó. ¿Cómo

pudo ocurrir esto? Bueno, lo que voy a contarles no tiene una fuente realmente firme, pero dicen las malas lenguas que muchos físicos se resistían a entregarle un segundo Nobel a Murray; de por sí era un higadito difícil de soportar, ¡imagínenselo con un segundo galardón! Quizá tenían razón, lo malo fue que se llevaron al buen Zweig entre las patas.

Ni modo, el premio no les tocaba, pero el gesto de Richard no quedó en el aire; ayudó considerablemente a mejorar la relación del «dúo dinámico». Gell-mann y Feynman siguieron realizando investigaciones importantes en Caltech —aunque sin colaborar— hasta la muerte de Dick en 1988. Después de los funerales, a Murray se le escapó una frase algo venenosa, resultado de la envidia acumulada a lo largo de los años; dijo que a lo largo de su vida Richard parecía más interesado en crear anécdotas que en hacer ciencia. No le faltaba razón, pero no es algo correcto para decir de un cuate que acaba de fallecer. Sobra mencionar que esto no hizo la menor gracia a la familia Feynman, y dejó un amargo sabor de boca a lo que debía de haber sido una cálida despedida entre amigos.

En 1994, Murray publicó su primer y único libro de divulgación —El Quark y el Jaguar—, pero no tuvo la respuesta que él y su editorial hubieran querido. Las ideas presentadas son buenas y el desarrollo es ameno, pero le falta chispa, es más didáctico que entretenido; quedó muy lejos de las exitosas publicaciones derivadas de las conferencias de Feynman. Aún después de su muerte, la sombra de Batman siguió pesando sobre el chico maravilla.

Epílogo

Del modelo estándar, el LHC y algunas ideas locas

En el mundo hay dos tipos de personas, las que clasifican todo lo que encuentran y las que no. La mayoría de los científicos entran en la primera situación, se pasan la vida intentando acomodar sus hallazgos en categorías para encontrar simetrías o relaciones que faciliten la explicación del comportamiento de la naturaleza.

En su momento, los griegos pensaron que toda la materia estaría hecha de cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego; muchos siglos después, John Dalton estableció que se podía encontrar muchos más componentes: los elementos químicos; Mendeleiev encontró una forma de ordenarlos y clasificarlos de acuerdo a sus propiedades y de aquí nació la tabla periódica. Luego, los científicos se enteraron de que el átomo no era indivisible, sino que había otras cosas en su interior; empezaron entonces a buscar cierto orden en los componentes más pequeños de la materia.

Conforme aparecieron nuevas partículas subatómicas, la búsqueda de clasificaciones cobró mayor relevancia. Como la masa es una de las propiedades físicas más importantes, era lógico que se convirtiera en un importante referente para distinguir entre los diferentes corpúsculos. Es así como se dio la distinción entre los leptones (partículas ligeras como el electrón y el neutrino) y los bariones (partículas pesadas como el protón y el neutrón). Hasta antes de 1935, la separación parecía muy útil y fácil de hacer, pues los bariones eran casi 2,000 veces más pesados

que los leptones. Luego aparecieron en escena los mesones —partículas de masa intermedia predichas por Hideki Yukawa— y parecían acomodarse muy bien en el modelo; el problema fue que el muón —primer corpúsculo descubierto con este rango de masa— en realidad no cumplía con muchas características esperadas en los mesones; de hecho, su comportamiento lo hacía ver más como un electrón gordo que cualquier otra cosa.

Empezaron las fallas, quizá la masa no era la mejor forma de clasificar si se quería tener un entendimiento profundo de las cosas. Y es que había partículas con masas similares que para nada se parecían en otras importantes propiedades. Los científicos tuvieron que encontrar una mejor manera de ordenarlas para dar mayor sentido a la explicación de la estructura de la materia.

Así apareció la idea de clasificarlas con ayuda del Principio de Exclusión de Pauli: las partículas que no pueden ocupar el mismo estado cuántico al mismo tiempo (electrones, muones, taus, neutrinos, *quarks* y sus antipartículas) fueron llamadas fermiones; en cambio, aquellas a las que les vale gorro el Principio de Exclusión Pauli y se pueden amontonar sin problema, se les denominó como bosones. Lo que marca la diferencia entre el comportamiento de unas y otras es el *spin*; los fermiones son partículas que tienen valores semienteros (como $1/2$ o $3/2$, ya sean positivos o negativos) mientras los bosones toman valores enteros (0, 1, 2, 3, etcétera).

Este nuevo acomodo, desarrollado a partir de principios físicos fundamentales, nos dio una gran ventaja: logró distinguir entre partículas que forman la materia y «partículas mensajeras», encargadas de hacer valer las fuerzas de la naturaleza. Suena raro, ¿verdad?, pero ya vimos que, a partir de las teorías cuánticas de campo, las fuerzas de la naturaleza se hacen sentir a través de esos «correveydile» que son los bosones.

A partir de este esquema de clasificación se creó lo que se conoce como «modelo estándar de partículas», algo así como la tabla periódica de las partículas elementales (o al menos las que hasta hoy creemos que son elementales). Este modelo nos indica que toda la materia conocida en el Universo, cualquier cosa que se nos pueda ocurrir, está hecha de solo doce partículas (con sus correspondientes antipartículas, claro está): seis tipos de *quarks* y seis leptones.

Las cosas comunes como el piso, el aire, nuestra ropa, los carros, el agua, el Sol, la luna, las estrellas y nosotros mismos, estamos hechos solamente de los electrones y dos tipos de quarks (*up* y *down*); las demás partículas aparecen en situaciones de altas energías, como las de los rayos cósmicos o las producidas en los grandes aceleradores.

Y aún hay más, no crean que los físicos olvidaron a las mensajeras. El sacrosanto modelo considera también a los bosones de las diferentes interacciones: los fotones (interacción electromagnética), los bosones W^+ , W^- y Z^0 (interacción débil), los gluones (interacción fuerte) y los gravitones (interacción de la gravedad). Hasta ahora, se ha comprobado la existencia de todas las partículas mensajeras excepto de los gravitones, lo cual no deja de ser curioso: la fuerza que se empezó a entender antes de todas las demás es la que se resiste a embonar en el gran esquema de las cosas; esto se debe probablemente a que es la interacción de menor intensidad entre todas y, por eso, sus cuantos son los más difíciles de detectar.

Pero siempre hay un pelo en la sopa, la cosa no podía ser tan sencilla y bonita. Según las teorías originales, varias de las partículas fundamentales no deberían de tener masa, pero la tienen. ¡Oh, Dios! Las cuentas de los físicos no cuadraban, ¿cómo se resolvería esto? Pues como siempre, inventando una nueva propiedad que pudiera explicar la diferencia en las cuentas.

A Peter Higgs, un físico escocés, se le ocurrió que podría existir un campo encargado de darles esa masa inesperada. Pero ya vimos que los campos no solo existen y se extienden a sus anchas por todos lados, sino que están cuantizados; esto significa que debe existir una partícula encargada de la acción del nuevo campo y, en honor a don Peter, la llamaron «bosón de Higgs».

Una de las grandes metas del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) —el aparato experimental más grande de la historia, operado por el CERN en la frontera entre Suiza y Francia— es generar choques de partículas a velocidades cercanas a la de la luz para producir energías enormes, tan grandes que permitan producir y detectar el bosón de Higgs; en el proceso, se espera demostrar que todo el modelo estándar funciona.

Claro que también existe la posibilidad de que no aparezca, o de que ni exista. En ese caso, nuestro fabuloso esquema de partículas se caería en pedazos y los físicos empezarían una encarnizada guerra de teorías para sustituirlo. Lo bueno es que, pase lo que pase, tendremos cosas interesantes para todos.

Pero un aparato como el LHC —operado por miles de trabajadores y con un costo de siete mil quinientos millones de euros— no se dedicará a investigar sobre una sola cosa. También buscará responder otras interrogantes, entre ellas una incógnita del tamaño del Universo: ¿por qué hay más materia que antimateria?

En todos los procesos en que los científicos han estudiado la producción de antimateria se produce la misma cantidad de materia normal. Sabemos que cuando materia y antimateria entran en contacto se aniquilan. Un Universo con las dos «conviviendo» no podría existir. Los físicos esperan aprovechar los experimentos a muy altas energías en el LHC para hacerse una idea de cómo pudo crearse un cosmos lleno de materia regular sin que aparezca la contraparte.

Aquí yo tengo una hipótesis loca derivada de las ideas de Feynman en la materia, o más bien en la antimateria: sabemos que en situaciones de muy altas energías —de acuerdo con la multicitada ecuación $E=mc^2$ — se puede presentar la creación de pares partícula/antipartícula; nunca se puede crear una sin la otra y cuando se llegan a tocar desaparecen dejando solamente energía a su paso. Por otro lado, don Dick nos dijo que la antimateria se podría entender como materia común que viaja hacia atrás en el tiempo. ¿Ven a dónde va esto?

Hace meses reflexionaba sobre el hecho de que la energía del Big Bang pudo crear no solamente nuestro Universo y se me ocurrió que en ese instante pudo haber aparecido exactamente la misma cantidad de antimateria; un antiuniverso. ¿Y por qué no se aniquilaron? Porque nuestro cosmos se expandió hacia adelante en el tiempo, mientras que el anticosmos realizó su viaje para atrás; por eso no pueden aniquilarse, cada vez se alejan más en el tiempo.

A cualquiera se le puede ocurrir una «pachecada» como esta, el reto es encontrar pruebas experimentales que puedan validar la idea. Lo complicado aquí es que los fotones son sus propias antipartículas, por lo que un Antiuniverso nos enviaría luz común y corriente que no podríamos diferenciar de la originada por objetos en nuestro Universo. El único suceso que creo que podría verificar mi idea sería la detección de objetos astronómicos muy distantes; tan alejados que les llevaría mucho más de trece mil millones de años —la edad estimada del Universo— llegar hasta nosotros. La detección de algo parecido a esto podría indicar que mi idea tiene algo de cierto, pero mientras tanto, los científicos del LHC buscarán de forma más directa una explicación a partir de producir partículas/antipartículas una y otra vez.

Aún quedan muchas preguntas sin responder respecto de la estructura de la materia, pero creo que la más importante

de todas no podrá responderse muy pronto, ni siquiera con la ayuda del LHC: ¿son los *quarks* y los leptones realmente el fondo de las cosas? ¿Serán en verdad indivisibles como en algún momento se pensó que eran los átomos, o estarán hechos de otras partículas?

Hasta donde sabemos, no están hechos de ninguna otra cosa; de hecho, ni siquiera tenemos una idea real de su tamaño pues son tan pequeños que no sabemos qué tan pequeños son.¹ Muchos científicos piensan que en algún momento podremos establecer su tamaño; otros tantos están convencidos de que se trata de partículas puntuales (y recordemos que un punto no tiene dimensiones ni puede estar hecho de nada más).

En lo personal, me inclino a pensar que hay algo más; en algún momento los seres humanos podremos acabar de desnudar los átomos para descubrir entidades realmente indivisibles. ¿Por qué creo esto? Por la interacción débil.

Ya vimos que hay decaimientos en que un protón se convierte en neutrón, positrón y neutrino; o un neutrón en protón, electrón y antineutrino. Esto significa que, en el primer caso, un *quark up* se convierte en *down* en un proceso que libera un positrón y un neutrino; en el segundo ejemplo, un *quark down* se convierte en *up* mientras produce un electrón y un antineutrino. Si —como se supone actualmente— todas estas partículas no estuvieran hechas de nada más, se trataría de un proceso casi mágico de transformación, pero yo me resisto a creer que las cosas funcionen así.

Creo que hay unas cosas más pequeñas que conforman los *quarks* y los leptones. Se trataría de partículas, resonancias o como se les ocurra nombrarlas a los científicos del futuro, realmente fundamentales; serían una

1. Frase genial atribuida a la mítica Tita Michel, haciendo referencia a que lo más pequeño que podemos medir en la actualidad son 10^{-19} metros y solamente estamos seguros de que miden menos que eso.

base común que —al variar en una propiedad física aún desconocida— podría transformarse de *quark* a leptón y viceversa; ¿por qué no ir más lejos? Incluso, hasta cabría la posibilidad de que se convirtieran en bosones.

Hay quienes, desde hace décadas, vienen diciendo que esto es posible. Sostienen que todo estaría hecho de una especie de cuerdas primordiales con diferentes tipos de vibraciones, y que cada una de ellas daría lugar a una de las partículas que hoy consideramos fundamentales. Además, la Teoría de Cuerdas, como se le conoce, implicaría una situación por demás asombrosa: la existencia de muchas dimensiones además de las que conocemos. Hasta donde sabemos con certeza, nuestro Universo tiene tres dimensiones espaciales y una más, que sería el tiempo; las versiones más conservadores de la Teoría de Cuerdas requieren diez dimensiones espaciales más el tiempo, pero también hay otras que consideran un número mayor.

La explicación de por qué no percibimos las dimensiones extra es porque no son macroscópicas, como las cuatro que conocemos, sino que se encuentran enrolladas a un nivel realmente pequeño que aún no ha podido ser estudiado, y que parece que no podrá ser alcanzado pronto. Además, las matemáticas de las cuerdas son tan complicadas que solamente se han obtenido soluciones aproximadas de ecuaciones aproximadas, lo cual da resultados poco confiables para intentar compararlos con experimentos. Aun así, es muy interesante pensar que todas las partículas conocidas podrían formarse a partir de un conjunto de cuerdas vibrando con diferentes frecuencias.

Puede ser que las cuerdas vengan a resolver todo o que, tal como estamos ahora, hayamos llegado al fondo del mundo de las partículas; pero también puede ocurrir que en el futuro nos enteremos de la existencia de algo completamente nuevo, a través de una teoría que aún no

se acerca a pasarnos por la cabeza y cuyo futuro autor pudiera estar leyendo estas líneas, o apenas estar aprendiendo a caminar ante la mirada orgullosa de sus padres, o puede ni siquiera haber nacido. Puede ser que pronto alguien venga a abrirnos los ojos, a generar muchas nuevas preguntas y a seguir ampliando los límites de la ignorancia.

En todo caso, no me cabe duda de que la aventura de las partículas continuará dando de qué hablar.

Referencias

- ASIMOV, Isaac, *Momentos estelares de la ciencia*, Alianza, 1980
- BOWLER, Peter y Iwan Morus, *Panorama general de la ciencia moderna*, Crítica, 2007.
- BROWN, Andrew. *The neutron and the bomb*, Oxford University Press, 1997.
- FEYNMAN, Richard. *QED, the strange theory of light and matter*, Princeton University Press, 1988.
- _____, *Seis piezas fáciles*, Crítica, 1998.
- _____, y Ralph Leighton, *Surely you're joking Mr. Feynman*, Norton & Company. 1997.
- FLORES-Valdés, Jorge, *La gran ilusión II. Los Cuarks*, Fondo de Cultura Económica, 1987.
- GELL-MANN, Murray, *El quark y el jaguar*, Tusquets, 1995.
- GLEICK, James, *Genius, the life and science of Richard Feynman*, Vintage Books, 1993.
- GRIBBIN, John, *Física cuántica*, Planeta, 2005.
- HAN, M.Y, *La vida secreta de los cuantos*, McGraw-Hill, 1996.
- HOOFI, Gerard't, *Partículas elementales*, Crítica, 2001.
- JOHNSON, George, *Strange beauty*, Alfred A. Knopf, 1999.
- JONES, Sheilla, *The quantum ten*, Oxford University Press, 2008.
- LEDERMAN, Leon, *God particle*, Mariner Books, 2006.
- LINCOLN, Don, *The quantum frontier*, Johns Hopkins University Press, 2009.
- LOVET-Cline, Barbara. *Los creadores de la nueva física*. FCE. 1973.
- LOZANO-Leyva, Manuel, *De Arquímedes a Einstein*, Debate, 2005.

PRESTON, Diana, *Antes de Hiroshima*, Tusquets, 2008.

RÉGULES, Sergio de, *Cuentos cuánticos*, ADN, 2000.

www.wikipedia.org



Esta obra fue editada en la ciudad de Zacatecas.
El tiraje fue de 1,000 ejemplares más sobrantes.
Se terminó de imprimir en noviembre de 2013
en los talleres de Formación Gráfica SA de CV.
La producción editorial estuvo a cargo de
Texere Editores SA de CV.
www.texere.com.mx