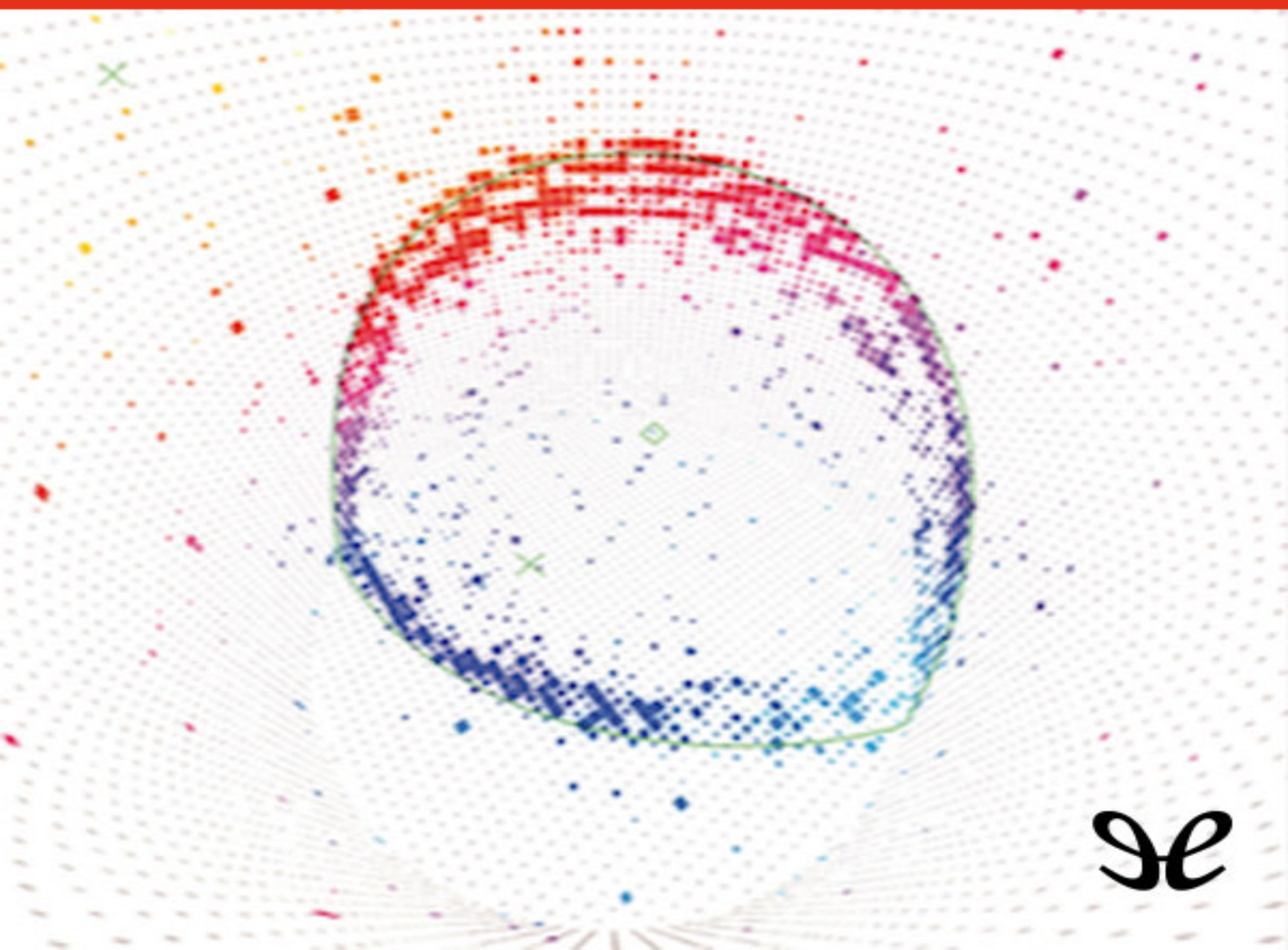


**Frank Close**

# Neutrino

**La partícula fantasma**



En 1930, el físico teórico Wolfgang Pauli postuló la existencia de una diminuta partícula que se emitiría en ciertas transiciones radiactivas: no tendría carga ni prácticamente masa, y apenas interaccionaría con la materia. Pero ¿cómo detectar esa partícula fantasma?

Fue Enrico Fermi quien la bautizó como neutrino, y hoy sabemos que billones de estas partículas extraordinarias, reliquias del *Big Bang* generadas constantemente por el Sol y otras estrellas, atraviesan la Tierra como si no hubiera nada. «Si nuestros ojos fueran capaces de ver los neutrinos —escribe Close—, la noche sería tan brillante como el día: los neutrinos del Sol lucen con la misma intensidad durante el día y durante la noche».

En este relato fascinante, Frank Close nos explica los primeros indicios teóricos que confirmarían la esencia de tal partícula, así como los sucesivos esfuerzos para capturarla y comprenderla. La historia de su descubrimiento no solo involucró a personajes variados, sino que también exigió litros de líquido de limpieza en los depósitos subterráneos de minas situadas a gran profundidad. Por diminutos que sean, los neutrinos traen información sobre remotas estrellas y galaxias desde las profundidades, y hoy ya existe una rama entera de la astronomía consagrada a su estudio, pues a través de ellos ha sido posible explorar los primeros momentos del Universo.



Frank Close

# Neutrino

**ePub r1.0**

**Budapest** 15-05-2020

Título original: *Neutrino*

Frank Close, 2012

Traducción: Joan Vilaltella Castanyer

Editor digital: Budapest

ePub base r2.1



# Índice de contenido

Cubierta

Neutrino

Ray Davis

Prólogo

## 1 UNA SOLUCIÓN DESESPERADA

Radiactividad

Alfa, beta, gamma

$E = mc^2$

Pauli y el neutrino

## 2 VER LO INVISIBLE

La teoría de Fermi

El neutrino empieza a volverse real

## 3 GANAR LA LOTERÍA

Bruno Pontecorvo

Llega Ray Davis

Proyecto Poltergeist

## 4 ¿SIGUE BRILLANDO EL SOL?

Gran bola de fuego

Una nueva fuente de energía

El sol nuclear

## 5 ¿CUÁNTOS NEUTRINOS SOLARES?

Primeras ideas

Un atisbo de esperanza

Llega John Bahcall

## 6 CIENCIA SUBTERRÁNEA

Empieza el trabajo

¿Cuántas SNU?

La «mejora de la piscina»

## 7 UNO, DOS, TRES

¿Quién ha pedido esto?

Jack Steinberger

Historia de dos neutrinos

Leon Lederman y Mel Schwartz

«Post scriptum»: tres neutrinos

## 8 MÁS NEUTRINOS AUSENTES

Todo el galio del mundo

Neutrínografía del sol

Neutrinos ausentes por todas partes

## 9 «SOY TAN FELIZ QUE ME PONDRÍA A BAILAR»

Neutrinos atmosféricos

Neutrinos oscilantes

SNO

## 10 NEUTRINOS EXTRAGALÁCTICOS

Supernova

Neutrinos oscilantes

Minos

Neutrinos de «regreso al futuro»

## 11 RECAPITULACIÓN

El «más difícil todavía» de Reines

Koshiba en Japón

Davis y Bahcall

Bruno Pontecorvo

Crepúsculo

Sobre el autor

Notas

# RAY DAVIS

Con rayos X, que penetran mucho más que la luz ordinaria, puede mirarse dentro de la mano. Con neutrinos, que penetran mucho más incluso que los rayos X, puede mirarse dentro del Sol.

Ceremonia de entrega del Premio  
Nobel, 2002

Ray Davis fue la primera persona que miró dentro del corazón de una estrella. Lo hizo capturando neutrinos, partículas fantasmales que se producen en el centro del Sol y salen despedidas hacia el espacio. Mientras usted lee esto, miles de millones de ellos están atravesando sus ojos sin ser vistos, casi a la velocidad de la luz.

Los neutrinos están más cerca de no ser nada que ninguna otra cosa que conozcamos, y son tan elusivos que son prácticamente invisibles. Cuando Davis empezó a buscar neutrinos solares, en 1960, muchos pensaron que estaba intentando lo imposible. Casi resultó serlo: tendrían que pasar cuarenta años antes de que se demostrara que tenía razón, lo cual le valió el Premio Nobel de Física en 2002, a la edad de ochenta y siete años.

La longevidad es una gran baza en el oficio de los neutrinos. No todos serían tan afortunados.

## PRÓLOGO

En junio de 2006, el periódico *The Guardian* me pidió que escribiera el obituario de Ray Davis. Me sentí sorprendido y honrado cuando, al año siguiente, dicho obituario ganó el premio al «mejor escrito sobre ciencia en un contexto no científico». Estoy seguro de que una de las razones de aquel éxito es que, en cierto modo, el relato de la extraordinaria carrera de Davis se escribió solo.

Un obituario se centra necesariamente en una persona, pero la aventura de los neutrinos solares afectó las vidas de varias personas más, de científicos que dedicaron la totalidad de sus carreras a perseguir esta presa tan elusiva, solo para perder la oportunidad de recibir un Premio Nobel por ironías del destino, mala suerte o, más trágicamente, por haber muerto ya. Porque esta búsqueda duró medio siglo, y Davis ganó su Premio Nobel a la edad de ochenta y siete años. De todos ellos, el personaje más trágico quizá sea el genio Bruno Pontecorvo. Aunque cuando empecé a escribir *Neutrino* esperaba que fuera la historia de Ray Davis, descubrí que Pontecorvo parecía estar ahí, entre bambalinas, con tanta frecuencia que esta historia se convirtió también en la suya. También es la historia de John Bahcall, el colaborador de Davis de toda la vida, a quien, para sorpresa de muchos, no se le incluyó en el Premio Nobel. Así que, con toda humildad, dedico este libro a la memoria de estos tres grandes científicos, cuyas propias vidas atestiguaron en qué consiste realmente la ciencia, y demostraron la afirmación de Thomas Edison de que el genio es «un 1 % de inspiración y un 99 % de transpiración».

Tengo una deuda particular con cuatro de mis colegas, cuyas propias carreras se han centrado en los neutrinos, por aportar



algunos de sus propios recuerdos, y por corregir algunas de mis ideas equivocadas. Si no lo he logrado, la culpa no es suya sino mía. Se trata de Nick Jelley, Peter Litchfield, Don Perkins y Jack Steinberger.

FRANK CLOSE  
Oxford, octubre de 2009

## UNA SOLUCIÓN DESESPERADA

De todas las cosas que componen el universo, la más común y la más rara son los neutrinos. Capaces de atravesar la Tierra como una bala atravesaría un banco de niebla, son tan elusivos que medio siglo después de su descubrimiento todavía sabemos menos sobre ellos que sobre cualquier otro tipo de materia que hayamos visto nunca.

Algunos de estos invisibles fuegos fatuos provienen del suelo que hay bajo nuestros pies, pues los emite la radiactividad natural de las rocas, y otros son el resultado de la radiactividad de nuestros propios cuerpos, pero la mayoría de ellos nacieron en el corazón del Sol, hace menos de diez minutos. En solo unos pocos segundos, el Sol ha emitido una cantidad de neutrinos mayor que el número de granos de arena que hay en todos los desiertos y playas del mundo, y mayor que el número de átomos que hay en todos los seres humanos que han existido. Son inofensivos: la vida ha evolucionado bajo esa lluvia de neutrinos.

Los neutrinos pueden pasar a través del Sol casi con tanta facilidad como a través de la Tierra. Pocos segundos después de nacer en el corazón del Sol, esas hordas han salido por la superficie, y han huido al espacio. Si tuviéramos ojos para ver los neutrinos, la noche sería tan brillante como el día: los neutrinos del Sol brillan sobre nuestras cabezas por el día y desde debajo de nuestras camas por la noche, y lo hacen con la misma intensidad.

No solo el Sol, sino también cada una de las estrellas visibles a simple vista, y otras incontables que vemos con los telescopios más potentes, están llenando el vacío con neutrinos. Allá fuera, en el espacio, lejos del Sol y las estrellas, inundan el universo.

Incluso usted los está produciendo. Las trazas de radiactividad del potasio y del calcio de sus huesos y dientes producen neutrinos. Así pues, mientras usted lee esto, está irradiando el universo.

En conjunto, hay más neutrinos que partículas de cualquier otro tipo conocido, y ciertamente muchos más que los electrones y protones que componen las estrellas y toda la materia visible, lo que nos incluye a usted y a mí. En un tiempo se creyó que no tenían masa y que viajaban a la velocidad de la luz; hoy sabemos que tienen una pequeña masa, pero tan diminuta que nadie la ha medido todavía. Todo lo que sabemos es que, si dispusiéramos de unas supuestas balanzas subatómicas, necesitaríamos por lo menos cien mil neutrinos para igualar un solo electrón. Incluso así, y debido a su amplia cantidad, puede que, juntos, superen la masa de toda la materia visible del universo.

Los neutrinos del Sol que lo estaban atravesando cuando usted empezó a leer esto ya estarán viajando hacia Marte y más allá. Dentro de unas horas cruzarán las lejanas fronteras del sistema solar con rumbo al cosmos sin límites. Si usted fuera un neutrino, tendría muchas posibilidades de ser inmortal, y de no tropezar con ningún átomo en miles de millones de años.

Si le preguntara a un neutrino de las profundidades del espacio sobre su historia, es probable que resultara ser tan viejo como el universo. Los neutrinos que nacieron en el Sol y las estrellas, aunque numerosos, son casi unos recién llegados. La mayoría son restos fósiles del *Big Bang*, y llevan trece mil millones de años viajando a través del espacio, sin que nadie los haya visto.

Los neutrinos están pasando a través de nuestro universo como meros espectadores, como si no estuviéramos aquí. Son tan esquivos que el simple hecho de que conozcamos su existencia es extraordinario. ¿Cómo se revelaron estos fantasmales e invisibles

pedazos de la nada? ¿Por qué los necesita la naturaleza? ¿Para qué sirven?

La naturaleza esconde muy bien sus secretos, pero hay pistas; es cuestión de estar preparados para percibirlas y trabajar con ellas. Hace cinco mil millones de años, cuando se solidificó el cóctel de elementos químicos de una supernova y formó las rocas de la Tierra recién nacida, en el interior de esta quedaron atrapados átomos radiactivos. La radiactividad se produce cuando los núcleos de los átomos se transforman de manera espontánea: el granito no es el mismo para siempre. Desde que la Tierra existe, los átomos de uranio y torio de su corteza se han ido transformando en elementos más ligeros, descendiendo por la tabla periódica hasta convertirse en átomos estables de plomo. Y en este cronómetro natural de la radiactividad nacen los neutrinos. Aquí es donde empieza nuestra historia.

## RADIATIVIDAD

El azar desempeña un papel importante en la ciencia, pero para ganar los premios más brillantes no basta con estar en el lugar adecuado en el momento oportuno: además, hay que saber reconocer los dones de la fortuna. Si Röntgen no hubiera mirado por el rabillo del ojo mientras cerraba la puerta de su laboratorio a oscuras en noviembre de 1895, o si no hubiera vuelto a pensar en la luz trémula que había captado su atención durante un instante, no habría descubierto los rayos X. Röntgen descubrió que cuando un flujo de electrones chocaba contra un cristal podía producir unos misteriosos rayos capaces de penetrar la materia sólida, como por ejemplo la piel. Este extraño fenómeno, que permitía ver huesos rotos como sombras en una emulsión fotográfica, fue el inicio de la ciencia moderna de los átomos, e inspiró los trabajos que llevaron al descubrimiento de la radiactividad.

Aquí también intervino la suerte. La novedad de los rayos X revistió un carácter sensacional, y estos fueron el centro de atención

cuando la Academia Francesa de Ciencias se reunió el 20 de enero de 1896. En aquella reunión se encontraba Henri Becquerel, quien había conservado el interés de su padre por la fosforescencia, la capacidad de algunas sustancias de brillar tras ser expuestas a la luz, lo que equivale a almacenar radiación. Nadie tenía una idea clara de lo que eran los rayos X, pero se discutió largo y tendido acerca de si estaban relacionados con la fosforescencia que se apreciaba en el cristal del aparato de Röntgen. Becquerel se dio cuenta inmediatamente de que era un enigma hecho a su medida. Tenía algunos cristales fosforescentes que había preparado con su padre unos años antes, por lo que se propuso ver si alguno de ellos emitía rayos X. La muestra era un compuesto que contenía potasio, azufre y uranio.

Ese fue su primer golpe de suerte. El elemento uranio acabó resultando crucial.

Puso la sustancia fosforescente encima de una placa fotográfica, envuelta en papel para protegerla de la luz, y las dejó al sol. La luz del Sol cedió energía al material fosforescente pero no a las placas, así que al revelarlas se entusiasmó al ver una imagen borrosa. Cuando colocó una pieza de metal entre el material y la placa, la silueta de la pieza quedó delimitada con claridad. Su reacción inmediata fue suponer que la luz solar había estimulado la emisión de rayos X, los cuales habían penetrado el papel, pero no el metal: de ahí la sombra.

Fue en este punto donde la suerte intervino de nuevo. Llegó el tiempo típico de invierno y, a finales de febrero, París estuvo nublada durante varios días. Sin luz solar, Becquerel no podía dar energía a su muestra. Iba a ser imposible inducir la fosforescencia y, por consiguiente, los rayos X, o eso creía él. Guardó la muestra en un armario esperando un día soleado que no llegaba. Por fin se rindió, y el día 1 de marzo, cansado de esperar, decidió revelar la placa igualmente. Según el testimonio del hijo de Becquerel, Henri quedó estupefacto al darse cuenta de que las imágenes de las

siluetas eran incluso más claras que las que obtuviera antes bajo la luz del Sol<sup>[1]</sup>.

Fuera lo que fuera la radiación, no necesitaba la luz solar. Había aparecido de manera espontánea, sin ninguna estimulación previa. Esto era completamente nuevo. Los rayos X de Röntgen se producían porque una corriente eléctrica proporcionaba energía al cristal. La fosforescencia, porque la luz solar les cedía energía a ciertos materiales. La radiación de Becquerel parecía ser un fenómeno gratuito.

Becquerel había tenido dos golpes de suerte: había usado uranio, que emite radiación sin estimulación previa, y los días oscuros habían sacado a relucir, metafóricamente, el fenómeno. Un tercer golpe de suerte fue no caer en el error de suponer que el oscurecimiento se debía a unas placas de mala calidad. Por supuesto que eso era posible, e incluso probable, por lo que el uso de la pieza de metal fue clave: su silueta demostraba que unos genuinos rayos llegaban desde arriba, y que la imagen de la fotografía no era ningún defecto interno. Esto, por lo menos, no fue suerte, sino un ejemplo de uso meticuloso de la ciencia cuyo resultado fue el descubrimiento de la radiactividad por Henri Becquerel.

Sin embargo, no fue él quien la denominó así (eso llegaría más tarde, con Marie y Pierre Curie), y tampoco tenía ni idea de lo que era. En realidad, la mayoría le hizo caso omiso.

Durante los años anteriores habían aparecido varios fenómenos extraños, como la fluorescencia y los rayos X, así que un nuevo tipo de radiación no parecía un hecho demasiado especial. Esta, sin embargo, iba a revelarse como trascendental.

#### ALFA, BETA, GAMMA

En muchas historias detectivescas, el crimen supuestamente perfecto se resuelve siguiendo alguna pista muy sutil dejada en el lugar de los hechos. Becquerel había hallado un simple borrón en

una placa fotográfica, algo tan modesto que muy bien podría haberle hecho caso omiso, pero iba a resultar que, con ese insignificante soplo de radiactividad, la Naturaleza había revelado el camino hacia los secretos de la creación. Por supuesto, ni Becquerel ni nadie más lo sabía o incluso lo sospechaba en aquel momento. Todo lo que tenía era una imagen nebulosa, y el desafío inmediato estribaba en entender su significado.

Marie y Pierre Curie siguieron la pista de la fuente de radiación separando elementos en la peblenda, una sustancia radiactiva, averiguando qué muestras eran más radiactivas, y refinándolas de manera selectiva hasta que la concentración de radiación aumentó. Como resultado, Marie descubrió un nuevo elemento, el polonio, que era altamente radiactivo. Y mejor aún, también descubrió el radio. Por si hubiera existido alguna controversia sobre la realidad de los fenómenos radiactivos, esta se desvaneció ante el descubrimiento del radio. El radio es tan radiactivo que, al sostenerlo en la mano, se nota el calor que desprende. Este calor demuestra que la radiactividad libera energía de la sustancia de manera espontánea, día tras día. Marie Curie ignoraba, de una manera un tanto ingenua, las implicaciones de ese poder.

Pasarían años antes de que se conocieran los efectos de la radiación en el cuerpo humano, y entonces ya era demasiado tarde: Curie ya mostraba síntomas de haber enfermado por la radiación.

El descubrimiento del radio tuvo dos consecuencias importantes. En primer lugar, demostró que la radiactividad, tal como la denominaron los Curie, no se limita al uranio: es una propiedad de la naturaleza por la cual algunos elementos pueden emitir energía de manera espontánea y sin estimulación previa. En segundo lugar, la ciencia ya no tenía que limitarse a estudiar borrones en placas fotográficas, porque la radiactividad del radio era tan potente que sus efectos podían sentirse, medirse y analizarse. Ahora la ciencia podía avanzar a su escrupulosa manera.

La persona que identificó la naturaleza de la radiación y empezó a aprovecharla fue, casi en solitario, Ernest Rutherford. En 1895,

como estudiante en su Nueva Zelanda natal, había descubierto cómo detectar ondas de radio varios años antes que Marconi<sup>[2]</sup>. Rutherford quedó segundo en el concurso para un puesto académico conmemorativo de la Exposición de 1851 y que daba a los recién titulados la posibilidad de continuar sus estudios en el extranjero. Por suerte para él, en lo que acabaría siendo un instante fundacional y decisivo en la historia de la ciencia, el ganador de aquel año, J. C. Maclaurin, decidió quedarse en Nueva Zelanda por motivos familiares. Así que el premio fue para Rutherford, quien en septiembre de 1895 llegó debidamente a Cambridge con la intención de estudiar las ondas de radio. Estos eran sus planes, pero Röntgen acababa de descubrir los rayos X, y Becquerel no había tardado en seguirlo con su descubrimiento de la radiactividad. J. J. Thomson, jefe del grupo, quien a su vez estaba a punto de descubrir el electrón, le sugirió a Rutherford que investigase acerca de esas nuevas radiaciones. Más o menos al mismo tiempo en que se tomó aquella decisión, lord Kelvin, quien por aquel entonces era el científico de referencia, expresó su célebre opinión de que la radio «no tenía futuro».

Así pues, Rutherford se dispuso a desentrañar el intrincado interior del átomo, y le dejó a Marconi la tarea de demostrar que lord Kelvin se equivocaba. Si Rutherford hubiera ocupado el puesto de Marconi en la historia de la radio, quizá serían otros nombres los que habrían quedado unidos a la secuencia de descubrimientos sobre la naturaleza de la radiactividad, el núcleo atómico, la transmutación de los elementos y el poder que reside en el interior del átomo. Todos ellos han quedado asociados a Rutherford. Su primera contribución a esta nueva ciencia estribó en demostrar que la radiactividad ocultaba más sorpresas de las que nadie esperaba. Para empezar, se presentaba en tres formas diferentes.

Una fina lámina de papel es suficiente para detener parte de la radiación casi de inmediato. Parte de ella, porque queda una radiación más penetrante que solo desaparece de manera gradual. Rutherford reveló las distintas formas con sorprendente simplicidad,



cubriendo el uranio con finas láminas de aluminio, y añadiendo otras progresivamente. Con las primeras tres láminas halló que la intensidad de la radiación se desvanecía de manera gradual: si la capa de aluminio era más gruesa, penetraba menos radiación. Sin embargo, al añadir más capas, la radiación parecía mantener su intensidad, para disminuir de manera gradual solo después de añadir varias láminas más. Se dio cuenta de que tenía que haber «por lo menos dos tipos distintos de radiación, uno rápidamente absorbido, que por conveniencia será denominado radiación alfa, y otro de un tipo más penetrante, que será denominado radiación beta». Más tarde descubrió una tercera forma, a la cual, como era debido, llamó radiación gamma.

Hoy sabemos que estas tres formas de radiación las causan tres fuerzas diferentes. Estas son, respectivamente, las fuerzas fuerte, débil y electromagnética. Si les sumamos la gravedad, tenemos las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, que unen los átomos y la materia, y controlan el funcionamiento del universo. Es extraordinario que Rutherford distinguiera unas de otras en sus más tempranos experimentos atómicos.

Nombrar las cosas da la ilusión de entenderlas, pero no es más que clasificarlas. No obstante, es un primer paso importante, que inspira preguntas como la siguiente: ¿qué causa las diferentes propiedades asociadas a los distintos nombres? Las diferencias acabaron resultando literalmente visibles cuando Charles Wilson puso una fuente radiactiva dentro de una «cámara de niebla». En el vapor sobresaturado de la cámara, las partículas con carga eléctrica y en movimiento dejan rastros efímeros. Wilson los describió como «pequeños rizos y mechones de nube». La radiación alfa dejaba trazas gruesas, y las trazas beta eran más finas y ralas, mientras que los rayos gamma no dejaban trazas, pero se revelaban al chocar con los electrones de los átomos y poner a estos en movimiento. Los campos magnéticos curvaban las trayectorias, demostrando que las radiaciones alfa y beta, respectivamente, consistían en partículas dotadas de cargas positiva y negativa,

mientras que la ausencia de trazas de rayos gamma se debía a que estas no tienen carga eléctrica. Rutherford exclamó que «por fin tenemos un telescopio para mirar dentro del átomo».

Las partículas alfa resultaron ser relativamente masivas y, según sabemos ahora, son componentes de los núcleos atómicos. Consisten en dos protones y dos neutrones estrechamente unidos, y se emiten cuando las fuerzas fuertes que mantienen unido al núcleo atómico son perturbadas. Cuando esto ocurre, el núcleo de gran tamaño de un elemento pesado puede transformarse de manera espontánea en uno más pequeño y algo más ligero, expulsando la partícula alfa. Al tener carga positiva, dicha partícula puede atraer dos electrones con carga negativa y formar un átomo de helio. Ahora sabemos que el helio gaseoso que se ha encontrado en algunas rocas de la Tierra es el resultado de tales transformaciones nucleares.

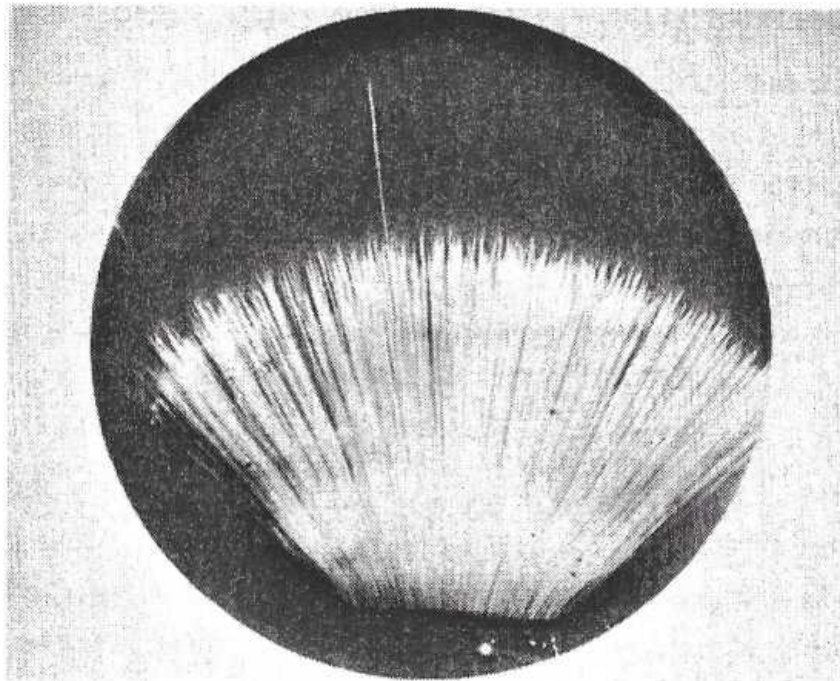


Figura 1. *Estelas de partículas en una cámara de niebla.* © N. Feather/Science Photo Library.

Rutherford adquiriría fama más tarde por el descubrimiento del núcleo atómico, usando partículas alfa para sondear el átomo<sup>[3]</sup>. La radiación beta consiste en electrones, pero estos no son los ya existentes en el átomo, sino unos que se han creado<sup>[4]</sup> a partir de la energía liberada en la transformación nuclear. Este fenómeno es algo parecido a la alquimia<sup>[5]</sup>. Los rayos gamma son partículas de luz, pero esta no pertenece al arco iris, pues sus longitudes de onda son mucho más cortas que las de la luz visible. Así pues, se habían identificado tres variedades de radiación, pero nadie sospechaba que la de tipo beta llevaba consigo un invitado sorpresa.

$$E = MC^2$$

---

En el siglo XVII, Isaac Newton se dio cuenta de la importancia de la energía. Si empujamos algo en ausencia de fricción, empezará a moverse. Si seguimos empujando, acelerará. Newton definió la energía del movimiento, la energía cinética, como proporcional a la magnitud de la fuerza de empuje y a la distancia a lo largo de la cual es empujado el objeto. También era consciente de que la energía podía manifestarse de diferentes maneras. Un cuerpo en lo alto de un acantilado tiene energía potencial; es decir, el potencial para adquirir energía cinética si se cae. La energía potencial es proporcional a la altura sobre cierto nivel de referencia: cuanta más altura, más energía potencial. La aceleración de la caída, por efecto de la gravedad, aumenta la energía cinética a la vez que disminuye la potencial, ya que la suma es constante. Esto es un ejemplo simple de conservación de la energía, y de la transformación de un tipo de energía en otro; en este caso, de potencial en cinética.

La energía puede redistribuirse de muchas otras maneras. En el siglo XIX maduró la termodinámica, que es la ciencia del calor y el movimiento. La energía en forma de calor se puede convertir en energía cinética. El funcionamiento de la máquina de vapor se basa en este principio. Cuando el agua hierve, se convierte en vapor y se expande. Si la expansión se produce en un cilindro cerrado cuyo

extremo es un pistón móvil, la presión del vapor puede mover dicho pistón. Si este está unido a una vara, que a su vez está conectada a una rueda, con el punto de conexión lejos de su centro, tendremos como resultado que la rueda girará. De este modo, el vapor puede impulsar trenes de cientos de toneladas, a velocidades superiores a los cien kilómetros por hora.

En el motor de vapor, como sucede con otros incontables ejemplos, la energía pasa de una forma a otra, pero en total se conserva. Este es el primer principio de la termodinámica, sobre el que se basan industrias enteras. Es una de las leyes naturales más profundas y de mayor alcance.

En 1905, coincidiendo con el entusiasmo acerca de la radiactividad, pero sin relación directa con él, Albert Einstein anunció su teoría de la relatividad especial. Su ecuación más famosa,  $E = mc^2$ , implica una profunda conexión entre energía y masa: la masa ( $m$ ) y la energía ( $E$ ) pueden convertirse la una en la otra según un factor gobernado por la velocidad de la luz ( $c$ ). La ecuación de Einstein expresaba una nueva y profunda manera de almacenar y transferir energía, pero también en este caso se conserva la energía total.

La radiactividad es un ejemplo de aplicación de  $E = mc^2$ . Cuando la materia que hay en el núcleo de un átomo se reorganiza de manera espontánea, de repente se libera la energía que un momento antes estaba atrapada como parte de la masa original. Puede emitirse como rayos gamma, manifestarse como energía cinética al salir despedidos los pedazos del anterior núcleo (como sucede con la radiación alfa), o convertirse en materia, como le pasa a la radiación beta.

En cuanto a las radiaciones alfa y gamma, las cantidades de energía cuadraban. Sin embargo, en el caso de la radiación beta parecían no encajar. La conservación de energía comportaba un determinado valor para la única partícula emitida con cada desintegración de un núcleo radiactivo. Eso era lo que se observaba con las radiaciones alfa y gamma, pero en 1914 James Chadwick

descubrió que la energía de la radiación beta cambiaba de una medida a la siguiente. En vez de ser siempre la misma, la energía de los electrones salientes se encontraba dentro de un intervalo continuo, que oscilaba entre un valor casi nulo y uno máximo.

Niels Bohr, que ya había propuesto el modelo del átomo como electrones «orbitando» alrededor del núcleo central de Rutherford, apoyó con su autoridad una idea radical: que la energía no se conservaba en la desintegración beta.

Esto iba en contra de varios siglos de observaciones, y fue un acto de desesperación. El teórico austríaco Wolfgang Pauli rechazó dicha explicación, y ofreció otra en su lugar. Aventuró que la partícula beta estaba acompañada de una «radiación adicional muy penetrante que consiste en que hay nuevas partículas neutras». Ante tal eventualidad, la energía se conserva, pero no la lleva enteramente una sola partícula, sino que la comparten dos de ellas. Según la teoría de Pauli, la partícula visible, la beta, a veces se llevaba toda la energía disponible sin dejarle ninguna a su compañera neutra invisible, y en otras ocasiones la invisible se llevaba parte de la energía, con lo que le quedaba menos a la partícula beta. Como resultado, la energía de la partícula beta visible podía estar en cualquier punto de un intervalo, en lugar de estar limitada a un único valor.

Esa idea suena a conservadora, y encajaba con los hechos, pero en aquel momento no fue recibida con mucho más entusiasmo que la propuesta de Bohr. El motivo estribaba en que se oponía a la visión imperante sobre la naturaleza de los átomos. Por entonces, el rico tapiz de la naturaleza parecía estar compuesto por solo dos partículas: electrones y protones. Esta simplicidad fundamental prometía una hermosa unificación en el corazón de la materia, mientras que el hecho de introducir una tercera partícula, sin más motivo que resolver un rompecabezas esotérico, le parecía injustificado a muchos.

Pauli nació en Viena en 1900 y destacó por su pensamiento preclaro. Con diecinueve años escribió el mejor libro de texto sobre la teoría de la relatividad especial, que, casi un siglo después, sigue siendo un clásico. A los veintidós años tenía un doctorado y estaba trabajando en los fundamentos de la nueva mecánica cuántica, motivo por el que, tiempo después, recibió el Premio Nobel.

Pauli era también notorio por sus comentarios ácidos sobre el trabajo de otros científicos. Una vez descalificó una idea tan vaga que no se podía contrastar, y por lo tanto carente de utilidad alguna para la ciencia, con el comentario de que no estaba «ni siquiera equivocada». Lo irónico es que esta misma crítica se podría haber esgrimido contra la solución que propuso al misterio de la energía que desaparece en la desintegración beta: después de abogar por la existencia de una partícula invisible, incluso se apostó una caja de botellas de champán a que nadie sería capaz de detectar esa quimera.

Una vez los experimentos de Rutherford habían demostrado que los núcleos atómicos están hechos de partículas constituyentes, la impresión general era que estas consistían en protones y electrones. Así lo creía el mismo Rutherford. El protón era el núcleo masivo en el corazón del átomo más simple, el de hidrógeno, pero se dio cuenta de que las masas de los núcleos de elementos más pesados solo se podían explicar si había, además, alguna partícula neutra de masa similar a la del protón. Rutherford la llamó «neutrón». Imaginó que el neutrón consistía en un protón y un electrón que, de algún modo, estaban estrechamente unidos.

Dicha idea quedó desmontada en 1927, al descubrirse que el electrón y el protón giran sobre sí mismos, y lo hacen siempre a la misma velocidad. El físico Paul Dirac no tardó en ofrecer una explicación teórica de este fenómeno: era consecuencia de la mecánica cuántica y la relatividad<sup>[6]</sup>. Lo que también se hizo evidente fue que un neutrón no podía ser una combinación de ambos. El motivo tenía que ver con lo que se conocía como la «anomalía del nitrógeno».

Se habían medido las velocidades a las que varios núcleos atómicos giran sobre sí mismos, y estas demostraban que el núcleo de nitrógeno debe contener un número par de constituyentes rotatorios. La química indicaba que un átomo de nitrógeno contiene siete electrones, de modo que su núcleo debe tener siete protones para equilibrar la carga eléctrica. Si eso fuera todo, un núcleo de nitrógeno solo habría tenido la mitad de la masa que tiene en realidad, por lo que se necesitaban siete neutrones. Si los neutrones eran individuales, como los protones, entonces  $7 + 7 = 14$ , y se cumpliría la regla de los números pares. Pero si cada neutrón era en realidad un par, el número total de constituyentes sería 21, que es un número impar. La imagen de Rutherford, un protón y un electrón combinados, simplemente no encajaba con los hechos.

Aquí es donde Wolfgang Pauli entra en el relato, al inventar una nueva partícula neutra que, como pensó al principio, podía resolver dos misterios por el precio de una sola partícula.

Pauli realizó su propuesta en una carta del 4 de diciembre de 1930, cuyo principal propósito era disculparse por no poder asistir a un congreso sobre radiactividad en Tubinga porque «soy indispensable aquí en Zúrich para un baile la noche del 6 al 7 de diciembre». Además de los aspectos sociales, muy esbozados, la carta muestra la naturaleza radical de su propuesta y, a la vez, los conocimientos de aquella época. También ilustra entre líneas la manera en que la ciencia puede avanzar mediante una mezcla de genialidad y confusión.

Pauli empezó con el problema de física nuclear según el cual las propiedades del núcleo de nitrógeno no encajaban bien con la idea de que los núcleos solo están hechos de protones. (A decir verdad, este problema no se limitaba al nitrógeno, pues surgió una anomalía similar con el litio). Pauli se dio cuenta de que todo se resolvería si se abandonaba el modelo de Rutherford de la combinación protón-electrón y el objeto neutro se consideraba como una sola partícula, idéntica al protón en todos los aspectos excepto por su neutralidad eléctrica. Afirmó que «existen en el núcleo partículas eléctricamente

neutras a las que llamaré neutrones». Las describió como unas partículas parecidas a los protones, pero sin carga eléctrica, y añadió que «difieren de los cuantos de luz en que no viajan a la velocidad de la luz». El neutrón, dotado de masa y compañero eléctricamente neutro del protón, no tardó en ser descubierto. Lo hizo en 1932 James Chadwick, quien en 1914 también descubriría el comportamiento anómalo de la energía en las desintegraciones beta. Es un constituyente esencial de todos los núcleos (excepto el de hidrógeno, que suele consistir en un único protón). Lo que llamamos isótopos son núcleos con un número dado de protones, lo cual determina el elemento químico, pero con distintos números de neutrones. Así, el uranio 235 y el 238 contienen 92 protones en cada núcleo, y por eso se trata de núcleos de uranio, pero tienen 143 y 146 neutrones respectivamente, con un total de 235 o 238 constituyentes. Hoy en día, al neutrón se le reconoce un papel central en la física nuclear.

Hasta aquí no hay ningún problema respecto al núcleo. Sin embargo, Pauli también afirmó que este mismo neutrón se producía junto al electrón en la desintegración beta. El neutrón moderno es idéntico a su primera propuesta, un constituyente del núcleo atómico. Pero no se trata del misterioso invitado de la desintegración beta, la partícula que ahora llamamos neutrino. No obstante, en 1930 Pauli no sabía nada de esto y llamaba neutrones a ambos, como en la cita que viene a continuación<sup>[7]</sup> (en sus mismas palabras, pero con «neutrón» entre corchetes cuando se refiere a la partícula que acabaría conociéndose como neutrino):

El espectro beta continuo se volvería comprensible con la suposición de que en la desintegración beta se emite un [neutrón] además del electrón, de tal modo que la suma de las energías del [neutrón] y del electrón es constante. [...] Estoy de acuerdo en que mi solución podría parecer increíble porque esos [neutrones] ya se deberían haber visto si existen realmente. Pero solo con osadía se puede ganar. [...] cada solución de este problema debe ser discutida. Luego, queridas personas radiactivas, miren y juzguen.



Hans Geiger, quien había trabajado con Rutherford en el descubrimiento del núcleo atómico, asistió a aquella reunión. Se dio cuenta de que la solución de Pauli al balance energético de la desintegración beta podía funcionar, y le escribió una carta. Años después, Pauli rememoró su emoción al recibirla, pero no parece que en aquel momento le diera mucha importancia, pues no ha sobrevivido ninguna copia de la carta de Geiger<sup>[8]</sup>. Es posible que su entusiasmo disminuyera cuando se dio cuenta de que las partículas neutras implicadas en la desintegración beta no podían ser las mismas de su hipótesis sobre los constituyentes nucleares, los neutrones. Las masas nucleares necesitaban una partícula neutra cuya masa fuera igual, o por lo menos muy similar, a la del protón, y que Chadwick estaba a punto de descubrir. Sin embargo, la explicación de Pauli de la desintegración beta requería una partícula neutra que no tuviera ninguna masa en absoluto, o a lo sumo una insignificante.

Pauli insistió en su idea, y vio las respuestas de otros científicos. Les gustaba a pocos, y las opiniones iban de «simplemente equivocada» a «loca»<sup>[9]</sup>. Fue en octubre de 1931, en un congreso en Roma donde habló con Enrico Fermi, cuando las cosas empezaron a encajar.

Según relató Pauli posteriormente, Fermi enseguida «no tardó en expresar un vivo interés por mi idea». Niels Bohr no estaba tan impresionado. A él no le iba lo de inventar nuevas partículas para resolver problemas fundamentales. Había visto las sutiles maneras en que los balances energéticos podían acabar cuadrando en la física atómica, y por lo tanto no veía ninguna razón por la que la conservación de la energía pudiera no ser válida en el mundo todavía más extraño de la física nuclear. Fermi y Pauli discutieron acerca de esto, pero no les gustó. Bohr parecía aceptar alegremente que la carga eléctrica se conservaba en los procesos nucleares, así que ¿por qué no iba a hacerlo la energía? A Fermi le parecía que la idea de Pauli tenía más sentido.

Cuando, en 1932, James Chadwick descubrió que existe realmente un neutrón en el núcleo, pero con una masa grande, fue una buena y una mala noticia. La buena noticia era que Pauli tenía razón, por lo menos respecto al neutrón en el núcleo. La mala noticia era que no podía ser también la partícula ligera que él quería para explicar la desintegración beta. Sin embargo, la aparición del neutrón había incrementado el número de partículas atómicas en un 50 %, y la idea de inventar una nueva partícula ya no se parecía tanto a una herejía.

Una vez que Chadwick había descubierto el nuevo y genuino componente nuclear, Pauli dejó de llamar neutrón a la partícula con la que resolvía el rompecabezas de la desintegración beta. Esta implica una partícula neutra ligera, como sugería Pauli, pero dicha partícula no existía previamente en el núcleo más de lo que un ladrido existe previamente en un perro. Pauli abandonó el término «neutrón» a su debido tiempo, pero no tenía ninguna alternativa en especial. En cambio, Fermi sí la tenía. Para distinguir la partícula neutra ligera que había propuesto Pauli del neutrón masivo, la llamó «pequeño neutrón» o, en italiano, *neutrino*.

## VER LO INVISIBLE

En 1911, el industrial belga Ernest Solvay invitó a veinte de los físicos más importantes del mundo a un congreso en Bruselas. Fue el primero de los «Congresos Solvay», que se harían famosos por el singular papel que desempeñaron para marcar el rumbo de la ciencia a lo largo del siglo XX. En 1927 y 1930 se abordó la mecánica cuántica, que acababa de aparecer y aportaba las ecuaciones largamente buscadas para explicar el comportamiento de los electrones de los átomos. La intención era que el congreso de 1933 se centrara en la aplicación de la mecánica cuántica a la química. No obstante, un aluvión de hallazgos inesperados obligó a cambiar los planes a última hora. Pauli había postulado la existencia del neutrino en 1930. En 1932 se descubrieron el neutrón y el primer ejemplo de antimateria: el análogo positivo del electrón, llamado positrón. Los experimentos con el primer «colisionador de átomos» habían demostrado que el núcleo atómico tenía una estructura rica y compleja, que podía ser alterada por acción humana, y también por la radiactividad espontánea. En 1933, Irene Joliot-Curie, hija de Marie Curie, y su marido Frédéric Joliot demostraron que, en tales fenómenos de «radiactividad artificial», las desintegraciones beta podían dar lugar al positrón de carga positiva con tanta facilidad como al familiar electrón de carga negativa. Como resultado, dos docenas de los principales físicos del mundo se reunieron en el Congreso Solvay durante la semana del 22 al 29 de octubre de

1933, pero no lo hicieron para hablar de química cuántica sino de una nueva ciencia: la física nuclear. Entre los invitados se hallaban Einstein, por supuesto, así como Rutherford, el padre de la física nuclear, y Marie Curie, que padecía una enfermedad terminal a causa de la radiación. También se encontraban presentes Pauli, Fermi y Bohr. A partir de conversaciones que se produjeron entre los tres últimos durante el congreso empezó a madurarse la idea del neutrino como un concepto científico riguroso. Fue sobre todo Fermi quien aclaró dudas como resultado de lo que había aprendido durante aquella semana. La inspiración le llegó cuando Frédéric Joliot describió su descubrimiento de que las desintegraciones beta podían producirse de dos maneras distintas. Todo el mundo había puesto en práctica hasta entonces las emisiones de rayos negativos, que consistían en los bien conocidos electrones, pero Joliot demostró que habían hallado algunos casos en los que se producía el nuevo positrón. Aparte de la aparición de un positrón positivo en lugar de un electrón negativo, el resto parecía ser bastante similar.

Fermi sobresalía a la hora de formarse imágenes mentales. Joliot le inspiró la visualización del núcleo formado por protones y neutrones, los cuales podían cambiar su naturaleza mediante la desintegración beta. Se dio cuenta de que esto implicaba una profunda simetría. Si un neutrón se transformaba en un protón, entonces la carga eléctrica total quedaría equilibrada por la emisión de un electrón con carga negativa, la familiar partícula beta. Pero ¿por qué no imaginar también que, en las circunstancias adecuadas, un protón de un núcleo pudiera convertirse en un neutrón? En este caso, la carga eléctrica quedaría equilibrada por un rayo beta con carga positiva: el positrón. Para Fermi, los protagonistas de esos procesos nucleares eran el neutrón, el protón y las partículas beta, ya fueran electrones o positrones. Solo importaba que se conservara la carga eléctrica.

Esa fue solo la primera de sus inspiraciones. Todo encajaría con la llegada de nuevas noticias.

Pauli se había dado cuenta de que podía haber una manera de saber si un neutrino ligero acompañaba la emisión de una partícula beta con carga eléctrica. Si el espectro de energía de los rayos beta podía medirse con mucha precisión, podría descubrirse si sus energías continuaban hasta un máximo, y entonces se detenían, o si seguían de manera indefinida. Bohr creía que la conservación de la energía solo era cierta al establecer un promedio sobre un gran número de casos, y se violaba en los eventos individuales. Por consiguiente, el espectro de las energías de las partículas beta podía extenderse sin fin<sup>[10]</sup>. En cambio, si el espectro de energía se interrumpía de manera abrupta para cierta cantidad finita, eso reivindicaría a Pauli. Se tuvo en cuenta su sugerencia de que los físicos midieran el espectro de energía con sumo cuidado en el extremo de altas energías, para determinar si continuaba con suavidad o se detenía de repente. Los resultados se anunciaron en el congreso: lo cierto era que había un claro límite superior al espectro.

A Pauli esto le sonaba a música celestial, y lo convenció de que su idea de que existía un tercer invitado invisible a la fiesta era correcta. En la discusión que siguió, se levantó y anunció su idea del neutrino:

Su masa no puede ser muy superior a la del electrón. Para distinguirlos de los neutrones masivos, el señor Fermi ha propuesto llamarlos «neutrinos». Es posible que la masa propia de los neutrinos sea cero [...] Me parece plausible que los neutrinos tengan espín  $\frac{1}{2}$  [...] No sabemos nada de la interacción de los neutrinos con las otras partículas de materia o con los fotones.

Ya estaba todo a punto para que Fermi formulara su teoría de la desintegración beta en la que el neutrino de Pauli desempeñaría un papel fundamental.

Fermi empezó con ella nada más volver del Congreso Solvay. Para desarrollar su idea tuvo en cuenta todo lo que Pauli había propuesto, junto a lo que había aprendido en el congreso: el papel del neutrón y del protón, la convicción de que realmente había un neutrino en la desintegración beta, y también la nueva teoría de la electrodinámica cuántica. Supuso que la energía y la cantidad de movimiento se conservaban en la desintegración beta, y que la rotación —el momento angular o espín— también se conservaba.

Las partículas tienen un momento angular intrínseco: el espín. La teoría cuántica demuestra que este solo puede adquirir ciertos valores que son múltiplos, o bien impares o bien pares, de una unidad básica. Por razones históricas, dicha unidad básica del espín se conoce como  $\frac{1}{2}$ , de modo que los múltiplos impares son mitades de números enteros, y los múltiplos pares son números enteros. Actualmente, las partículas del primer tipo se llaman «fermiones», por Enrico Fermi, y las del segundo, «bosones», por el físico teórico indio Satyendra Bose. Los protagonistas de nuestra historia serán los fermiones.

El protón es un fermión de espín  $\frac{1}{2}$ . La anomalía del espín del núcleo de nitrógeno había impulsado a Pauli a postular la existencia del neutrón, cuyo espín también es  $\frac{1}{2}$ , para obtener el espín total correcto de dicho núcleo. El electrón también tiene espín  $\frac{1}{2}$ , un hecho que se deduce de los espectros atómicos y del modo en que los átomos responden a los campos magnéticos.

En mecánica cuántica, las reglas del espín dicen que dos mitades hacen un todo pero que, para obtener otra mitad, se necesitan tres. Así pues, la desintegración beta de un neutrón en un protón y un electrón no puede ser todo: el neutrón inicial tiene espín  $\frac{1}{2}$ , de modo que cuando se desintegra debe aparecer una cantidad impar de partículas de espín  $\frac{1}{2}$ . Era, pues, necesario que el protón y el electrón estuvieran acompañados por una tercera partícula, de espín  $\frac{1}{2}$  y sin carga eléctrica: el neutrino.

Fermi había identificado a los protagonistas de la obra. Entonces hizo la primera tentativa de averiguar cuál era el argumento. Su idea

se basó también en la observación de que el neutrón parece un protón sin carga eléctrica, y supuso que el neutrino guarda una relación parecida con el electrón. Entonces usó este paralelismo entre el electrón y el neutrino, y entre el protón y el neutrón, junto a la nueva y exitosa teoría sobre la luz y las partículas con carga eléctrica —la electrodinámica cuántica— como base para su teoría de la desintegración beta. Supuso que las cuatro partículas podían ocupar momentáneamente un mismo punto del espacio y el tiempo. Con arreglo a su esquema, un neutrón podía transformarse de manera espontánea en un protón, y emitir un electrón (la partícula beta) y un neutrino (la partícula fantasma).

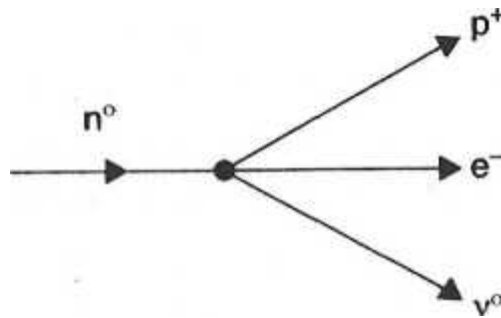


Figura 2. *El modelo de Fermi de la desintegración beta.* En el modelo de Fermi, un neutrón representado por  $n^0$  se convierte en un protón  $p^+$ , un electrón  $e^-$ , y un neutrino  $\nu^0$  en un mismo punto del espacio. Los superíndices denotan la carga eléctrica que tiene cada partícula si tomamos como referencia la carga del protón, y el signo indica si es negativa o positiva.

En la actualidad sabemos que esto no es todo, pues hay una pequeña diferencia entre el lugar donde el neutrón se convierte en protón, y la ubicación donde la energía y la carga eléctrica liberadas se rematerializan como un electrón y un neutrino. No obstante, esta diferencia es más pequeña que el tamaño de un neutrón. En tiempos de Fermi no era posible distinguir el tamaño de un núcleo entero, y menos aún los de un neutrón o un protón individual. De hecho, el modelo de Fermi era tan bueno que incluso hoy en día sigue siendo la introducción estándar a la teoría de la desintegración beta para los estudiantes de la carrera de Física.

Partiendo de esa teoría, Fermi pudo determinar qué aspecto debería tener el espectro de energía de los electrones que se producen en las desintegraciones beta. Todo resultó ser tal como se había descubierto en los experimentos, incluso la interrupción en el extremo de altas energías. Todo junto implicaba que la masa del neutrino podía ser, a lo sumo, una fracción diminuta de la del electrón, y que podía ser incluso nula. Se hicieron medidas incluso más cuidadosas, y al compararlas con la teoría de Fermi demostraron que el neutrino gira a la misma velocidad que el neutrón, el protón y el electrón. Todo lo que Fermi había supuesto estaba resultando cierto.

A pesar de dichos éxitos, muchos físicos no creían en la existencia real del neutrino. Faltaba un neutrino libre que fuera absorbido por algo, que afectara a la materia preexistente, chocara con ella y provocase algún cambio, de modo que revelara su propia existencia. Cuando Fermi publicó su artículo en 1934, se puso de manifiesto la falta generalizada de entusiasmo respecto al neutrino.

Envío el artículo, titulado «Teoría tentativa de los rayos beta», a la revista científica más importante en lengua inglesa, *Nature*. El editor rechazó una de las obras capitales de Fermi en el campo de la física teórica, pues había recibido informaciones de que el manuscrito contenía «especulaciones demasiado alejadas de la realidad para interesar al lector». Medio siglo después, los editores admitieron que esta había sido su peor metedura de pata. Al final el artículo fue publicado en italiano por *Nuovo Cimento*, y poco después en alemán por *Zeitschrift fur Physik*, pero no apareció en inglés.

Lo que Fermi hizo con su teoría fue tomarse en serio la idea del neutrino, y hacer una propuesta basada en el recién descubierto neutrón y las leyes de la mecánica cuántica. Estas permitían que un neutrón de un núcleo se convirtiera de manera espontánea en un protón, y emitiera un electrón (la partícula beta) y un neutrino. Ciertamente es que era especulativo, y quizás imposible de comprobar, como



Pauli había aventurado, pero ¿«demasiado alejado de la realidad» y sin «interés»? Ciertamente no.

Fermi quedó tan agotado con estas vicisitudes que decidió pasarse de la física teórica a la experimental «durante un tiempo»<sup>[11]</sup>. Resultó que los experimentos se convirtieron en un proyecto muy absorbente que lo mantendría ocupado durante muchos años, y a la larga conduciría a los científicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassman, y a la de origen austríaco Lise Meitner, a descubrir la fisión del uranio, con todo lo que eso conllevaría. Sin embargo, la teoría de Fermi no cayó en el olvido y acabó abriendo el camino para que la hipótesis de Pauli sobre el neutrino fuera científicamente comprobada.

#### EL NEUTRINO EMPIEZA A VOLVERSE REAL

La hipótesis de Fermi de que los cuatro protagonistas podían encontrarse e intercambiar sus identidades en un punto hacía algo más que describir la desintegración beta: la teoría implicaba que un neutrino podía chocar contra un neutrón y convertirlo en un protón y un electrón; es decir, como una desintegración beta, pero al revés. De repente, con la teoría de Fermi, el neutrino había dejado de ser una especie de abreviatura de «energía perdida», que en el fondo era todo a lo que la idea de Pauli se reducía hasta entonces. Si el neutrino existe realmente, lleva aquella energía consigo hasta que choca contra algo. La teoría de Fermi había abierto la posibilidad de que el neutrino fuera revelado.

Así como se detecta al protagonista de *El hombre invisible* de H. G. Wells al abrirse paso entre la multitud, del mismo modo el fantasmal neutrino de la teoría de Fermi podía chocar con un núcleo atómico, obtener carga eléctrica y convertirse en un electrón visible. Al observar el objeto que recibe el impacto, y desconocer la presencia del neutrino, se podría interpretar el movimiento brusco de la diana o la aparición de un electrón de alta velocidad como una sorprendente creación espontánea de energía; es decir, lo opuesto a

la misteriosa pérdida de energía en la desintegración beta. Si ambas energías coincidieran con precisión, la explicación natural sería que Pauli y Fermi habían acertado: un agente invisible, creado en la desintegración beta, transportaría energía a través del espacio hasta que el portador fuera destruido y su energía transferida, como el testigo en una carrera de relevos a escala subatómica.

Hasta aquí, todo bien. Sin embargo, muchas buenas ideas perecen tan pronto como se entra en detalles. La teoría de Fermi no solo decía que un neutrino podía adquirir carga eléctrica y darse a conocer al chocar con materia, sino que también predecía en qué circunstancias lo haría, y con qué probabilidad. Aquí fue donde empezaron las dificultades.

En 1934 había suficientes datos sobre desintegraciones beta en varios elementos para que la teoría de Fermi pudiera dictar la probabilidad aproximada de que un neutrino, un electrón, un neutrón y un protón intercambiaran sus identidades en un mismo punto. Resultó ser insignificante<sup>[12]</sup>. Hans Bethe y Rudolf Peierls, dos de los mejores físicos teóricos de las nuevas generaciones, se dieron cuenta de que con dicha información y la teoría de Fermi podían calcular la probabilidad de interacción entre los neutrinos y la materia, un fenómeno que podía interceptar un neutrino en pleno vuelo, y revelarlo<sup>[13]</sup>. Las esperanzas de que la idea de Fermi llevara al descubrimiento del neutrino duraron poco. Bethe y Peierls hallaron que la probabilidad de que los neutrinos se dieran a conocer de este modo eran minúsculas. Su cálculo implicaba que un neutrino producido en una desintegración beta podía atravesar toda la Tierra sin interrupción «como una bala a través de un banco de niebla».

A la interacción entre un neutrino y la materia se la llamó «fuerza débil», pues se había visto que un neutrino tenía una probabilidad insignificante de interactuar con ninguna otra cosa. Al ser eléctricamente neutro, el neutrino no responde a las fuerzas electromagnéticas que mantienen unidas a las moléculas. Tampoco siente las fuerzas fuertes que sujetan a los núcleos atómicos. Solo

siente la gravedad y la fuerza débil. La probabilidad de que un neutrino se diera a conocer chocando contra un núcleo en algún material era tan pequeña que la opinión general coincidía con la conclusión de Bethe y Peierls: «No hay ningún modo posible, en la práctica, de observar al neutrino».

Si cualquier otro que no fuera Pauli hubiera propuesto la existencia de una partícula que fuese invisible a todos los efectos, revelada solo por la «aparente» violación de la conservación de la energía en un misterioso proceso nuclear, el mismo Pauli podría haber rechazado la idea por no estar «ni siquiera equivocada», como hizo en su célebre crítica. Quizá su apuesta de una caja de champán contra la posibilidad de que el neutrino fuera detectado, lo que se convirtió en un comentario autocrítico, lo ayudó a eludir tales descalificaciones. Cada vez daba más la impresión de que Pauli se había inventado un pedazo de nada que desaparecía antes de que nos diéramos cuenta, y que incluso si se rodease el lugar con los muros de una prisión de plomo macizo de un año-luz de grosor, los neutrinos tendrían ocasión de escapar. El neutrino parecía la pesadilla de un físico teórico, una bonita idea destinada a permanecer fuera del alcance de la experimentación por los siglos de los siglos. En cualquier caso, se acabó olvidando la cuestión acerca de si alguna vez podría sacarse al neutrino de su madriguera y demostrar que era real, pues los físicos se vieron implicados en la Segunda Guerra Mundial. La fisión nuclear, el resultado de la desesperación de Fermi tras su intento fallido de publicar en *Nature*, llenaba sus radares figurados. La apuesta de Pauli quedó sin responder durante más de un cuarto de siglo.

## GANAR LA LOTERÍA

### BRUNO PONTECORVO

Cuando Enrico Fermi dejó de teorizar sobre los neutrinos en 1934 y empezó a experimentar con los neutrones, uno de sus colaboradores era un joven llamado Bruno Pontecorvo. Al bombardear núcleos atómicos de varios elementos con neutrones, Fermi esperaba obtener nuevas variedades de núcleos, o incluso de elementos. Los productos de sus experimentos eran invariablemente radiactivos, y al medir dicha radiactividad Fermi esperaba distinguir las nuevas sustancias de las ya conocidas y familiares. Durante el curso de estos experimentos Pontecorvo, que acababa de obtener el título y se enfrentaba a su primera investigación verdadera, se dio cuenta de que la cantidad de radiación parecía variar cuando movía la muestra en su recipiente. Fermi quedó intrigado, pensó en ello durante un día, y formuló las ideas que conducirían a la fisión nuclear, la capacidad de los neutrones para subdividir los núcleos de elementos pesados y liberar enormes cantidades de energía en ciertas circunstancias<sup>[14]</sup>. Diez años después, dichas ideas resultaron fundamentales para el desarrollo de la bomba atómica, y veinte años después fueron la semilla de la energía nuclear. Fermi ganó el Premio Nobel, y Pontecorvo hizo una fortuna con su parte de las patentes.

La biografía que escribió Laura Fermi de su marido revela no solo la brillantez de los jóvenes científicos italianos, sino también las presiones sociales y políticas que recibían en el feudo de Mussolini. Describe cómo Fermi recibió permiso para salir de Italia y recoger su Premio Nobel en Estocolmo, pero ya no regresó. Se fue a Estados Unidos, donde desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de la bomba atómica. Laura Fermi escribió su biografía en 1954. Cuando la leí unos veinte años más tarde, me quedé impresionado por la historia de la desaparición de Pontecorvo.

Pontecorvo, que se había mudado a París en 1936 para trabajar con los Joliot-Curie, no pudo regresar a la Italia fascista a causa de su origen judío. Se quedó en París y, al producirse la invasión nazi, huyó a Estados Unidos. Sus fuertes creencias socialistas pudieron ser la razón por la que no lo invitaron a incorporarse al Proyecto Manhattan, y en 1943 emigró a Canadá, donde trabajó en el laboratorio Chalk River de Ontario. Allí tuvo la idea que definió la historia de los neutrinos durante el resto del siglo XX. Enseguida hablaremos de ello, pero lo que lo convirtió en un caso único fue lo que sucedió a continuación.

En 1948 adquirió la ciudadanía británica y se mudó al laboratorio Harwell en el Reino Unido. En la posguerra, los científicos atómicos estaban desarrollando la bomba de hidrógeno. El Telón de Acero había caído sobre Europa, y Klaus Fuchs, que trabajaba en Harwell, fue desenmascarado como el «espía atómico». Muchos intelectuales, Fuchs entre ellos, se habían convertido en socialistas como reacción al auge del fascismo en la década de 1930, aunque en general esto no implicaba que compartieran los resultados de sus trabajos con el régimen soviético. Pero Fuchs sí lo hizo.

En Estados Unidos, J. Robert Oppenheimer, una figura irrepetible como líder de los equipos aliados que habían construido la primera bomba atómica, fue destituido por sus opiniones políticas, y el senador Joe McCarthy llevó a cabo su notoria caza de brujas contra los «rojos escondidos bajo la cama». El desenmascaramiento

de Fuchs aumentó la paranoia también en el Reino Unido. En medio de este clima febril, Bruno Pontecorvo desapareció.

El 21 de octubre de 1950, los periódicos llevaban la noticia, con especulaciones de que había cruzado el Telón de Acero porque tenía la policía en los talones. El 6 de noviembre, el ministro británico Strauss declaró en la Cámara de los Comunes que pese a la ausencia de «pruebas concluyentes sobre su paradero, [hay] pocas dudas de que está en Rusia». En apariencia no había pruebas. Tres años después, Laura Fermi, una de las amistades más antiguas de Pontecorvo, escribió: «Han pasado ya más de tres años desde la desaparición de los Pontecorvo. No se ha oído ni una palabra de ellos. Nadie los ha visto».

Y así parecía seguir la cosa veinte años después, cuando leí dichas palabras en 1969. Imagínense mi sorpresa entonces cuando, unos días más tarde, vi un artículo sobre neutrinos en la revista científica *Physics Letters*, escrito por un tal Bruno Pontecorvo, cuya dirección era el Instituto de Investigación Nuclear, o JINR, en Dubna, cerca de Moscú. «¿Se habrá dado cuenta alguien?», me pregunté. Claro que sí, y desde hacía tiempo. Había ganado el Premio Stalin en 1953, e incluso había dado una conferencia de prensa en 1955, en la que explicó los motivos de su partida.

Premio Stalin, sí, pero no ganó el Premio Nobel. Como murió en 1993, ya no lo ganará, pero otros nueve científicos ya lo han hecho, como resultado de sus ideas, y otros podrían hacerlo todavía. A lo largo de nuestra historia, Pontecorvo siempre estará allí, entre bambalinas, a menudo con un papel fundamental y, pese a ello, sin llegar nunca realmente al panteón de los inmortales. Como veremos, su «exilio» autoimpuesto en la Unión Soviética impidió que se reconociera la paternidad de algunas de sus ideas. Su primera intervención fue como ayudante, y coincidió con la aparición de la teoría de Fermi sobre el papel del neutrino en las desintegraciones beta. Realizó su primera contribución personal a la historia del neutrino en 1946, al encontrar un modo de capturar un neutrino y demostrar su realidad física.

Todo lo que Bethe y Peierls habían deducido de la teoría de Fermi para el neutrino individual que se produce durante una desintegración beta era correcto: la probabilidad de que se detectara era minúscula. Pero era una afirmación sobre una probabilidad, y Pontecorvo se dio cuenta de que «minúsculo» no es lo mismo que «nada». En 1946, mientras trabajaba en el laboratorio Chalk River de Canadá, escribió un informe que sería fundamental. La creencia generalizada antes de que escribiera su artículo era que detectar un neutrino resultaba imposible. Según la opinión de Pontecorvo, esto parecía «demasiado drástico». Creía que con «instalaciones experimentales modernas» quizá podría conseguirse. Luego esbozó sus ideas sobre cómo hacerlo. Imagine que usted mismo es un neutrino, y que la probabilidad minúscula es la de ganar la lotería nacional. Yo no la he ganado nunca, y es probable que usted tampoco lo haya hecho. Si los lectores de este libro fueran suficientemente numerosos, podría haber algún afortunado ganador entre ellos, pero para que hubiera algún ganador del premio gordo, este libro tendría que estar varias semanas en el primer puesto de la lista de los más vendidos, lo cual es, por desgracia, poco probable. Pero la idea es clara: aunque ni usted ni yo tengamos muchas probabilidades de ganar el primer premio de la lotería nacional, si una cantidad lo bastante grande de personas compra un número, alguna de ellas tendrá suerte. Lo mismo ocurre con los neutrinos: un neutrino individual emitido en una desintegración beta podría recorrer el universo conocido sin interrupción, pero si usted estuviera al lado de una fuente poderosa que emitiera billones de ellos cada segundo, en alguna que otra ocasión uno o dos podrían quedar atrapados en la red atómica.

El radio era la fuente de radiación beta más poderosa conocida, pero incluso en grandes cantidades el número de neutrinos sería tan pequeño que no habría esperanzas de capturar alguno. Se necesitaba una fuente de neutrinos enormemente más poderosa si iba a haber alguna posibilidad de detectar uno de ellos.

Pontecorvo había puesto a Fermi sobre la pista del desarrollo de la energía nuclear, y estaba trabajando en un laboratorio nuclear. No es ninguna sorpresa que se diera cuenta de que producir energía nuclear en un reactor de uranio también debería producir unos diez mil billones de neutrinos cada segundo, y que, con la emisión de una cantidad tan enorme de neutrinos, sería posible capturar unos cuantos a base de paciencia y usando un detector adecuado. Luego resumió sus ideas sobre cómo podría hacerse.

Según la teoría de Fermi, cuando un neutrino choca contra un núcleo tienen que suceder dos cosas. En primer lugar, el neutrino adquiere carga eléctrica y se convierte en un electrón. Sin embargo, detectar este electrón sería imposible: hay electrones en todas partes, y sería difícil distinguir uno que hubiera sido expulsado de un átomo de otro creado por un neutrino. Pontecorvo confiaba en una segunda consecuencia de la teoría de Fermi: al chocar un neutrino contra la materia, la aparición de un electrón con carga negativa sería contrarrestada por un incremento de la carga positiva del núcleo atómico receptor del impacto.

Al incrementarse en una unidad la carga positiva del núcleo, este sería capaz de atraer al electrón con carga negativa. El resultado sería la aparición de un átomo de otro elemento, el siguiente en la tabla periódica. La idea de Pontecorvo era que, si dicho átomo era radiactivo, sería posible detectar su presencia al desintegrarse.

A continuación, enumeró las condiciones necesarias. El material usado para detectar los neutrinos no podía ser muy caro, pues se necesitarían grandes cantidades. El núcleo atómico producido por la colisión tenía que ser radiactivo, pero no demasiado para que no desapareciera antes de que, por así decirlo, se pudiera encontrar la aguja en el pajar. Además, tenía que ser fácil encontrarla si se quería tener alguna posibilidad de éxito.

Dichas condiciones indicaban qué material o sustancia sería mejor. Pontecorvo se dio cuenta de que, si se utilizaba un líquido, y el elemento creado por la colisión del neutrino era químicamente inerte, como el helio, el kriptón o el argón, no habría peligro de que



se produjera una reacción química, y podría extraerse por simple ebullición. El argón resultaba adecuado como elemento inerte, y el cloro está a su lado en la tabla periódica.

Su idea era usar un gran tanque de cloro, presente en algo barato y fácil de obtener como es el líquido de limpieza. Si un neutrino choca con el núcleo de un átomo de cloro, este se transforma en un átomo de argón. Dicho átomo es radiactivo y se desintegra, con lo que emite una radiación que se puede detectar con instrumentos adecuados. Si el tanque de cloro fuera lo suficientemente grande —cientos de toneladas de líquido limpiador podrían ser la solución—, habría alguna posibilidad de ganar la lotería: algunos neutrinos colisionarían, y se produciría argón radiactivo. Los átomos de argón serían como balizas de radio que anunciaran las colisiones de neutrinos. Esta fue la inspiración de Pontecorvo. Todo lo que necesitaba era alguien con suficiente fe para ponerla en práctica.

#### LLEGA RAY DAVIS

---

Ray Davis nació en Washington, D. C. en 1914, y se interesó por la química porque su padre le compraba productos para hacer experimentos en el sótano de su casa. Familiarizado, en todos los sentidos, con la química, la estudió en la Universidad de Yale y obtuvo su doctorado en 1942. Durante los tres años siguientes colaboró en la campaña de guerra probando armas químicas. Con el armisticio entró en la Comisión de Energía Atómica para trabajar en radioquímica, la química de los materiales radiactivos. Estaba acumulando, por azar, una experiencia que pronto contribuiría a forjar su destino.

En 1948 entró en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Long Island, en Nueva York, que estaba dedicado a encontrar usos pacíficos para la energía atómica. Lo primero que hizo al llegar fue hablar con el responsable del departamento de química para saber lo que iba a hacer. Años después, en la ceremonia de entrega del

Premio Nobel, rememoró así aquel encuentro: «Para mi sorpresa y satisfacción, recibí el consejo de ir a la biblioteca, leer un poco y escoger mi propio proyecto, lo que fuese que me atrajera». Así empezó una larga carrera «haciendo justo lo que quería y cobrando por ello».

En una revista de la biblioteca descubrió un nuevo artículo sobre los neutrinos<sup>[15]</sup>. Algunas cosas resultaban obvias de inmediato: se sabía muy poco, era un terreno muy abierto, y era muy rico en problemas. El instante crucial y revelador para Davis llegó al leer la descripción del artículo de Pontecorvo, que proponía una manera de detectar el neutrino y era adecuada para expertos en radioquímica. El rumbo del resto de la vida de Davis quedó marcado en aquel momento.

Pontecorvo proponía que la señal sería la conversión del cloro en argón. Davis sabía que el argón era un gas inerte, fácil de separar químicamente de una gran cantidad de solución con cloro. Los átomos de argón producidos de este modo serían radiactivos, se desintegrarían con una vida media de treinta y cinco años y se convertirían de nuevo en cloro. Davis sabía cómo detectar la radiactividad porque esta ioniza las moléculas de gas, y da lugar a señales eléctricas<sup>[16]</sup>.

A Davis le parecía demasiado fácil para ser verdad. Y acabó resultando así, pero no por culpa de él ni de Pontecorvo.

Brookhaven tenía un modesto reactor propio en sus instalaciones, para realizar pruebas y experimentos. Junto a él, Davis preparó un tanque con cuatro mil litros de tetracloruro de carbono y esperó a que se acumulara argón en cantidad suficiente. Luego analizó los resultados y no halló nada más que las consecuencias de impactos de rayos cósmicos. Las señales que se habían obtenido no eran mayores cuando el reactor estaba funcionando que cuando no lo estaba. Así pues, en 1955 construyó un detector más grande y lo llevó al recién inaugurado reactor nuclear de Savannah River, en Carolina del Sur.

Ahí el resultado fue el mismo: nada. Lo que nadie sabía entonces era que las reacciones nucleares no estaban produciendo neutrinos en primer lugar, sino antineutrinos<sup>[17]</sup>. Así como el electrón tiene un gemelo de antimateria, el positrón, y el protón tiene su reflejo en el antiprotón, del mismo modo todos los tipos de materia tienen su equivalente de antimateria. Los neutrinos y los antineutrinos son como los gemelos Tweedledee y Tweedledum de *Alicia en el País de las Maravillas*. El cloro sería adecuado para detectar neutrinos, pero para detectar antineutrinos se necesitarían tanques llenos de anticloro. Más tarde se vería que este fracaso era, en cierto modo, un triunfo: Davis había demostrado de manera implícita que los neutrinos y los antineutrinos son diferentes. Pero por aquel entonces nadie había demostrado que el neutrino existiera, y a Davis lo invadió el desaliento por no ver nada.

La idea de Pontecorvo era acertada. Un tanque de cloro sería un modo ideal de capturar neutrinos, y si los reactores hubieran emitido grandes cantidades de ellos, seguramente Davis habría descubierto el neutrino en 1955. Cabe imaginar que si hubiera tenido un tanque de anticloro podría haber descubierto el antineutrino de verdad, pero la antimateria en grandes cantidades pertenece al ámbito de la ciencia ficción<sup>[18]</sup>. Por suerte hay otras formas de capturar un antineutrino, pero Davis tendría que esperar a que apareciera una fuente de neutrinos para que su detector con cloro quedara justificado.

#### PROYECTO POLTERGEIST

Hacia el final de la Segunda Guerra Mundial, Fred Reines entró en el Proyecto Manhattan en Los Alamos. En 1944 se convirtió en jefe de grupo en la división de física teórica del laboratorio, y después en jefe de la Operación Greenhouse, que consistía en realizar experimentos de la Comisión de Energía Atómica en el atolón de Eniwetok. Trabajó con los resultados de las pruebas de bombas nucleares que se hicieron allí, en el atolón de Bikini, y en el campo

de pruebas de Nevada. Sus principales esfuerzos se centraron en entender los efectos de las explosiones nucleares.

La idea de buscar indicios del neutrino se le había ocurrido tras leer el artículo teórico de Pontecorvo en 1947, pero no le surgió la oportunidad de llevarlo a la práctica y no se dedicó a ello. Fue en 1951, durante un año sabático y mientras meditaba a qué campo de la física podría dedicarse en los años siguientes, cuando retomó la idea. Después recordó que se había «trasladado a un despacho vacío y austero, mirando un cuaderno en blanco durante varios meses en busca de una cuestión con sentido, que valiera el trabajo de una vida»<sup>[19]</sup>. Su única inspiración le vino de su experiencia con explosiones atómicas. Las bombas atómicas liberan una gran cantidad de neutrones, y cuando estos se desintegran producen neutrinos (o, como sabemos ahora, antineutrinos). Esto ofrecía la posibilidad de que, salidos de entre esas hordas, algunos «neutrinos» se dieran a conocer, aunque fuera de manera esporádica.

Realizó algunos cálculos aproximados y decidió que todo lo que necesitaba era un pequeño detector, de un metro cúbico de tamaño, más o menos. Lo que realmente necesitaba era un experto para consultar.

Durante el verano de 1951, Enrico Fermi visitó Los Álamos. Reines se dio cuenta de que el tener a aquel gran hombre trabajando solamente a unos cuantos despachos de distancia era una oportunidad demasiado buena como para perdérsela, así que reunió valor y fue a preguntarle sobre la detección de neutrinos. Fermi estuvo de acuerdo en que lo mejor era usar una bomba como fuente. Reines pensó que «de momento, bien», y entonces reconoció su problema: no tenía ni idea de cómo construir un detector adecuado. Fermi pensó en ello y le confesó que él tampoco la tenía. Desanimado, Reines se olvidó del asunto hasta que tuvo una charla casual con Clyde Cowan.

Cowan y él iban en un vuelo a Princeton, pero el avión se quedó en Kansas City por problemas con el motor. Paseando por el

aeropuerto, empezaron a hablar sobre cuál podría ser el experimento más difícil de toda la física. Cowan sugirió un problema de física atómica<sup>[20]</sup>, pero creían que otros ya habrían empezado a trabajar en él. Entonces Reines sugirió que deberían centrarse en el neutrino, a lo que Cowan respondió de inmediato: «¡Qué gran idea!».

Aunque una explosión nuclear puede ser una gran fuente de neutrinos, presenta problemas. La idea de tener un detector muy sensible a cien metros de la explosión más violenta jamás provocada por el ser humano resultaba algo extraña. No obstante, ambos habían trabajado con bombas, y estaban seguros de que podían proteger el detector poniéndolo bajo tierra. El director de Los Alamos les dio permiso para trabajar en ello.

Hacer explotar una bomba atómica es un acontecimiento único e irrepetible, de modo que sería fundamental asegurarse de que lo tenían todo bajo control. En particular, Hans Bethe preguntó si podían estar seguros de que podrían distinguir un verdadero neutrino de otras radiaciones emitidas por la bomba, como los rayos gamma y los neutrones. Al intentar responder a esta cuestión se dieron cuenta, en septiembre de 1952, de que había una manera mejor de hacer el experimento. La energía nuclear controlada, en forma de un reactor nuclear, funcionaría igual de bien como fuente.

Un reactor nuclear emitiría, en principio, diez billones de neutrinos por centímetro cuadrado cada segundo, lo que debería ser suficiente. Después Reines dijo que se preguntaba por qué les había costado tanto llegar a «esta conclusión ahora obvia, y cómo se les había escapado a otros». No temían que les robaran la primicia porque «la detección de neutrinos no era una actividad popular en 1952». El 4 de octubre le escribieron a Enrico Fermi explicándole que «hasta la semana pasada no se nos había ocurrido que podíamos hacer [el experimento] en un reactor nuclear», y pidiéndole sus comentarios. Quedó obviamente sorprendido, pues respondió enseguida. Estaba de acuerdo en que sería mucho más simple, y también comentó, con gran sensatez, que un experimento

en un reactor «tendría la gran ventaja de que la medición podría repetirse toda la cantidad necesaria de veces».

Los (anti)neutrinos de un reactor pueden inducir un proceso conocido como «desintegración beta inversa», en la cual un antineutrino choca con un protón, y lo convierte en un neutrón, a la vez que un positrón, que es la versión en antimateria del electrón, se lleva la carga eléctrica del protón. Cowan y Reines no eran conscientes de la sutil distinción entre neutrino y antineutrino —que entonces todavía no se conocía—, pero sabían que, si los «neutrinos» existían, por la conservación de la carga eléctrica los productos del proceso debían ser un neutrón y un positrón. Esto sería suficiente para que su plan funcionara. Tuvieron más suerte o más inspiración que Davis: decídalo el lector.

En 1953 construyeron un pequeño prototipo de detector en los talleres de Hanford Engineering, en el estado de Washington. Lo llamaron Proyecto Poltergeist, es decir «espíritu burlón», por la naturaleza fantasmal y esquiva de los neutrinos. Aquel mismo año tuvieron los primeros indicios de una señal<sup>[21]</sup>, pero la emoción no duró mucho porque continuaban observando señales... ¡incluso cuando el reactor estaba apagado! Estaban viviendo la misma frustración que había vivido Davis, aunque en aquel momento ninguno de ellos estaba al corriente de los esfuerzos de sus rivales.

Cowan y Reines se dieron cuenta de que en Hanford su experimento no podía protegerse de los rayos cósmicos, y las colisiones de estos con los átomos en su detector daban señales parecidas a las que estaban buscando. Aunque tenían la impresión de haber identificado un neutrino libre, necesitaban un experimento mejor para llegar a una conclusión más definitiva. En este punto, su historia mantiene curiosos paralelismos con la de Davis, pues en 1955 ellos también construyeron una versión más grande del detector y se lo llevaron a Savannah River. Allí pudieron situarlo a doce metros bajo tierra, bien protegido de los rayos cósmicos, pero a solo once metros del centro del reactor.

La idea de Poltergeist era detectar dos emisiones distintas de rayos gamma, una luz que va mucho más allá del espectro visible. Estas emisiones debían producirse con una diferencia de cinco microsegundos en el caso de que se capturase un (anti)neutrino. La consecuencia inmediata de un evento de tales características sería la aparición de un positrón y un neutrón. El positrón quedaría aniquilado casi instantáneamente con un electrón, pues los electrones están por todas partes. Esto produciría dos rayos gamma. La segunda emisión llegaría cuando el neutrón fuera capturado por el núcleo de un átomo de cadmio en tanques de cloruro de cadmio. Para capturar el neutrón tendrían que frenarlo sucesivas colisiones, lo que llevaría unos cinco microsegundos. De ahí la diferencia entre ambas emisiones de rayos gamma.

Y esto fue exactamente lo que ocurrió. El fondo de rayos cósmicos era mínimo, y quedó superado por la radiación del reactor. En el verano de 1956, Poltergeist registró emisiones de rayos gamma separadas por 5,5 microsegundos. El 14 de junio, Cowan y Reines le enviaron un telegrama a Pauli en el que le anunciaban que finalmente habían hallado el neutrino cuya existencia él había postulado un cuarto de siglo antes. La noticia dio la vuelta al mundo. Uno de mis primeros recuerdos sobre física es de aquel año, al oír, en la radio, que el neutrino había sido descubierto.

Años más tarde, Reines le recordó a Bethe su afirmación de 1934, junto a Peierls, de que «en la práctica, no hay manera posible de observar un neutrino». Con una sonrisa, Bethe respondió: «Bueno, no debería usted creer todo lo que lee en las revistas»<sup>[22]</sup>.

Después del descubrimiento, Reines dedicó toda su carrera a comprender las propiedades y las interacciones de los neutrinos. En 1995 recibió el Premio Nobel por los descubrimientos que había efectuado a lo largo de cuarenta años. Pero Cowan había muerto en 1974, y a muchos les pareció que el reconocimiento por aquel descubrimiento tendría que haber llegado años antes. Sin embargo, ganaron la caja de champán que Pauli había apostado hacía tanto tiempo. Ray Davis y Pontecorvo tendrían que esperar.

## ¿SIGUE BRILLANDO EL SOL?

Ni siquiera durante los días más nublados dudamos de que el Sol sigue ahí. Cuando preguntamos si sigue brillando el Sol queremos saber si todavía se lo puede ver entre las nubes, no si ha desaparecido para siempre. Pero en la década de 1970 algunos científicos se plantearon durante un tiempo la posibilidad de que se hubiera agotado el combustible del Sol, de que el astro rey estuviera en las últimas, y que hubiera empezado la crisis energética definitiva.

La luz del Sol tarda solo ocho minutos en llegar a la Tierra, así que su radiante superficie demuestra que por lo menos sus capas exteriores estaban brillando hace muy poco. La temperatura de esta luminosa región visible del Sol es de unos 6000 grados, más caliente que un alto horno, aunque no muchísimo más. Tan deslumbrante intensidad oculta su interior a la vista.

Los orígenes de esta luz se hallan a gran profundidad. La energía del núcleo rebota durante miles de siglos antes de llegar a la superficie. Lo que se puede ver hoy es el resultado final de unas reacciones que se produjeron hace más de cien mil años. Si el corazón del Sol ya está agotado, podría pasar algún tiempo antes de que viéramos disminuir su intensidad. Y esto es lo que empezó a preocupar a los científicos hace entre treinta y cuarenta años.

Estas son algunas de las ideas que se propusieron. En 1973, Andrew Prentice sugirió que el Sol había agotado su combustible,



dejando un núcleo de helio. En 1975, Fred Hoyle sugirió que su núcleo contenía muchos elementos pesados que habían sobrevivido al *Big Bang* y habían atraído un halo de hidrógeno durante la formación del sistema solar, hace cinco mil millones de años. Y ese mismo año, otro grupo de teóricos sugirió que había un agujero negro en el centro del Sol<sup>[23]</sup>. En 1980 escribí un artículo sobre este asunto en la revista científica *Nature*, y lo titulé «¿Sigue brillando el Sol?»<sup>[24]</sup>. Esto captó la atención del que por aquel entonces era el programa estrella de la BBC sobre ciencia, *Tomorrow's World* («El mundo del mañana»), y se habló de ello en todo el mundo.

¿A qué se debía tanto alboroto? ¿Por qué brilla el Sol? ¿Y qué tienen que ver los neutrinos con todo esto?

## GRAN BOLA DE FUEGO

Saber cómo se las ha arreglado el Sol para producir tanta energía día tras día desde que la Tierra existe es una de las cuestiones más antiguas de la ciencia. Charles Darwin incluso empezó a dudar de su obra *El origen de las especies*, porque ni la física ni la química de hace ciento cincuenta años podían explicar cómo habían durado el Sol y la Tierra tanto tiempo como requerían la geología y su teoría de la evolución. La explicación definitiva no nos ha llegado hasta el siglo XXI.

Los antiguos egipcios pensaban que el Sol era una bola de fuego. Esta era una extrapolación natural a partir de su limitada experiencia, aunque no parece que tuvieran ninguna opinión acerca de cuál era su combustible. En el siglo V a. C., el filósofo griego Anaxágoras fue el primero en proponer una teoría.

Las «estrellas fugaces» son pedazos de roca que han entrado en la atmósfera terrestre a una velocidad de varios kilómetros por segundo. La fricción los pone al rojo vivo mientras caen, y algunos son lo bastante grandes como para que sus restos lleguen al suelo en forma de meteoritos. Hace dos mil quinientos años, Anaxágoras encontró uno recién caído. Era metálico, y tan caliente todavía que

Anaxágoras supuso que provenía del Sol. Esto le dio una repentina inspiración: el Sol tenía que estar hecho de hierro al rojo vivo. Esa fue la teoría comúnmente aceptada durante casi dos milenios.

Esta imagen tan simple del Sol empezó a generar las primeras dudas hace apenas doscientos años.

Llegó la Revolución Industrial y, con ella, una comprensión cada vez mayor de la termodinámica y del significado de la conservación de la energía. Para mantener los altos hornos en funcionamiento, había que aportar combustible de manera continuada. Si se dejaba a su aire, el hierro fundido de las acerías se enfriaba con rapidez, por lo que los científicos eran conscientes de que ni siquiera el Sol podría mantenerse caliente para siempre. Fue en este mismo período de tiempo cuando los descubrimientos geológicos, por un lado, y la llegada de la teoría de la evolución de Darwin, por otro, apuntaron a una idea común: la edad de la Tierra tenía que ser de cientos de millones de años, y no de miles de años. Pero las leyes físicas conocidas no permitían explicar cómo podía el Sol brillar desde hace tanto tiempo.

Hacia 1850 John Waterstone, un maestro de escuela, demostró que la energía de las reacciones químicas solo podría haber alimentado el Sol desde la Edad de Piedra, hace unos diez mil años. Como el Sol había existido mucho más tiempo, tenía que estar actuando otra fuente de energía. El único posible candidato conocido por aquel entonces era la fuerza de la gravedad. Los materiales, por ejemplo, rocosos, que cayeran bajo la fuerza de gravedad del Sol, ganarían velocidad. Al chocar con el Sol y detenerse, la energía de movimiento se convertiría en calor, de modo parecido al calentamiento de los frenos y los neumáticos de un coche cuando se detiene bruscamente. Waterstone sugirió que algunos meteoritos procedentes del espacio caían al Sol, lo que producía calor y daba energía al horno solar.

Después de formular esta ingeniosa idea, hizo los cálculos y se dio cuenta de que la cantidad de meteoritos no era suficiente. Así que refinó la idea, y propuso que el Sol mismo se contraía bajo su

propio peso, y producía calor. En 1853 dio una charla al respecto en la reunión anual de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia. William Thomson era uno de los oyentes, y quedó claramente impresionado. Thomson desarrolló la idea en su forma más precisa, y descubrió que ni siquiera en tal supuesto le salían las cuentas. Incluso consideró la posibilidad de que el Sol consumiera los planetas uno tras otro, pero esto tampoco bastaba. Aun capturando Mercurio y Venus, esto solo le daría energía para un centenar de años, y consumir todos los planetas no le daría más que tres mil años de vida.

En 1860, Thomson retomó una vez más la idea del Sol menguante, y estudió cómo podría colapsarse produciendo calor durante el período de tiempo más largo posible<sup>[25]</sup>. En 1862, en un artículo aparecido en *Macmillan's Journal*, Thomson llegó a la conclusión de que la edad del Sol a duras penas podía ser «mayor de cien millones de años».

Un Sol con una vida finita implicaba a la vez un futuro apocalipsis y un límite a la historia, lo que acarrearía consecuencias para las teorías de Darwin y los geólogos, que se estaban planteando escalas de tiempo más largas. En la reedición de *El origen de las especies*, Darwin eliminó toda referencia a escalas de tiempo. Ya en 1869 había quedado tan impresionado por el análisis de Thomson que le había escrito a Alfred Russel Wallace, codescubridor de la selección natural, que las implicaciones que el trabajo de Thomson tendría para establecer cuál era la edad del mundo «son desde hace un tiempo una de mis preocupaciones más dolorosas».

Años más tarde, en 1897, Thomson (entonces ya lord Kelvin) refinó sus cálculos y anunció que la edad más probable del Sol y de la Tierra era de unos veinticinco millones de años, lo cual empeoraba aún más la paradoja. Así, la evolución, la geología y la física estaban en conflicto a menos que, como añadió de manera profética, «haya fuentes actualmente desconocidas para nosotros en el gran almacén de la creación».

Al hacer estos cálculos, supuso de manera implícita que la materia es similar en el Sol y en la Tierra. Así, resulta irónico que, en 1897, otro Thomson (J. J. Thomson, sin parentesco con el anterior) hubiera descubierto que los átomos tienen una estructura interna, pues contienen electrones. Esto significaba que los átomos podrían ser diferentes en el calor abrasador del Sol que en la Tierra. También era posible que siguieran nuevas leyes a su vez. Además, el descubrimiento de la radiactividad por Becquerel, el año anterior, indicaba que en la naturaleza se podía producir energía radiante de manera espontánea, por medios todavía sin identificar. Pero parece que, en aquel momento, ni lord Kelvin ni nadie más pensó en dichas posibilidades para resolver las paradojas.

#### UNA NUEVA FUENTE DE ENERGÍA

Aunque Becquerel había descubierto la radiactividad, al principio nadie la consideró algo especialmente importante. Durante las últimas décadas del siglo XIX había aparecido un amplio abanico de radiaciones extrañas, como la fluorescencia y los rayos X, de modo que los «rayos de Becquerel» parecían ser otra radiación más que añadir a la lista. Solo a raíz de los trabajos de Ernest Rutherford se comprendieron en su plenitud las implicaciones de la energía latente en el átomo, de las cuales la radiactividad era solo una parte. El nombre de Rutherford quedará asociado para siempre al desentrañamiento de la estructura del átomo. Prácticamente el único aspecto en el que se equivocó en los siguientes treinta años fue en su juicio según el cual si alguien pensaba que había energía útil dentro del núcleo atómico es que tenía la cabeza en las nubes. En realidad, la energía nuclear es el origen de los días soleados.

Cada uno a su manera, todos los descubrimientos de Rutherford iban a conducir al neutrino. El más inmediato para nuestro relato es su primer resultado: desentrañar la naturaleza de la radiactividad.

Como hemos visto, Rutherford identificó distintas formas de radiactividad. La forma alfa consistía en partículas que resultaron

ser núcleos de átomos de helio. Esto explicaba una misteriosa observación: el hallazgo de trazas de gas de helio en minerales que contenían uranio.

La radiactividad tenía la misma potencia en lo más profundo de oscuras minas que a plena luz del día, lo cual demostraba que la energía debía proceder del interior de los propios átomos. Rutherford también había descubierto que, en los fenómenos radiactivos, unos elementos podían convertirse en otros. Al relacionar todo esto, tuvo la revelación esencial: la emisión continua de energía en el fenómeno de la radiactividad proviene de los cambios en la estructura interna de los átomos. En primer lugar, Rutherford demostró que cuantas más partículas alfa se emitían, mayor era la energía radiada. La radiactividad natural está presente por doquier tanto en el aire como en las rocas que hay bajo nuestros pies. La idea de que la radiactividad podía calentar la Tierra empezó a afianzarse tras el descubrimiento del radio. El radio se mantiene caliente de modo natural y sigue emitiendo calor sin enfriarse hasta alcanzar la temperatura ambiente. Aquí se hallaba la primera pista de que los cálculos de lord Kelvin sobre la edad de la Tierra, basados en la termodinámica, podían ser incompletos.

Rutherford se dio cuenta de que la emisión continua de calor por parte del radio era el indicio de la existencia de una nueva fuente de energía, y de que la paradoja de Kelvin podía evitarse. En mayo de 1904 lo anunció en una charla en la Royal Institution. En la sombría sala, Rutherford vio a lord Kelvin entre el público y pensó que tendría dificultades cuando llegara a la última parte de su charla, que trataba sobre la edad de la Tierra, un asunto respecto al cual tenían puntos de vista radicalmente diferentes. Para alivio de Rutherford, lord Kelvin se durmió hasta el momento decisivo, y entonces, según recordó Rutherford más tarde, «vi al viejo zorro incorporarse, abrir un ojo y echarme una torva mirada». Pero la inspiración llegó justo a tiempo, y Rutherford anunció que Kelvin había limitado la edad de la Tierra «suponiendo que no se descubriera ninguna nueva fuente de energía. Esta profética

aseveración se refiere a lo que estamos discutiendo esta noche: ¡el radio! El anciano me sonrió»<sup>[26]</sup>.

Kelvin había supuesto que el planeta no es más que un cuerpo que se enfría, pero el argumento de Rutherford estribaba en que la radiactividad proporciona calor dentro de la Tierra, de manera continuada. Como el planeta tiene esta fuente de energía interna, su edad puede ser mucho mayor que la que había calculado Kelvin. A fecha de hoy hemos conseguido medir con sumo cuidado el ritmo al que los elementos, como el uranio, se desintegran radiactivamente. Resulta que la mitad de una muestra de uranio tarda unos cuatro mil quinientos millones de años en desintegrarse<sup>[27]</sup>. Si medimos los ritmos correspondientes a otros elementos, y comparamos las abundancias relativas en los minerales, es posible determinar el tiempo que ha transcurrido desde la formación de la muestra original. Esto sitúa la edad de la Tierra en unos cuatro mil quinientos millones de años, que es un resultado acorde con los indicios geológicos y evolutivos. También se han encontrado meteoritos con edades cercanas a los cinco mil millones de años. Todo esto encaja con la idea de que el sistema solar empezó a existir hace unos cinco mil millones de años, y de que el Sol brilla desde entonces.

Aunque el calor de la radiactividad explica la edad de la Tierra, y esta nueva fuente sugiere una manera de que el Sol obtenga energía, todavía falta mucho para resolver exactamente el problema de cómo lo consigue.

## EL SOL NUCLEAR

---

Como los elementos radiactivos pueden emitir energía continuamente, la primera suposición natural era que el Sol estaba hecho de materiales radiactivos. En 1903, William Wilson, un astrónomo inglés, calculó que unos pocos gramos de radio por metro cúbico del Sol serían suficientes para explicar su potencia. Ahí estaba la primera demostración de que la energía solar y la radiactividad podían estar relacionadas, y la cantidad de sustancia

necesaria como fuente de energía era razonable. Sin embargo, esta idea se descartó rápidamente al no hallarse indicios de la existencia de radio en el espectro solar. Fuera lo que fuera responsable de la energía solar, no era el radio.

El elemento más célebre que se ha asociado a la luz del Sol es el helio. El helio recibió este nombre por Helios, el dios del Sol, pues se había descubierto en el espectro de la atmósfera solar y está claramente presente en el Sol. No obstante, el helio no es radiactivo, aunque la radiactividad lo produce, pues las partículas alfa son núcleos de átomos de helio. Esto estimuló la idea de que el helio podía ser el residuo, o las cenizas, del proceso principal de producción de energía en el Sol. Sin embargo, había un problema: en el espectro solar no había indicios de ninguno de los elementos radiactivos conocidos por emitir partículas alfa. Sea cual sea el origen del helio en el Sol, no es la radiactividad, como sucede en la Tierra.

El principal avance llegó dos años después, cuando la teoría de la relatividad de Einstein apareció con su famosa ecuación « $E = mc^2$ », cuya consecuencia es que todas las formas de materia tienen energía latente. Einstein puso de relieve que, si un cuerpo emite una cantidad  $E$  de energía, su masa  $m$  se reduce en una cantidad  $E/c^2$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. En 1913, Rutherford, que había descubierto el núcleo que se halla en el corazón de cada átomo, comentó que, a las enormes temperaturas del Sol, los elementos que en la Tierra parecían estables podrían comportarse de modo muy diferente, y cambiar de un tipo a otro. Al hacerlo, parte de su masa podía convertirse en energía radiante, por lo que, en consecuencia, la masa del Sol disminuiría a lo largo de los eones. Esto no es tan sorprendente como parece. Las reacciones nucleares que transforman los elementos dan mucha energía a partir de una diminuta cantidad de materia, porque la velocidad de la luz, la  $c$  en  $E = mc^2$ , es muy grande. Si solo el 1 % de la masa del Sol se transformara en energía, este podría brillar durante un billón de años. Había nacido la idea de que el Sol es un horno nuclear, pero

tendrían que pasar varios años para que se encontrara la explicación de cómo funciona realmente.

La teoría moderna sobre la luz solar empezó en 1920, con una revelación de *sir* Arthur Eddington, profesor de astronomía en Cambridge. Como acabamos de ver, Rutherford ya había sugerido que a grandes temperaturas podían producirse transformaciones entre elementos que en la Tierra consideramos estables. Aunque no lo dijo de manera explícita, esto abría la posibilidad de que el helio del Sol fuera el resultado de una reacción nuclear desconocida en la Tierra. Y en esto estribaba la propuesta de Eddington: el Sol genera calor y luz transformando hidrógeno en helio.

Tuvo la idea a partir de un descubrimiento que su colega Francis Aston había realizado en el laboratorio Cavendish. Aston había descubierto que la masa de un átomo de helio es una cuarenta y dosava parte inferior a la masa de cuatro átomos de hidrógeno. Esto fue lo que le dio la pista a Eddington. ¿Podía ser el helio que se había descubierto en la atmósfera solar el residuo de la transformación del elemento más simple de todos, el hidrógeno, del cual está hecho el Sol? Cada vez que cuatro protones —los núcleos de los átomos de hidrógeno— se unen en el interior del Sol, pueden dar lugar a un átomo de helio y «la parte en cuarenta y dos» de masa que se pierde se convierte en energía radiante. Es la  $E = mc^2$  de Einstein en acción.

Las preguntas obvias son dos: ¿por qué no ocurre esto en la Tierra? Y ¿qué tiene el Sol de especial?

Hay una propiedad fundamental de la electricidad según la cual las partículas con carga eléctrica del mismo signo se repelen. Todos los protones tienen carga eléctrica positiva, de modo que se resisten a unirse. Para obligar a dos protones a juntarse y dar lugar a la semilla de un átomo de helio, debe superarse esta fuerza repulsiva. A temperaturas terrestres, los protones son prácticamente estacionarios y no tienen oportunidad de chocar unos con otros. Como resultado, a bajas temperaturas el hidrógeno no se fusiona de modo natural para producir helio.



Las estrellas, como el Sol, son muy distintas a la Tierra. Su estabilidad es fruto del equilibrio entre la tendencia de la estrella a colapsarse bajo su propio peso y la violenta energía térmica que hay en su interior. Se calculó que la temperatura en el centro del Sol tenía que ser de unos catorce millones de grados para poder explicar su estabilidad, tamaño, masa y brillo. A tales temperaturas, los protones se mueven con gran rapidez, y pueden acercarse lo suficiente como para unirse, o fusionarse, antes de que la repulsión eléctrica los frene y los separe. Así, en el centro del Sol, los protones pueden juntarse unos con otros y transformarse en helio.

Eddington había sugerido cómo produce energía el Sol, pero sin dar detalles. La teoría completa no llegó hasta 1939, cuando Hans Bethe publicó el artículo «Producción de energía en las estrellas»<sup>[28]</sup>.

Según la leyenda, Bethe resolvió el problema durante un viaje en tren desde Washington, D. C. hasta Cornell, al norte de Nueva York. Físicos y astrónomos se habían reunido en Washington para discutir cómo producen energía las estrellas. Bethe era un joven físico nuclear, y ya un experto en transformaciones nucleares, pero hasta que asistió a esa conferencia no se dio cuenta del interés en la energía estelar y de la opinión general de que las reacciones nucleares tenían que estar implicadas. El reto consistía en encontrar ejemplos de transformaciones nucleares que produjeran suficiente energía como para mantener la emisión del Sol, pero no tan rápido como para que el Sol se autodestruyera. Por lo tanto, el objetivo era encontrar las reacciones con el comportamiento justo, ni demasiado calientes ni demasiado frías: justo las adecuadas para mantener el horno ardiendo de manera estable a catorce millones de grados.

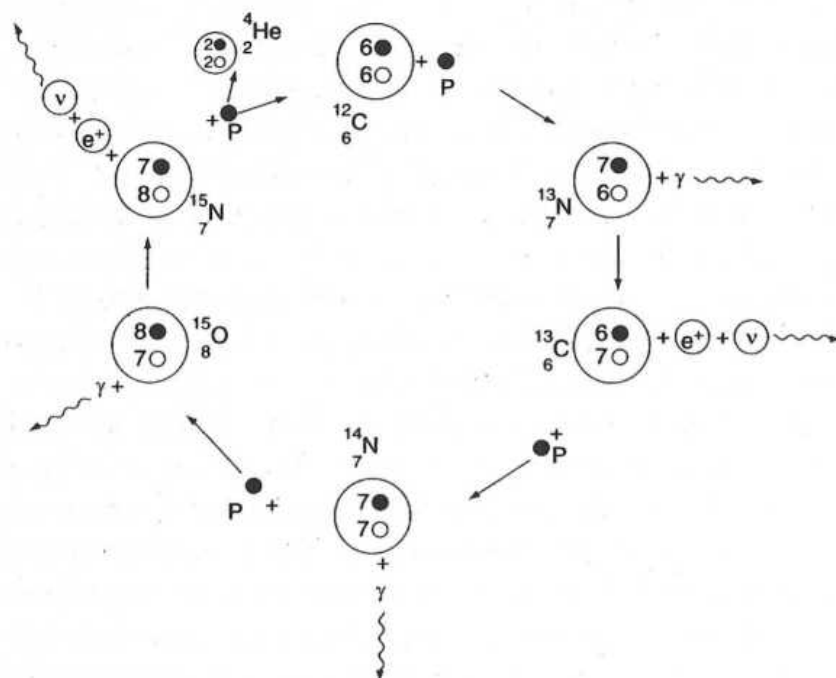


Figura 3. *El ciclo CNO*. El ciclo CNO (carbono, nitrógeno y oxígeno) es el proceso dominante de producción de energía en las estrellas con más masa que el Sol. El resultado es la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno (protones) para formar un núcleo de helio, denotado por He. Los núcleos de los elementos que intervienen se denotan mediante los símbolos H, He, C, N, O. Los superíndices denotan el número total de constituyentes (protones y neutrones) y los subíndices el número de protones. La letra g (gamma) denota un fotón, y n un neutrino. Este proceso solo produce neutrinos de energía relativamente baja. Las líneas onduladas ilustran la emisión de energía en forma de fotones y neutrinos por parte de la estrella. Los círculos negros representan protones, y los círculos blancos, neutrones.

Dotado de la confianza de los jóvenes, Bethe pensó que este debía de ser un problema fácil de resolver dada su experiencia en física nuclear. Así pues, se puso el reto de lograrlo en el viaje en tren de vuelta a casa, preferiblemente antes de que anunciaran la hora de comer. Logró descubrir el ciclo CNO<sup>[29]</sup>, bastante diferente de lo que había sugerido Eddington. «CNO» significa «carbono, nitrógeno y oxígeno», y el ciclo se produce cuando los protones de una estrella que contiene carbono lo convierten primero en nitrógeno, luego en oxígeno, y luego de nuevo en carbono, debido a la emisión de helio (véase la figura 3). Era una bonita teoría: se producían energía y

helio. Helio, el elemento que se había descubierto en Helios, el Sol. Parecía perfecto.

En un vagón de tren, con lápiz y papel, Bethe había resuelto una parte importante del enigma de cómo funcionan las estrellas. Mientras una estrella tenga carbono como catalizador, los protones sueltos pueden transformarse en helio y energía, dejando el carbono disponible para estimular nuevas fusiones. Esto estaba muy bien, pero llevaba a la pregunta: ¿de dónde salía el carbono? Su teoría explicaba cómo podían brillar las estrellas más calientes que el Sol, y aproximadamente un 50 % mayores, pero pronto se dio cuenta de que ese modelo no era aplicable al Sol, más pequeño y frío, y donde, según sabemos ahora, el carbono es escaso. Tenía que intervenir otro proceso.

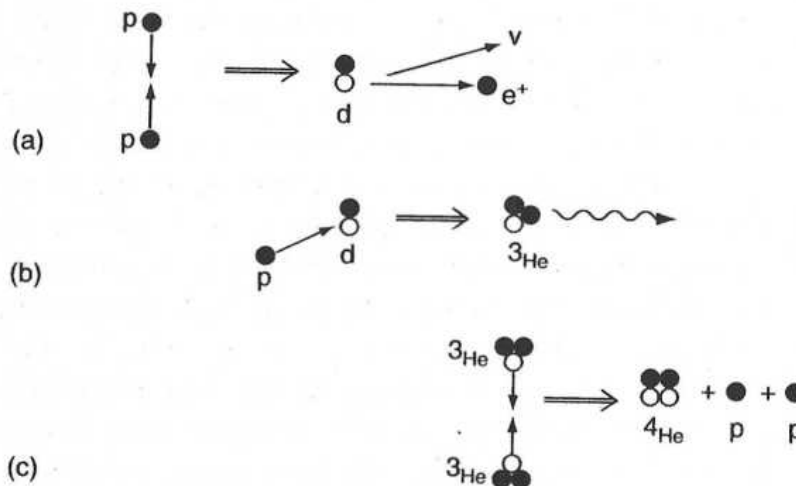


Figura 4. *La reacción en cadena protón-protón (pp) en el Sol.* Dos protones representados por  $p$  se fusionan y dan lugar a un deuterón (que consiste en un neutrón, el círculo blanco, y un protón, el círculo negro) junto a un positrón ( $e^+$ ) y un neutrino. En (b) otro protón choca con el deuterón, y lo convierte en helio-3 y un fotón. En (c) vemos la consecuencia de dos de estos procesos: dos núcleos de helio-3 se combinan y dan lugar a uno de helio-4 y dos protones.

En la Universidad de Cornell, Bethe decidió estudiar el problema sistemáticamente, trabajando con toda la tabla periódica de los elementos si fuera necesario. Por suerte no tuvo que hacerlo, dado

que halló la solución nada más empezar con el elemento más simple de todos: el hidrógeno. Al hacerlo había redescubierto la idea de Eddington, pero desarrollando sus consecuencias y convirtiéndola en una descripción cuantitativa que podía comprobarse por medios científicos.

A temperaturas de millones de grados, como en el centro del Sol u otras estrellas, se separan los componentes de los átomos de hidrógeno: electrones y protones. Cuando los protones chocan unos con otros hay la posibilidad de que ocurran reacciones nucleares de fusión. Lo que ha dado en llamarse «cadena pp» (de protón-protón) empieza con una colisión entre dos protones en la que se fusionan formando un deuterón (un protón ligado a un neutrón), un positrón y un neutrino<sup>[30]</sup>. El deuterón se encuentra rodeado de protones, y captura uno casi inmediatamente. El trío resultante es un núcleo de helio-3, que consiste en dos protones y un neutrón. Por último, cuando dos núcleos de helio-3 colisionan, dan lugar a la forma estable del helio, el helio-4, y emiten dos protones. El resultado neto es que los cuatro protones del principio se han convertido en un único núcleo de helio-4, y emiten energía en forma de positrones, fotones y neutrinos (véase la figura 4). Mientras que el ciclo «CNO» necesita temperaturas por encima de los veinte millones de grados para ser efectivo, la cadena pp funciona a quince millones de grados, como en el corazón de nuestro Sol.

Los positrones y los electrones se aniquilan entre ellos emitiendo rayos gamma, partículas de luz que están mucho más allá del espectro visible. Las partículas con carga eléctrica son como una barrera para los fotones: los capturan, toman parte de su energía, y los emiten de nuevo. Estos fotones tardan centenares de miles de años en llegar rebotando hasta la superficie, donde emergen en forma de luz visible para nuestros ojos. Los neutrinos salen de inmediato y sin impedimentos, y llegan a la Tierra en poco más de ocho minutos. Por lo menos, esto es lo que debía suceder si la teoría de Bethe sobre la luz del Sol era correcta. Los números

cuadraban, y tenía sentido en términos físicos, pero solo los experimentos podrían decir si era realmente correcta.

En experimentos realizados en la Tierra hemos visto cómo se comportan los protones. Cuando dos de ellos colisionan a velocidades parecidas a las de las partículas en un gas a catorce millones de grados, resulta que pueden acercarse lo suficiente como para fusionarse. Aun así, es muy improbable: solo en uno de cada diez mil trillones de encuentros, aproximadamente, dos protones se fusionan para dar lugar a un deuterón, lo que inicia una cadena pp. En otras palabras, si usted fuera un protón en el Sol, después de cinco mil millones de años la probabilidad de que hubiera encontrado un compañero y se hubiera fusionado con él sería de un 50 %. Sin duda es una probabilidad muy pequeña, pero hay muchos protones en el Sol. Unos cinco millones de toneladas de masa, en forma de protones, se convierten en helio cada segundo, y la energía liberada da calor a la Tierra y luz visible a través del espacio interestelar. Esa lentitud es una buena noticia, porque ha permitido que el Sol brillara durante el tiempo suficiente para que los procesos evolutivos dieran lugar a la vida inteligente en nuestro planeta. Resuelve el interrogante de cómo el Sol ha podido brillar durante tanto tiempo, y encaja con la edad de cinco mil millones de años de la Tierra y el sistema solar.

Así, gracias a la genialidad de Bethe se habían descubierto procesos nucleares que podían producir calor al ritmo adecuado para explicar el Sol tal como lo vemos, y también para producir helio como residuo. Conocemos el tamaño del Sol, y su masa, y vemos su luz. Los cálculos cuadraban. Su explicación encajaba con los hechos conocidos, que es el primer requisito crítico, pero todavía comportaba la siguiente pregunta: ¿es esto lo que realmente ocurre en el Sol? La hipótesis tenía otras importantes consecuencias que nadie había comprobado hasta entonces: la teoría de Bethe de la fusión nuclear en la cadena pp implica que se producen neutrinos.

Sin embargo, cuando propuso la idea en 1939, el neutrino mismo no era más que un producto de la imaginación de los físicos

teóricos. Las reacciones a la teoría de Fermi habían demostrado (véase la página 37) que el neutrino se veía como algo «alejado de la realidad» o incluso «sin interés». Los cálculos del propio Bethe con Peierls en 1934 habían demostrado que el neutrino, suponiendo que existiera, tenía una probabilidad tan pequeña de chocar contra algo que sería casi con toda seguridad inobservable. Esta continuaba siendo la visión imperante hasta la publicación del artículo de Pontecorvo de 1946.

Esta podría ser la explicación de que el artículo de Bethe no mencionara la posibilidad de comprobar la teoría detectando neutrinos del Sol. Hubo que esperar hasta la aparición de las ideas de Pontecorvo y el descubrimiento del neutrino<sup>[31]</sup> en 1956 para que empezara a afianzarse la posibilidad de comprobar la idea de Bethe mediante la búsqueda de neutrinos solares.

## ¿CUÁNTOS NEUTRINOS SOLARES?

### PRIMERAS IDEAS

Nunca llegamos a tener más que una visión superficial del Sol, pues estamos cegados por la luz ante lo que sucede cientos de miles de kilómetros adentro, en el corazón de su horno nuclear. Pero si Bethe estaba en lo cierto, los neutrinos estarían saliendo sin interrupción. Si pudiéramos capturar neutrinos del Sol, estaríamos mirando realmente dentro del corazón de una estrella. Esto fue lo que inspiró a Ray Davis.

Para conseguir encontrar algo, es útil en primer lugar tener alguna idea de lo que se está buscando. ¿Cuánta energía tiene un neutrino individual? Así sabríamos qué tipo de detector funcionaría mejor. ¿Es el Sol muy brillante en términos de neutrinos, o más bien tenue? Esto determinaría la potencia y el tamaño que debería tener el aparato. ¿Podrían los neutrinos solares ser tan tenues que resultaran imposibles de detectar? Tener respuestas a estas preguntas sería crucial. Así explicado, podría dar la impresión de que la teoría de Bethe sobre el Sol daba lugar a un plan claro y organizado para el diseño de un detector y, finalmente, para ver los neutrinos solares. En realidad, la situación era muy distinta. De hecho, nadie pensó demasiado en ello.

La idea de Bethe, que la fusión nuclear es la base para la producción de energía en las estrellas, había aparecido por primera

vez entre 1938 y 1939, cinco años después de que Pauli y Fermi presentaran su teoría de la desintegración beta, la cual incluía el neutrino. Aunque la teoría de Bethe implicaba que el Sol no solo debería estar produciendo calor sino también enormes cantidades de neutrinos, ninguno de los primeros artículos sobre la fusión nuclear en las estrellas mencionaba la posibilidad de detectarlos para comprobar la idea. El artículo de Bruno Pontecorvo de 1946, que había inspirado el intento fallido de Ray Davis de capturar neutrinos procedentes de un reactor, solo mencionaba el Sol en dos frases. Recuérdese que su principal argumento era que el cloro podía ser un buen detector de neutrinos, siempre que hubiera grandes cantidades de neutrinos y se tuviera suficiente cloro.

Aunque Pontecorvo solo había mencionado el Sol de paso, y el artículo que había suscitado el interés de Davis en primer lugar también incluía la idea solo brevemente, aun así, había captado su atención. Incluso durante su primer intento de capturar neutrinos del reactor de Brookhaven, se dio cuenta también de que su aparato podría capturar neutrinos solares... si el ciclo CNO era importante.

El cloro solo es un detector efectivo si el neutrino tiene energía suficiente como para inducir la reacción<sup>[32]</sup> que proporciona el indicio crucial transformando átomos de cloro en argón. Según la teoría de Bethe, la cadena pp es la más importante de las que se producen en el Sol, mientras que el ciclo CNO solo predomina en estrellas mayores. Por desgracia, el proceso de fusión pp emite neutrinos cuyas energías no llegan a la mitad de la requerida para afectar al cloro. A efectos prácticos, un tanque de cloro es ciego a ellos. Sin embargo, cuando Ray Davis se interesó por primera vez en el reto, los astrofísicos todavía estaban debatiendo si el ciclo CNO podía desempeñar algún papel importante en el Sol. En este ciclo, la producción de nitrógeno-13 y oxígeno-15 daba lugar a neutrinos dotados de energía suficiente como para dar una señal en el detector de cloro.

También le preocupaba el ruido de fondo, efectos aleatorios que podían perturbar el cloro de un modo parecido a los neutrinos y dar



falsas señales: no siempre que suena una alarma hay realmente un ladrón. Por esta razón, en 1955, Davis enterró su detector de cuatro mil litros a seis metros de profundidad para reducir el ruido de fondo debido a los rayos cósmicos. Como vimos en la página 49, su intento de capturar neutrinos del reactor no podía tener éxito, porque un reactor emite grandes cantidades de *antineutrinos*. Por lo menos se había predicho que el Sol emitía neutrinos verdaderos, de modo que esta vez podía albergar esperanzas de éxito.

Por desgracia, en esto no tuvo mejor suerte. Tras varias semanas era cada vez más evidente que no había hallado ningún indicio de neutrinos del Sol. En su informe anunció que, si la energía del Sol provenía del ciclo CNO, entonces su fracaso a la hora de detectar neutrinos significaba que el ritmo de emisión tenía que ser bastante pequeño. En consecuencia, o bien la idea de los neutrinos solares estaba equivocada o bien el ciclo CNO no era importante.

Su descarte del ciclo CNO mediante el experimento no suscitó demasiado interés porque, por aquel entonces, los astrofísicos se habían convencido de que el Sol obtenía la energía principalmente de la cadena pp y no del ciclo CNO. Un revisor de su artículo lo criticó por varios motivos. En primer lugar, como entonces (en 1955) no había indicios ni siquiera de que el neutrino existiera, el fracaso de Davis en su intento de detectarlos no afectaba demasiado a nuestros conocimientos sobre el Sol. En segundo lugar, incluso si se producían de este modo, el experimento de Davis no tenía sensibilidad suficiente como para detectarlos, pues de todos modos el ciclo CNO es insignificante en el Sol. Se comparó su tarea con la de alguien que intentara alcanzar la Luna con la mano extendida desde lo alto de una montaña, y al fracasar llegara a la conclusión de que la Luna está a más de tres metros de la cima<sup>[33]</sup>. En pocas palabras: nada apasionante.

En 1958 se produjo un dramático descubrimiento sobre los procesos nucleares que, según creía Bethe, proporcionaban energía al Sol.

En la cadena pp que produce helio, la fase final da lugar a helio-4, tras la colisión de dos núcleos de helio-3. Si en todo el Sol no hubiera nada más que protones, esto sería todo. Sin embargo, el Sol lleva cinco mil millones de años haciendo esto, de modo que también tiene mucho helio-4. En este mismo momento, el ciclo pp está produciendo helio-3, y cabe la posibilidad de que, en lugar de encontrarse con más helio-3 recién creado, choque con antiguo helio-4. Cuando esto ocurre, el helio-3 y el helio-4 se combinan y dan lugar a un núcleo formado por siete constituyentes, cuatro protones y tres neutrones; es decir, el núcleo de berilio-7.

Bethe se había dado cuenta de que esta producción de berilio entraba dentro de lo posible, pero era raro que se diera. Entonces, en el encuentro anual de la Sociedad Americana de Física en Nueva York, hubo noticias. En un experimento realizado en el Laboratorio de Investigación Naval, unos científicos habían logrado fusionar estos dos núcleos, helio-3 y helio-4, y habían descubierto que era mil veces más fácil de lo que nadie había sospechado. Esto significaba que su fusión se producía en el Sol con mil veces más frecuencia de lo que se pensaba hasta entonces.

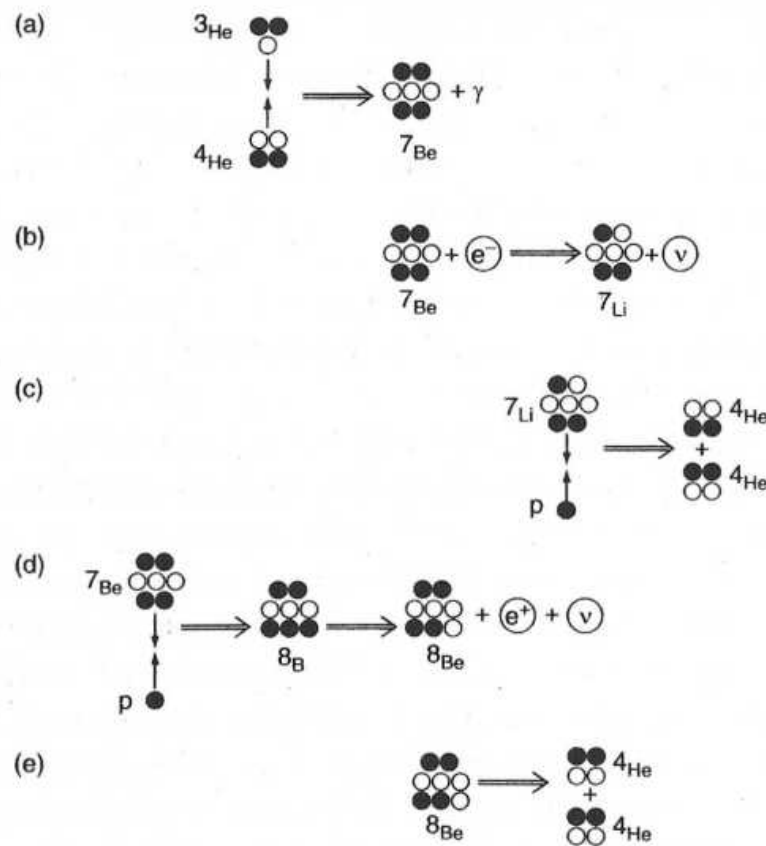


Figura 5. *Producción de helio, a través de berilio, boro y neutrinos.* El proceso de la figura 4 ocurre un 85 % de las veces. Casi todo el 15 % restante se debe a la combinación de helio-3 y helio-4 dando lugar a un núcleo de berilio-7 junto a un fotón (a). El berilio-7 contiene cuatro protones y tres neutrones. En (b), el berilio-7 puede capturar un electrón, convirtiéndose en litio-7 (tres protones y cuatro neutrones) y un neutrino (con una energía inferior a 0,9 MeV). En (c), el litio se combina con un protón y da lugar a dos núcleos de helio-4. Hay una probabilidad muy pequeña (un 0,01 % o 1 de cada 10 000) de que el berilio-7 se combine con un protón dando boro-8 (cinco protones y tres neutrones), que se desintegra y se convierte en berilio-8, y emite un positrón y un neutrino (d). Este neutrino puede tener una energía tan alta como 15 MeV, y son estos neutrinos de energía relativamente alta los que podía detectar el experimento de Davis. Por último (e), el berilio-8 se subdivide en dos núcleos de helio-4. Los círculos negros representan protones, y los círculos blancos, neutrones.

Willy Fowler, uno de los más destacados astrofísicos, había acudido allí desde el Caltech de Los Ángeles. El anuncio le recordó algo que Bethe le había comentado una vez: si se producía berilio-7, este

podía chocar con un protón solar, y fusionarse para producir boro-8. Lo emocionante del asunto estribaba en que, cuando esto sucediera, se emitiría un neutrino con energía superior a la necesaria para activar un detector de cloro. Los resultados del Laboratorio Naval implicaban que los núcleos de berilio-7 se producían con mucha más frecuencia de lo que Bethe había pensado y, tal como observó Fowler, los neutrinos también. De repente, se había presentado una tentadora posibilidad de detectar los neutrinos solares. Fowler le escribió a Davis de inmediato, y le dijo que en realidad el Sol podía estar emitiendo neutrinos en cantidades suficientes como para que los capturase un detector de cloro.

Cuando Davis tuvo noticia de ello, su experimento en el reactor de Savannah ya estaba en marcha. No cabía duda de que se estaban produciendo átomos de argón —señal de la existencia de neutrinos—, pero las cantidades se ajustaban con obstinación a las que se habían previsto en el caso de que hubiera interacciones con los rayos cósmicos. El experimento no era suficientemente sensible para distinguir los posibles neutrinos solares de aquel ruido de fondo indeseado. Era como si Davis intentara averiguar si había empezado a llover desde debajo de una cascada: si había «gotas» de neutrinos solares, estos se perdían en la cascada cósmica. Si iba a lograr algo mejor que su fracaso de 1955, tendría que reducir el efecto de los rayos cósmicos. Un científico lo resumió sucintamente<sup>[34]</sup>: así como los astrónomos suben a la cima de las montañas para alejarse de las luces de la ciudad, el experimento de Davis tendría que adentrarse a gran profundidad en el subsuelo para evitar los efectos de las auroras boreales.

La mina de piedra caliza de Barberton, en Ohio, tiene una profundidad de setecientos metros. Inspirado por la noticia de que la producción de berilio-7 era grande, a finales de 1959 Davis y un colega, John Calvin, instalaron el tanque del experimento de Savannah en la mina y empezaron a tomar medidas. Buscaban neutrinos emitidos al combinarse el berilio-7 con un protón y dar

berilio-8. Acababan de empezar cuando llegaron malas noticias: mientras que los experimentos de física nuclear habían demostrado que la producción de berilio-7 era fácil, el siguiente paso decisivo, la combinación con un protón para dar berilio-8, resultó ser difícil. El pesimismo generado por dichas noticias se acentuó porque esta vez Davis tampoco consiguió ver ningún indicio convincente de los neutrinos solares.

Detectar neutrinos emitidos por los reactores nucleares aquí en la Tierra ya había sido bastante difícil. Hacia 1960 estaba quedando de lo más claro que buscar neutrinos solares iba a ser una tarea ardua en el mejor de los casos, si no imposible. Fred Reines, quien junto a Clyde Cowan había obtenido las primeras detecciones de neutrinos de reactores nucleares, escribió un artículo<sup>[35]</sup> ese año, en el que llegaba a la conclusión de que la búsqueda de neutrinos solares tal vez no tuviera éxito «ni siquiera con detectores de miles, ni con cientos de miles de litros de  $C_2Cl_4$  [tetracloroetileno o líquido de limpieza]», y que tal esfuerzo en condiciones adversas «tiende a disuadir a los experimentadores de realizar el intento».

En esta fase, Davis estaba profundamente implicado en su búsqueda, en todos los sentidos del término: setecientos metros de profundidad podrían no ser suficientes, y cuatro mil litros eran ciertamente demasiado pocos. Si Reines tenía razón, Davis estaba persiguiendo un fantasma. Durante esa deprimente época, Willy Fowler recibió, para su evaluación, un artículo de un joven físico teórico llamado John Bahcall. Como resultado de este encuentro fortuito, Bahcall y Davis se vieron empujados a una búsqueda que los absorbió durante el resto de sus vidas.

#### LLEGA JOHN BAHCALL

John Bahcall nunca había esperado convertirse en científico. Nacido en Luisiana en 1934, lo que más le interesaba en el instituto era jugar al tenis, hasta que en el último curso descubrió que tenía un talento de naturaleza académica: el debate. En 1952, él y un colega

suyo ganaron la competición nacional de debates de la educación secundaria estadounidense, a consecuencia de lo cual se matriculó en la universidad estatal para estudiar Filosofía. En aquel momento su ambición era convertirse en rabino.

Al terminar el primer año académico se apuntó a un curso de verano, en la Universidad de California en Berkeley, y le encantó. Se las arregló para matricularse en Berkeley como estudiante a tiempo completo. Aún le interesaba la filosofía, pero para licenciarse era necesario un curso de ciencias. Fue así como se enamoró de la física.

Durante sus estudios de Filosofía había leído a Bertrand Russell. El comentario de Russell sobre la insignificancia de los humanos en el universo inspiró el interés de Bahcall por la astronomía. Sin embargo, su carrera solo lo llevó a ese campo debido a una serie de azares.

En 1960 estaba en la Universidad de Indiana asistiendo a clases sobre la teoría de la interacción débil<sup>[36]</sup>, la fuerza que controla la desintegración beta y el comportamiento de los neutrinos. Dicha teoría se había establecido en 1934, a raíz del incomprendido artículo de Fermi. Para profundizar en su comprensión de la desintegración beta, Bahcall se planteaba problemas a sí mismo. Uno de ellos era la desintegración beta inversa, en la cual se capturaría un electrón y se liberaría un neutrino. Las lecciones al uso trataban sobre la captura de electrones de sus órbitas en los átomos. Como ejercicio para comprobar que entendía los principios, Bahcall calculó qué sucedería si en un primer momento los electrones se estuvieran moviendo libremente en lugar de estar atrapados dentro de los átomos.

Un día, mientras almorzaba con el astrónomo Marshall Wrubel, este le preguntó en qué trabajaba. Bahcall le habló de sus cálculos, pero expresó su decepción, pues al sustituir valores en las ecuaciones que había deducido le parecía que nada de lo calculado se podría medir jamás. Ese era el problema de los neutrinos: resultaban fascinantes desde el punto de vista teórico, pero desde el

experimental sus efectos estaban en el límite de lo detectable, o incluso más allá.

Entonces Wrubel hizo el comentario que iba a determinar el resto de la vida de Bahcall: tal vez lo que sucediera dentro de las estrellas fuese la captura de electrones en movimiento libre. Wrubel sugirió que quizá fuera allí donde podría albergar alguna esperanza de que sus ideas dieran fruto. El lugar donde empezar, añadió, era el artículo clásico de Margaret y Geoffrey Burbidge, Fred Hoyle y Willy Fowler, que explicaba cómo se forman los elementos en las estrellas, y se consideraba la biblia de la astrofísica nuclear.

Cuando Bahcall leyó el artículo vio que Fowler había elaborado una tabla a modo de apéndice, en la que enumeraba las propiedades características de los núcleos atómicos implicados en la formación de los elementos más pesados. Varias de ellas implicaban la existencia de desintegraciones beta. Eran importantes por ser las más lentas, y como tales establecían las escalas de tiempo según las cuales los elementos más ligeros se unían para formar otros más pesados. Fowler había supuesto que los ritmos eran iguales que los medidos en el laboratorio, pero los cálculos que había hecho Bahcall le habían demostrado que los ritmos de captura de los electrones que se movían libremente (como en las estrellas) eran diferentes de los que estaban atrapados en orbitales atómicos (como en la Tierra). En resumen: una de las suposiciones básicas de aquel artículo fundacional estaba equivocada.

La consecuencia era que la probabilidad de que un electrón fuera capturado en las frescas condiciones de laboratorio en la Tierra y en el plasma de una estrella no tenían por qué ser iguales. Aunque los efectos de la enorme temperatura del Sol podían simularse en el laboratorio hasta cierto punto, haciendo colisionar los núcleos atómicos relevantes a energías correspondientes a aquellas temperaturas, no podía hacerse lo mismo con la enorme densidad del centro del Sol, que es catorce veces la del plomo. No obstante, la mecánica cuántica puede usarse para calcular sus efectos. Esto es lo que había hecho Bahcall.

Escribió un breve artículo donde indicaba que los ritmos de los procesos de desintegración beta en las estrellas serían diferentes de los que estaban usando los astrofísicos. Lo sometió a la consideración de *Physical Review*, donde apareció debidamente<sup>[37]</sup>. Para su sorpresa, y antes de que el artículo fuera publicado, recibió una carta al respecto de Willy Fowler en persona. Como Bahcall no había enviado ningún ejemplar a nadie más que al editor, esto solo podía significar una cosa: le habían pedido a Fowler que evaluara el artículo. No era ninguna sorpresa que Fowler fuera la elección natural: al fin y al cabo, había sido su tabla la que había inspirado la investigación de Bahcall. La sorpresa era que la carta le ofrecía un puesto para trabajar con Fowler en Caltech.

Fowler había actuado de manera decisiva. Además de atraer a Bahcall a Caltech había escrito otra carta; en este caso, a Ray Davis.

Recuérdese que, en la búsqueda de neutrinos solares, el entusiasmo suscitado por el descubrimiento de que el berilio-7 era mil veces más fácil de producir de lo que se creía hasta entonces había quedado enfriado por el resultado experimental de que resultaría difícil dar el siguiente paso, en el cual un protón chocaba con el berilio-7 y lo transformaba en berilio-8 emitiendo el neutrón decisivo. No obstante, a la luz del artículo de Bahcall, podía haber dudas sobre si las medidas experimentales que implicaban la utilización de berilio y protones en el laboratorio implicarían necesariamente tan malas noticias respecto a la producción de neutrinos en el Sol. Sin embargo, los cálculos de Bahcall no habían incluido este caso en particular.

Cuando Fowler vio el artículo de Bahcall y se dio cuenta de su relevancia, le escribió a Davis que había «un tipo en Indiana» que sabía calcular cómo funciona la física nuclear en el Sol. De este modo, en febrero de 1962 Davis le escribió una carta histórica a Bahcall en la que le preguntaba sobre aquel proceso en concreto. Bahcall empezó a hacer cálculos.



En 1963 había completado su primer intento. No daba muchos ánimos. Los números de Bahcall demostraban que existía una diferencia entre lo que se había medido en la Tierra y lo que debería pasar en el Sol, pero incluso cuando esto se tenía en cuenta resultaba que un tanque de cuatro mil litros solo capturaría un neutrino cada cien días; es decir, menos de un puñado en un año. Tampoco animaba a la construcción de un dispositivo experimental más grande, pues incluso con cuatrocientos mil litros solo se capturaría un neutrino al día. En líneas generales, a los astrónomos no les interesaba lo que se consideraba un experimento caro de todos modos, y que, además, no parecía tener muchas posibilidades de detectar realmente los neutrinos solares.

Davis era diferente, y estaba ansioso por construir un dispositivo con cuatrocientos mil litros. En primer lugar, su experiencia con el dispositivo de cuatro mil litros en la mina de Barberton le hacía confiar en que un incremento según un factor de cien era factible. También tenía la sensación de que un tanque de aquel tamaño podía funcionar con eficiencia: Davis se había formado como químico y estaba seguro de que sería capaz de extraer incluso los muy escasos átomos de argón que «delatarían» a los neutrinos solares. Además, creía que podría hacer el tanque lo suficientemente resistente a las filtraciones como para evitar la contaminación por argón del aire y los alrededores. Esta protección sería fundamental si tenía que estar seguro de que un simple puñado de aquellos átomos se había producido realmente dentro de su aparato.

Parecía que el principal problema podrían ser los rayos cósmicos que llegaran hasta el dispositivo experimental, produjeran argón cuando colisionaran y fueran confundidos con los neutrinos. Para solucionarlo, Davis y Bahcall llegaron a la conclusión de que la tarea debía realizarse por lo menos a 1220 metros bajo tierra. ¿Dónde iban a encontrar una caverna adecuada, con la profundidad y el tamaño suficientes? Incluso si hubiera alguna que reuniese estas características, ¿sería adecuada en la práctica para realizar un

experimento científico? En 1963, tal empresa se consideraba un riesgo enorme. Pocos pensaban que pudiera tener éxito.

A pesar de todo, Davis y un colega, Blair Munhofen, empezaron a buscar minas profundas en Estados Unidos. ¿Cómo se podía hacer tal cosa en los tiempos anteriores a Google? Pues consultando a la Oficina Nacional de Minas, la cual recomendó dos que parecían cumplir sus requisitos: la mina de cobre de Anaconda en Butte, en Montana, y la mina de oro de Homestake en Lead, en Dakota del Sur.

Cuando Davis y Munhofen visitaron las minas para echar un vistazo por sí mismos, se encontraron con buenas y malas noticias. Los propietarios de la mina de Anaconda deseaban que se usara y propusieron un precio razonable a cambio de una cavidad cilíndrica rodeada de cemento a 1280 metros de profundidad. Por desgracia la caverna era demasiado pequeña. La mina de Homestake parecía más prometedora: el tamaño no era ningún problema. A 1480 metros de profundidad podía abrirse una cavidad lo suficientemente grande como para albergar un dispositivo de cuatrocientos mil litros, un volumen del tamaño de una piscina olímpica. De momento, bien. Sin embargo, los costes estimados de la excavación en Homestake eran muy grandes, por lo que decidieron continuar la búsqueda de un lugar adecuado.

Encontraron la mina de Sunshine en Kellogg, en Idaho. Esta mina de plata tenía una profundidad de 1640 metros, la roca era lo bastante fuerte para la excavación y, por fin, los costes parecían razonables. Aunque no había dinero para su propuesta, ni siquiera una promesa formal de ninguna agencia para la financiación, por lo menos sabían que había un lugar donde podía llevarse a cabo un experimento con cuatrocientos mil litros.

## CIENCIA SUBTERRÁNEA

En la década de 1960, el Instituto Niels Bohr de Copenhague era uno de los principales centros de física nuclear del mundo. Entre los miembros del profesorado figuraban Aage Bohr, hijo de Niels, y Ben Mottelson, que estaban en la cima de su capacidad creativa, construyendo su teoría de la estructura nuclear por la que ganarían el Premio Nobel en 1975 (compartido con el estadounidense James Rainwater). En el verano de 1963, Bahcall visitó el Instituto para dar una charla sobre sus cálculos. Y lo que sucedió a continuación lo cambiaría todo.

Empezó con un repaso de la física nuclear que interviene en la fusión solar y mostró sus cálculos del número de neutrinos que deberían producirse. Los expertos que lo escuchaban estaban de acuerdo con lo que oían. Luego pasó a hablar de cómo debían detectarse los neutrinos, y describió su absorción por el cloro y la transformación de este en argón. Fue en este punto donde Ben Mottelson notó algo.

Se dio cuenta de que Bahcall había calculado el ritmo de conversión suponiendo que el neutrino convertía el cloro directamente en argón. Esto podía ocurrir en realidad, pero lo que Mottelson había visto era que los neutrinos solares tenían energía suficiente como para que el núcleo de argón resultante tuviera más energía interna que la que suele tener en su «estado fundamental». Era suficiente para que el núcleo estuviera en un estado «excitado»

en el que un neutrón del cloro se transforma simplemente en un protón sin la reestructuración necesaria para formar el estado fundamental. Después, el estado excitado podía revertir al estado normal, al emitir el exceso de energía como un rayo gamma. A Mottelson le parecía que esto en realidad podría ser más fácil que el proceso en el que Bahcall se había centrado.

«¿Ha comprobado esto?», inquirió Mottelson. Bahcall admitió que aquella posibilidad no se le había ocurrido.

Era una idea intrigante. Bahcall se puso a trabajar para ver qué efecto podía tener, y la respuesta resultó ser todo lo que había estado esperando: era veinte veces más fácil que el cloro capturara neutrinos de ese modo. La consecuencia era que el detector de Davis capturaría neutrinos veinte veces más rápido de lo que se creía hasta entonces. Mientras que los cálculos de Bahcall habían predicho que Davis capturaría un solo neutrino a la semana, de repente cabía la posibilidad de que se capturara un puñado cada día. Aunque todavía era un número pequeño, empezó a dar una fascinante esperanza de éxito. Volvía el optimismo.

En noviembre de 1963 presentaron sus ideas sobre la viabilidad de un detector de cloro de cuatrocientos mil litros para neutrinos solares en un congreso internacional sobre evolución estelar celebrado en el Instituto para Estudios Espaciales en Nueva York. La acogida fue tan discreta que ni se mencionaron sus ideas en el discurso de clausura. Nada desalentados, y seguros de que habían dado con un experimento realista, fueron al Laboratorio Nacional Brookhaven para convencer a su director, Maurice Goldhaber, de que destinara parte del presupuesto científico del laboratorio a apoyar el proyecto. Para tener alguna posibilidad de éxito, dada la falta de entusiasmo por parte de la comunidad astrofísica, decidieron plantear su petición de modo que se ajustara a los intereses de Goldhaber.

Davis sabía que Goldhaber, un distinguido físico nuclear, era escéptico acerca de la capacidad de los astrónomos para «decir algo correcto sobre algo interesante<sup>[38]</sup>», de modo que no había

mucho que ganar poniendo el énfasis en la relación del experimento con el Sol. Bahcall, sin embargo, era joven, estaba entusiasmado y «lleno de cálculos que he hecho sobre el Sol». Davis le explicó que Goldhaber desconfiaba de los astrofísicos, y dijo que tenían que estar de acuerdo sobre la táctica. Insistió en que confiara en él, lo dejara hablar sobre el experimento, y limitara sus comentarios a la física nuclear, al mayor ritmo de captura de neutrinos, y cómo esa idea podía ponerse a prueba en Brookhaven. Con cierta resistencia, Bahcall aceptó.

Como Davis había esperado, a Goldhaber le interesaron mucho las ideas relacionadas con la física nuclear y, de hecho, también aprobó el experimento de los neutrinos solares. Al fin y al cabo, Davis y Bahcall se habían atrevido a mencionar esa motivación. Lo que habían dicho era que si el experimento demostraba que el ritmo de captura de neutrinos solares era diferente del que había predicho la teoría, eso confirmaría la convicción de Goldhaber de que los astrofísicos «no sabían realmente de qué hablaban».

Para fortalecer todavía más su defensa del experimento completo, escribieron un artículo cada uno: Davis, sobre el experimento propuesto, y Bahcall, sobre la teoría que lo apoyaba. Sus artículos aparecieron uno detrás de otro en el *Physical Review Letters* del 16 de marzo de 1964. El artículo de Davis informaba sobre los resultados de las pruebas con el detector de cuatro mil litros, que consistía en dos tanques separados de dos mil litros cada uno, situados en la mina de piedra caliza setecientos metros por debajo de Barberton, en Ohio. Impresionaba lo cuidadoso del experimento. Como la señal de neutrinos solares sería a lo sumo un puñado de átomos de argón, y como el aire mismo contiene ese elemento, habían empezado purgando los tanques con gas de helio para eliminar cualquier traza de argón.

Tras dieciocho días de funcionamiento comprobaron si había indicios de argón radiactivo. La buena noticia era que tenían algunos, pero demasiado pocos para decir con seguridad si la causa de las trazas eran los neutrinos solares, alguna otra actividad de

fondo, o incluso si habían quedado residuos tras la purga de aire inicial. No obstante, el hecho de que pudieran medir cantidades tan pequeñas, justo en el límite de lo que permitía distinguir una señal del ruido de fondo, demostraba que en principio la idea era viable. Calcularon que cuatrocientos mil litros de líquido bastarían para mejorar la señal con relación al ruido. Sin embargo, para que el experimento resultara práctico, tendría que estar a una profundidad mucho mayor, quizá 1370 metros bajo la superficie, en cuyo caso estimaban que nueve de cada diez átomos de argón radiactivo se deberían a los neutrinos solares.

Por lo menos sabían de una ubicación adecuada, la mina de Sunshine. Lo que necesitaban era la financiación. También necesitaban convencer a otros de que realmente podían llevar a cabo la tarea con éxito.

Bruno Pontecorvo celebró un seminario especial en Leningrado para informar sobre los artículos de Davis y Bahcall. Había mucho interés, pero tiempo después Pontecorvo dijo que él era la única persona presente que creía que el experimento tendría éxito. Hubo una publicidad más amplia, que no todos apreciaron, cortesía de un artículo en la revista *Time*. Aunque hoy en día la ciencia tiene mucha presencia en los medios de comunicación, y los científicos siempre están a punto para dar publicidad a su trabajo, en 1964 esto no estaba tan bien visto. Sin embargo, la publicidad en *Time* tuvo ventajas inesperadas, pues ayudó a difundir su búsqueda de una mina adecuada y a conseguir un tanque adecuado para su detector. Davis dijo después que «esa gente del tanque nos tomó más en serio tras el artículo de *Time*<sup>[39]</sup>».

Goldhaber tuvo que quedar convencido, porque el dinero para el experimento salió del presupuesto para química de Brookhaven. Jamás se envió ninguna propuesta formal a las agencias federales de financiación<sup>[40]</sup>.

Por fin tenían fondos, pero de repente no había mina. La previsión de instalar el experimento en la mina de Sunshine falló. La mina de Homestake estaba disponible, pero era demasiado cara. En esto los ayudó la publicidad de *Time*. Se le pidió a la administración de la mina de Homestake que reconsiderara el proyecto, y esta ofreció un presupuesto menor: la excavación podía hacerse por 125 000 dólares, y los trabajos podían empezar la primavera de 1965. También se contaba con una ventaja añadida: la cavidad era mayor que en Sunshine.

La excavación de la roca empezó en mayo de 1965, y la caverna estaba lista en agosto. Davis y Blair Munhofen, un colega suyo que había llevado la mayor parte de las negociaciones con la mina, bajaron por el pozo con sus anfitriones, la oscuridad rota solo por las linternas de los cascos de seguridad de los mineros. Los guiaron al interior de la caverna y empezaron a echar un vistazo a su alrededor con esas linternas cuando de repente se encendieron las luces e iluminaron el vacío. Miraron la enorme estancia, de diez metros de ancho por veinte de largo, con un techo diez metros por encima de ellos, alambradas en las paredes, pedestales de hormigón en el suelo como soporte para el tanque, y un monorraíl para la grúa en el techo. La gente de Homestake y los científicos estaban todos muy satisfechos. Ahora el reto era construir el tanque y bajarlo por el pozo.

La Chicago Bridge and Iron Company (CBI, Compañía de Hierro y Puentes de Chicago) construyó el tanque. Para la escala de los experimentos que habían sido la norma por aquel entonces, los científicos pensaron que se trataba de algo grande. La gente de CBI, en cambio, lo encontró muy pequeño, y más tarde dijeron que normalmente no se habrían interesado en construir lo que consideraban un pequeño tanque convencional, pero que «estaban intrigados por los objetivos del proyecto y la ubicación poco usual<sup>[41]</sup>». Otra característica del tanque era que debía estar completamente sellado para evitar cualquier filtración de aire, y por lo tanto de argón, hacia el interior. Esto era algo que dominaban en

CBI: ya habían construido cámaras espaciales para la NASA. El recipiente quedó completado en 1966, y su interior se limpió a conciencia mediante chorros de arena y se restregó con disolvente. Comprobaron su radiactividad para estimar cuántas conversiones a argón podrían ocurrir debido a la radiactividad natural del aparato. Por fin todo estaba a punto para llenar el tanque.

Los cuatrocientos mil litros de líquido limpiador tenían que comprarse, trasladarse a las instalaciones y bajarse a 1,6 kilómetros bajo tierra. Diez vagones de tren llenos de la sustancia se trasladaron desde la Frontier Chemical Company en Wichita, en Kansas, hasta la instalación de Dakota. Entonces se introdujo el líquido en tanques diseñados ex profeso, con una capacidad de 2500 litros cada uno, que podían pasar por el pozo y por los raíles subterráneos de la mina, y ser izados por la grúa. Se tardó varias horas en cargar, transportar y vaciar cada tanque individual. Los 150 viajes duraron cinco semanas, con la ayuda del operario de la grúa de Homestake y cinco científicos. Una vez completada esta fase, se practicó una serie de purgas para eliminar cualquier traza de aire, no solo del aire que ya había estado presente en el tanque, sino también del que estaba disuelto en el cloro mismo.

Hacia el final del verano de 1966 el experimento estaba a punto para empezar. El coste total era de 600 000 dólares o, como lo describió Davis cuando se lo preguntaron en un congreso: «Diez minutos de publicidad en televisión». Habían pasado veinte años desde que Pontecorvo propusiera por primera vez la utilización del cloro para detectar neutrinos. Habían transcurrido ya siete años desde el primer intento fallido de Davis. Pero nadie esperaba que pasaran treinta años más antes de que se comprendiera plenamente el significado de lo que estaban a punto de hacer.

### ¿CUÁNTAS SNU?

Con el experimento instalado, y a punto de empezar, la pregunta era la siguiente: ¿cuántos neutrinos esperaban encontrar? Bahcall había



ido mejorando la precisión de sus cálculos durante los cuatro años que había estado implicado en la búsqueda. Estos incorporaban todo lo que sabía sobre el funcionamiento del Sol y las varias reacciones nucleares que se supone que le dan energía. A partir de todo esto, calculó la energía y el número de neutrinos que el Sol emite cada segundo.

Dichos neutrinos se esparcen por todo el espacio de modo que ese aluvión irradia la Tierra de manera permanente. Teniendo esto en cuenta, llegó a la conclusión de que 66 000 millones de neutrinos solares atraviesan un centímetro cuadrado (aproximadamente el tamaño del ojo) cada segundo. Este es el número total, pero pueden generarse de varias formas distintas. Como resultado, no todos tienen la misma energía. La cuestión de a cuántos de ellos sería sensible su detector basado en el cloro resultaría crucial para el experimento de Davis.

Según los cálculos de Bahcall, 60 000 millones se originan en las reacciones de fusión primarias por las que núcleos de hidrógeno — protones— se combinan en una serie de pasos para formar helio-4. La gran mayoría tendría demasiada poca energía, por sí solos, para activar el cloro en el detector de Davis, así que no tenía ninguna posibilidad de capturarlos. Sin embargo, otros procesos producen neutrinos, pues no todas las reacciones nucleares acaban dando helio-4. Como muestra la figura 5 de la página 76, se necesitan varios pasos para llegar al helio-4, y por el camino pueden producirse colisiones que dan lugar a distintos resultados. Por ejemplo, en un paso intermedio se genera helio-3. Y, como hemos visto, es posible que un núcleo de helio-3 choque con un núcleo de helio-4 producido con anterioridad.

Esta fusión de helio-3 y helio-4 da lugar a berilio-7, y también produce un neutrino. Bahcall estimó que se forman de ese modo unos cinco mil millones de los 66 000 millones que atraviesan el ojo del lector cada segundo. Pero esto tampoco es todo. La mitad del Sol consiste todavía en protones libres, y el berilio-7 puede combinarse a su vez con uno de ellos para dar boro-8. En este caso

también se emite un neutrino, y, lo que es más, con energía suficiente para ser registrado si fuera a chocar con un átomo de cloro en el detector de Davis.

Esta es la buena noticia. Por desgracia, esa reacción crítica es rara: como ya hemos dicho, de cada diez mil millones de neutrinos solares, solo un millón —una diezmilésima del total— provienen de esa fase tardía. Por lo tanto, el detector de Davis sería ciego a todos los neutrinos excepto a esos pocos.

Así que, en el mejor de los casos, Davis no podría ver sino el más tenue vislumbre del espectro completo de los neutrinos solares. Y para empeorar las cosas, casi todos ellos atravesarían la Tierra entera, y ya no digamos su detector, sin perturbar nada. ¿Cuántos neutrinos solares podía aspirar a capturar Davis? Bahcall introdujo estos factores en sus fórmulas para obtener la respuesta definitiva. Expresó el resultado en «SNU», pronunciado «esníu», de *solar-neutrino-unit* o unidad de neutrinos solares. Como esto se ha convertido en parte de la terminología estándar de la física moderna, vale la pena dedicar un momento a explicar qué significa y por qué lo inventó.

A partir de la teoría de Fermi de la desintegración beta, es posible calcular la probabilidad de que un neutrino choque con un átomo individual, dándose a conocer. Como ya dijimos, el número es tan pequeño que se creyó que no sería bueno para nada. Bahcall usó la teoría<sup>[42]</sup> para calcular que en el caso de un neutrino generado conjuntamente con boro-8 la probabilidad de que chocara con un átomo individual de cloro-37 era solo de uno entre diez, seguido de 36 ceros cada segundo, o  $10^{-36}$ . En otras palabras, esto significa que un átomo de cloro-37 tendría que esperar tantos segundos como uno y 36 ceros, es decir, unos diez mil millones de veces el tiempo transcurrido desde el *Big Bang*, antes de tener una probabilidad del 50 % de capturar uno de esos neutrinos. Es obvio que se necesitaba una manera de contar más amena. En lugar de decir un trabalenguas como «uno de cada diez a la menos 36 por

segundo», se ha convertido en costumbre referirse a este ritmo de captura como «1 SNU».

Sin duda es un número pequeño, pero, por fortuna, la naturaleza también nos da algunos números grandes que pueden amplificarlo. La materia en grandes cantidades contiene billones y billones de átomos, cada uno de los cuales tiene esa pequeña probabilidad. Un poco multiplicado por mucho puede ser medible, y en cuatrocientos mil litros de líquido limpiador hay muchos átomos de cloro-37: más o menos dos seguido de treinta ceros, o  $2 \times 10^{30}$ , en total. Así que el tiempo de espera medio para una captura individual por un átomo cualquiera en algún lugar dentro del tanque, si el ritmo de captura es de 1 SNU, sería solo de medio millón de segundos aproximadamente, o seis días. Luego, tomando el número de SNU que había predicho Bahcall se obtiene el número de capturas en seis días.

Para calcular el número, Bahcall usó los mejores modelos del interior del Sol, introdujo datos sobre varias reacciones nucleares que se habían medido en experimentos en la Tierra, e incluyó el mecanismo de captura que Mottelson había sugerido para el cloro. Tras combinarlo todo anunció la respuesta: el ritmo sería de 7,5 SNU con un margen de error de hasta 3 SNU hacia arriba o hacia abajo<sup>[43]</sup>. Alrededor de un 80 % de este ritmo esperado se debería a los neutrinos producidos en la desintegración del boro-8 radiactivo, el cual, según Bethe había predicho mucho antes, se formaría mediante la captura por el berilio-7 de un protón de los que constituyen la principal fuente de energía del Sol. Con su experimento, Davis esperaba detectar los neutrinos producidos en ese proceso.

En 1968, dos años después de haber empezado el experimento, Davis estaba preparado para anunciar sus primeros resultados: si estaba viendo neutrinos solares en absoluto, las cantidades eran, con mucho, demasiado pequeñas. Suponiendo que el experimento estaba funcionando correctamente, estaba obteniendo un valor que

era a lo sumo de 3 SNU. Si los cálculos de Bahcall también eran correctos, había algún problema en alguna parte.

Por un lado, el experimento de Davis era el único en el que se afirmaba haber descubierto neutrinos solares. Este era un logro singular, pero no consiguió mucho impacto porque los valores demasiado bajos hicieron que muchos se cuestionaran la fiabilidad de la investigación entera. ¿Cuán seguro podía estar Davis de que lo que estaba midiendo eran neutrinos solares? ¿Cuán bien sellado estaba su detector? ¿Podía el argón entrar desde el exterior, o formarse de otro modo? ¿Podía Davis convencer a los escépticos de que realmente era capaz de medir cantidades tan pequeñas en tamaña acumulación de átomos?

Willy Fowler había desafiado a Davis al respecto: inyecte 500 átomos de argón-37 radiactivo en el tanque, mézclelo y luego extraígalos todos. Davis lo hizo, y extrajo cada uno de ellos.

Algunos estaban convencidos de que el experimento hacía realmente lo que se pretendía, pero discrepaban sobre el significado de todo ello. Los que no se dedicaban principalmente a la astrofísica dijeron que si los datos de Davis demostraban que el Sol en realidad emitía menos neutrinos que los que había predicho el modelo estándar del Sol, entonces aquello era el fin de dicho modelo. Muchos sostenían la misma opinión de Goldhaber, quien al final había aceptado suscribir el experimento, de que en líneas generales los astrofísicos no sabían de qué estaban hablando. Estos, por su parte, insistían en que sí lo sabían, y que era otra cosa la que fallaba. Quizá los datos, que no eran muy abundantes, nos estaban engañando: lance una moneda al aire unas cuantas veces y podría salir cara cada vez por pura casualidad, pero si continúa haciéndolo tras varios intentos, esto probablemente significa que tiene una moneda de dos caras. Para afrontar este reto sería necesario mejorar la eficiencia del detector y continuar reuniendo datos.

El tamaño del aparato ya estaba fijado, y la recuperación del argón y el análisis químico eran prácticamente perfectos, así que no había mucho margen de maniobra. Se sabía que el fondo de rayos

cósmicos era pequeño, pero la señal de los neutrinos solares también estaba resultando pequeña, de modo que el efecto relativo del ruido de fondo en realidad era grande. La principal posibilidad de mejora sería reducir todavía más el ruido de fondo, de una u otra manera. Incluso a una profundidad de 1,6 kilómetros, cada semana los rayos cósmicos generaban dos átomos de argón-37 en el tanque, y, para que el experimento fuera convincente, esto tendría que reducirse a uno cada mes, como mucho. Esa era la respuesta, pero la pregunta era la siguiente: ¿cómo podía hacerse?

#### LA «MEJORA DE LA PISCINA»

Estaban en una situación fascinante y frustrante a la vez: podrían ser los primeros seres humanos que hubieran mirado en el interior de una estrella, pero eran incapaces de convencer a nadie de que habían tenido éxito. Su «cámara» no era, ni por asomo, lo bastante buena. Tenían que encontrar la manera de eliminar el ruido de fondo para que la débil señal destacara.

Discutieron varias ideas en las pausas para tomar el café, durante el almuerzo y después del trabajo en la piscina de Caltech. Una tarde, mientras estaban ahí relajándose, tuvieron un golpe de suerte. El astrónomo Gordon Garmin los vio y fue a hablar con ellos. Les contó que había oído lo del experimento con cloro, y lo de sus problemas con el ruido de fondo, y se preguntaba si podría ser de ayuda un truco que se usaba en su oficio. Se basaba en algo que los expertos en electrónica llaman «discriminación del tiempo de subida de un pulso». Aunque parezcan sacadas de un complicado manual, esas palabras describen exactamente el fenómeno.

En ciertos tipos de detector, los pulsos eléctricos tardan tiempo en subir hasta un máximo. Cuando se capturan electrones, como por ejemplo en los eventos inducidos por los neutrinos, el pulso sube muy rápidamente hasta su máximo. Esto difiere bastante de los pulsos de crecimiento lento que causan los rayos cósmicos.

Parecía el modo ideal de filtrar los eventos de fondo indeseados. Pero ¿podía hacerse?

Los técnicos de Brookhaven a quienes había consultado Davis dijeron que la idea funcionaba en muchos casos, en los que se permitía distinguir los fenómenos rápidos de los lentos, pero las circunstancias particulares en las que Davis estaba interesado resultaban más difíciles. En efecto, los pulsos provocados por neutrinos crecerían muy rápido, mientras que los correspondientes al fondo lo harían un poco menos rápido o, en otras palabras, no lo bastante lento como para distinguirlos en la práctica. Por lo menos, no con los amplificadores disponibles entonces. Los expertos en electrónica de Brookhaven habían tardado un año en desarrollar dispositivos suficientemente rápidos para realizar la tarea. En 1970, con los nuevos amplificadores instalados, Davis pudo reducir los eventos de fondo a uno por mes. Siempre se refería a este desarrollo crítico como la «mejora de la piscina».

Esto condujo a un breve período de cierto pánico. En noviembre de 1971, Davis telefoneó a Bahcall para explicarle que después de dos meses no se había encontrado ni una sola señal de un neutrino en los experimentos más recientes, incluyendo los instrumentos nuevos y más sensibles. ¡Esto dejaba la horrible posibilidad de que el experimento estuviera a punto de revelar que no llegaba ningún neutrino! Al final resultó que se trataba de una fluctuación estadística, como cuando el rojo sale varias veces seguidas en la ruleta mientras se está apostando una y otra vez por el negro. Los neutrinos solares continuaron llegando, pero todavía eran demasiado pocos.

También hubo mejoras en la teoría. Las diversas reacciones nucleares que dan energía al Sol se estaban midiendo en los laboratorios con mayor precisión que antes, y la introducción de esos datos mejorados en los cálculos de Bahcall aumentó la confianza en sus predicciones. En 1972, después de que Davis hubiera acumulado cuatro años más de datos con un detector continuamente mejorado, Bruno Pontecorvo le escribió a Bahcall:

«¡Comienza a ser realmente interesante! Sería bonito si todo esto acaba con algo inesperado desde el punto de vista de [los neutrinos]. Por desgracia, no será fácil demostrar esto ni siquiera si la naturaleza funciona de ese modo».

Entre 1968 y 1988, muy poca gente estuvo trabajando en el campo de los neutrinos solares. El experimento de Davis con cloro fue el único que registró datos durante esas dos décadas. Bahcall resumió la situación de manera harto elocuente durante un homenaje a Ray Davis: «Todas las personas, físicos teóricos o experimentales, que trabajaban de manera estable en el campo de los neutrinos solares podían sentarse (y a menudo se sentaban) cómodamente en el asiento delantero del coche de Ray Davis»<sup>[44]</sup>.

Bahcall había actualizado y refinado sus cálculos, y se atenía a sus números. Davis continuó mejorando su experimento. En 1978, una década de desacuerdo entre los resultados del experimento de Davis y las predicciones del modelo estándar del Sol había conducido a un callejón sin salida. Aquel año se celebró un congreso científico en Brookhaven para decidir qué hacer a continuación. Estaba claro que se necesitaba un nuevo experimento, que a ser posible detectara neutrinos directamente del proceso primario de fusión protón-protón, en lugar de las cantidades relativamente menores que se originaban en el boro-8 y que Davis había estado detectando.

En general, los físicos conocían aquella situación como el problema de los neutrinos solares, y (por expresarlo con una metáfora) lo guardaron en un cajón esperando a que alguien encontrara la causa del aparente error y la saga pudiera tirarse a la papelera de los errores científicos. No obstante, a medida que una cantidad cada vez mayor de científicos continuaban examinando el trabajo de Bahcall y Davis, se fortalecía el consenso de que el aparato parecía funcionar como debía, y de que los cálculos estaban bien formulados.

Si había dudas por algo, era por la extremada sensibilidad de los cálculos de Bahcall a la hipotética temperatura en el centro del Sol.

Resultaba un valor proporcional a dicha temperatura multiplicada por sí misma veinticinco veces. Un cambio de un 1 % en la temperatura implicaría un cambio de un 30 % en el resultado. Una reducción del 10 % en la temperatura podía explicar el déficit, y fue esto lo que dio lugar a la repetida frase «¿Sigue brillando el Sol?». Como vimos en las páginas 55 y 56, varias ideas nuevas sugerían que quizás el Sol había dejado de funcionar, y que se acercaba una verdadera crisis energética<sup>[45]</sup>.

Se prestó relativamente poca atención a la posibilidad de que el Sol fuera inocente y que los culpables fueran los neutrinos. ¿Podían haber desaparecido en ruta? Una idea alocada era que existen más dimensiones aparte de las tres dimensiones espaciales que percibimos, de modo que en su viaje de 150 millones de kilómetros los neutrinos tienen una posibilidad de escapar a algún tipo de universo paralelo, y desaparecer de nuestra vista. Las discusiones continuaron durante veinte años. Es, pues, irónico que Bruno Pontecorvo hubiera propuesto la solución en 1968 tan pronto como aparecieron los primeros resultados de Davis. No estaba interesado principalmente en el Sol. En cambio, se centró en los neutrinos. Poco después de que Cowan y Reines demostraran que el neutrino existía, otros científicos habían empezado a observar cosas nada frecuentes acerca de él. Y esas fueron las cosas que Pontecorvo aprovechó en su nueva contribución fundamental a la historia del neutrino.



## UNO, DOS, TRES

Mientras Ray Davis atravesaba grandes dificultades para detectar neutrinos del Sol, los experimentos con neutrinos terrestres habían resultado tener un éxito muy destacable. Con arreglo a la teoría de Fermi, los neutrinos no siempre son elusivos. El que los neutrinos pasen a través de la Tierra «con la misma facilidad con que una bala pasa a través de un banco de niebla» es cierto cuando solo tienen energías pequeñas, como cuando los producen la desintegración beta o el Sol, pero si tienen energías muy altas, existen muchas más posibilidades de que choquen con la materia y se den a conocer. Una vez comprendido esto, los neutrinos estaban a punto de entrar en la corriente mayoritaria de la ciencia.

La idea de que la probabilidad de interacción de un neutrino aumenta con la energía estaba implícita en el artículo de Bethe y Peierls de 1934, y sus implicaciones quedaron establecidas por Mel Schwartz en Estados Unidos en 1960. Esto sucedió un año después de la aparición de un artículo fundamental de Pontecorvo, quien también había reparado en la posibilidad de usar haces de neutrinos a altas energías. Aunque importante, esa no era la razón principal por la que el artículo de Pontecorvo se hizo tan famoso. Contenía otra revelación, tan profunda que cambió la percepción de los neutrinos y condujo al «modelo estándar» moderno de las partículas y las fuerzas. Había topado con una verdad profunda y de gran

alcance: no todos los neutrinos son iguales, algunos son más iguales que otros.

Como ya hemos visto, por aquel entonces Pontecorvo estaba instalado en la Unión Soviética. Como resultado, su artículo apareció en una revista soviética y, al estar escrito en ruso, permaneció ignorado en Occidente hasta que se tradujo al inglés. Después hablaremos de las consecuencias de eso. Pero antes, veamos cómo estaban las cosas en 1959, preparando el escenario para los triunfos de Pontecorvo, y su tragedia.

### ¿QUIÉN HA PEDIDO ESTO?

---

En la década de 1940, las piezas fundamentales de los átomos se habían identificado como el electrón, el protón y el neutrón. El neutrino, años antes de su observación directa, se comparaba con un electrón, pero sin carga eléctrica ni masa, y de identidad dudosa. En general, la materia parecía bien ordenada, constituida por esas pocas partículas, aunque las leyes que gobernaban su comportamiento todavía se estaban investigando. Entonces, la radiación cósmica salió de la nada —en cierto sentido, literalmente— y reveló la existencia de nuevas partículas.

Una de ellas era el pión,  $\pi$ . Por lo menos, su existencia había sido predicha como solución a la paradoja de que los núcleos atómicos existen, a pesar de que los protones que los constituyen se repelen eléctricamente unos a otros. La causa de la estabilidad nuclear es que cuando los nucleones (neutrones y protones) están muy cerca, sienten una fuerza atractiva muy fuerte, que supera cualquier repulsión eléctrica.

Según la teoría cuántica, cuando los protones o neutrones colisionan a altas energías, un efecto de esta fuerza nuclear es convertir parte de la energía en una partícula efímera: el pión,  $\pi$ .

Hasta aquí, todo bien. No obstante, los rayos cósmicos también revelaron que interviene otro actor en el reparto de la naturaleza. Se trata del muón,  $\mu$ , el cual no parecía ser otra cosa que una versión

más pesada del electrón, una idea que Pontecorvo fue de los primeros en articular<sup>[46]</sup>. La exclamación del físico Isidor Rabi, «¿Quién ha pedido esto?», se hizo famosa, y pasarían treinta años antes de que empezara a surgir siquiera un principio de respuesta. El muón no tenía ningún lugar obvio entre los elementos de la materia conocidos en la Tierra. Tanto el muón como el pión emiten neutrinos al desintegrarse, aunque esto no se supo hasta años después de su descubrimiento.

Es irónico que el muón se descubriera antes (en 1937), y que en un primer momento se pensara que era el pión que se había predicho. De hecho, es la progenie de un pión.

El primer indicio de que la partícula no era el pión fue que no mostraba ninguna fuerte tendencia a enlazarse con el núcleo atómico. Como lo que justificaba el hecho de predecir el pión era su papel al mantener unidos los núcleos de los átomos, la aparente falta de interés de la partícula candidata no tenía sentido, a menos que, al fin y al cabo, no fuera el pión. Algunos físicos teóricos japoneses y estadounidenses ya habían planteado la posibilidad de que en realidad hubiera dos partículas: la que ya se había descubierto, a la que ahora llamamos muón, y el pión nuclear, que todavía estaba por descubrir. Esto ocurría en el período de tiempo que acabó desembocando en el descubrimiento del pión en 1947. Ese mismo año, Pontecorvo presentó argumentos muy convincentes de que el muón no era el intermediario nuclear, sino que se trataba de una versión pesada del electrón.

Para ello, demostró que su comportamiento en los átomos y núcleos o cerca de ellos se parecía más al de un electrón que al de algo relacionado con el núcleo. Sugirió que el monstruo aparecía en reacciones análogas a la desintegración beta. Ahí estaban los primeros indicios de que el muón es como un electrón pesado, y no el pión nuclear cuya existencia se había predicho.

En la actualidad sabemos que cuando los rayos cósmicos chocan con los átomos de la alta atmósfera, se produce un torrente de piones. Lo cierto es que Cecil Powell, de la Universidad de

Bristol, descubrió el pión en febrero de 1947 mientras estudiaba los rayos cósmicos. En los residuos que provienen de esas colisiones, el pión es la partícula primaria (y por dicha propiedad de ser «primaria» se la llamó  $\pi$ , la letra griega equivalente a  $p$ ). Lo que da lugar al muón es su desintegración en aproximadamente una centésima de microsegundo.

La fuerza que destruye el pión, y causa su desintegración, ahora se conoce como fuerza «débil». Su nombre refleja que es más débil que la fuerza electromagnética, la cual mantiene los electrones en su danza atómica, y que la fuerza fuerte, que mantiene unidos los protones y los neutrones en el núcleo atómico. Aparte de la cuarta fuerza fundamental, la gravedad, la fuerza débil es la menos fuerte<sup>[47]</sup>. También es la más difícil de estudiar.

La mayoría de las veces, la desintegración de un pión con carga eléctrica da lugar a un neutrino junto a un muón con la misma carga eléctrica que el pión progenitor. El muón también es inestable, y cuando se desintegra da lugar a un electrón<sup>[48]</sup> y a energía en forma de radiación, sin carga eléctrica.

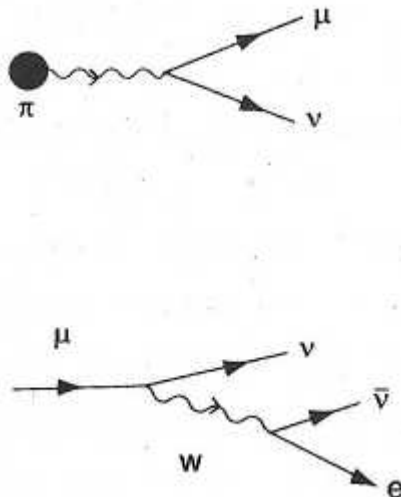


Figura 6. *Neutrinos producidos en la desintegración de piones y muones.* (a) Un pión se desintegra dando un muón y un neutrino. (b) Cuando un muón (denotado por  $\mu$ ) se desintegra en forma de un electrón, tienen (b) que aparecer también dos neutrinos (en realidad un neutrino,  $\nu$ , y un antineutrino,  $\bar{\nu}$ ).

El pión y el muón eran relativamente fáciles de producir y estudiar en el laboratorio, y pronto se descubrió que el muón tiene una rotación intrínseca o espín de valor  $\frac{1}{2}$ , como un electrón o un neutrino, mientras que el pión no lo tiene. Esto también encaja con la idea de que cuando un pión se desintegra, el espín semientero del muón es contrarrestado por una rotación contraria de un neutrino de espín semientero. En el caso de la desintegración del muón, sin embargo, no hay cambio en el espín: el muón tiene espín  $\frac{1}{2}$ , igual que el electrón en el que se transforma. En todos los aspectos, es como si el muón fuera una versión más pesada del electrón, que simplemente radia energía y queda reducido a un electrón otra vez. Si eso fuera todo, la desintegración de un muón tendría que dar lugar a un electrón y un fotón de luz según la reacción:  $\mu \rightarrow e + \gamma$ . Sin embargo, un joven físico llamado Jack Steinberger estaba a punto de demostrar que este no es el caso. Al hacerlo, desveló un gran misterio.

#### JACK STEINBERGER

Jack Steinberger nació en Bad Kissingen (Franconia) en 1921. Su padre, Ludwig, era uno de los ocho<sup>[49]</sup> hijos de un comerciante rural de ganado vacuno, que también era profesor de religión en la pequeña comunidad judía. Su madre, que pudo disfrutar de un nivel de educación poco usual en aquella época, redondeaba las escasas ganancias de la familia dando clases de inglés y francés, principalmente a los turistas que sostenían la economía de los balnearios. Alemania estaba en plena depresión posterior a la Primera Guerra Mundial.

Después de que los nazis tomaran el poder, organizaciones benéficas de judíos americanos ofrecieron hogares a trescientos niños alemanes refugiados. El padre de Steinberger pudo solicitar uno para Jack y su hermano mayor. Llegaron a Nueva York por la Navidad de 1934. El propietario de una empresa de correduría de cereales de la Cámara de Comercio de Chicago alojó a Jack en su

casa, le procuró estudios secundarios, y también hizo posible que los padres y el hermano menor de Jack emigraran a Estados Unidos en 1938, con lo que huyeron del Holocausto.

Durante dos años estudió ingeniería química en el Instituto Armour de Tecnología (que ahora es el Instituto de Tecnología de Illinois), pero eran los tiempos difíciles de la depresión, y se acabó su beca. Tenía que trabajar para contribuir a los ingresos familiares, así que solo podía estudiar química por las tardes en la Universidad de Chicago. Al año siguiente, con la ayuda de una beca de la universidad, pudo asistir de nuevo a clases diurnas, y en 1942 obtuvo un título medio en química.

Como había empezado la Segunda Guerra Mundial, se alistó en el ejército, donde tuvo lugar su primera introducción intensiva a la física. Después de pasarse algunos meses estudiando la teoría de las ondas electromagnéticas en un curso especial para personal militar en la Universidad de Chicago, lo enviaron al laboratorio de radiación del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts). Dicho laboratorio estaba trabajando en el desarrollo de miras para bombarderos basadas en el radar. Lo asignaron al grupo de antenas. Los dos años que pasó allí le dieron la oportunidad de asistir a algunos cursos básicos de física.

Tras la rendición japonesa, continuó sus estudios en la Universidad de Chicago. Allí le inspiraron los cursos de Enrico Fermi, que recuerda como «joyas de simplicidad y claridad». Entre sus compañeros de estudios estaban los futuros premios Nobel C. N. Yang y T. D. Lee, así como varios físicos más que realizaron notables contribuciones en su campo. «Había una maravillosa colaboración, y creo que aprendí tanto de [ellos] como de los profesores», rememoró Steinberger en su propio discurso de aceptación del Premio Nobel.

Quería hacer una tesis sobre física teórica, y Fermi se la dirigió. Esto fue durante el interregno en el que el pión había sido predicho, pero no hallado todavía. El muón había sido hallado, pero no predicho. Y la creencia de que el muón era de hecho el pión

empezaba a desmoronarse. Pontecorvo acababa de proponer que aquella partícula, que ahora llamamos el muón, parecía una versión más masiva del electrón, y que a todos los efectos era un electrón que contenía mucha más energía. Los experimentos demostraban que cuando un muón se desintegraba daba un electrón, y liberaba energía en alguna forma invisible. Si fuera cierto que un muón es simplemente un electrón pesado, entonces tendría que poder desprenderse, de aquella energía en forma de luz, un rayo gamma. Sin embargo, no parecía que ocurriera esto. Si hubiera ocurrido, los experimentos que estudiaban qué sucedía cuando los muones se detienen en la materia y se desintegran tendrían que haber hallado cuatro o cinco veces más electrones de los que realmente se estaban viendo. Algo fallaba.

Fermi se lo explicó a Steinberger, y sugirió que el aparente déficit podía darse si en algunas ocasiones el electrón tenía menos energía de la que el experimento permitía detectar. En tal caso, la desintegración no quedaría registrada. Si un muón se desintegra y da un electrón y un único fotón, la energía de ese electrón está fijada. Steinberger y Fermi se dieron cuenta de que, si el electrón iba acompañado de dos partículas, lo que daba un total de tres, la energía del electrón podía pertenecer a cierto intervalo de valores, algunos de los cuales no se habrían detectado en el experimento original. Incluso mejor, Steinberger sugirió una manera de comprobar esa idea por medios experimentales.

Fermi estaba intrigado y, como nadie parecía preparado para acometer el experimento, le sugirió a Steinberger que lo hiciera él mismo. Así lo hizo. Tardó menos de un año, entre su concepción y su conclusión en el verano de 1948. Y confirmó su conjetura: el muón se desintegra y da un electrón acompañado por otras dos partículas, no una sola.

Esto demostraba que cuando se desintegra un muón, sean cuales sean los productos de la desintegración, no se trata simplemente de un electrón y un fotón<sup>[50]</sup>. Las dos partículas «ausentes», tomadas de manera conjunta, deben tener carga

eléctrica nula, muy poca masa o ninguna, y sus espines combinados tienen que cancelarse el uno al otro. Podrían haber sido fotones, pero en este caso no había razón alguna para que se necesitaran dos cuando con uno habría sido suficiente e incluso más fácil. Alguna ley tenía que estar impidiendo que el muón se convirtiera en un electrón limitándose a liberar energía en forma de fotones. La radiación invisible no podía ser de fotones. Todo cuadraba con la idea de que consistía en dos neutrinos, los cuales estaban escapando a la detección.

En cierto modo, se estaba retomando la sugerencia original de Pauli sobre el neutrino, como un agente que permitía explicar la energía «desaparecida» en la desintegración beta. Para unos oídos modernos, la sugerencia de que la desintegración de un muón produce dos neutrinos podría parecer obvia. En 1948, cuando todavía faltaban ocho años para demostrar de manera irrefutable la realidad del neutrino, estaba lejos de ser evidente.

En 1956 los físicos teóricos T. D. Lee y C. N. Yang indicaron que los procesos controlados por la fuerza débil podrían ser distintos de su imagen reflejada, una propiedad que se llamó «violación de la paridad». Esto no tardó en confirmarse a raíz de los experimentos con la desintegración beta (de núcleos de cobalto) y con la desintegración de muones, que condujeron a la concesión del Premio Nobel a Lee y Yang en 1957. La causa de las desintegraciones de piones cargados también era la fuerza débil. Si la violación de la paridad estaba presente en ese caso, entonces por cada 9999 piones que se desintegraran en forma de un muón y un neutrino, uno debería desintegrarse en forma de un electrón (o positrón) y un neutrino; de hecho, como en la desintegración beta «tradicional». En 1958, Steinberger y algunos colaboradores demostraron que cuando los piones con carga positiva que provenían de un acelerador eran detenidos por los protones en un tanque de hidrógeno líquido, los rastros de burbujas resultantes permitían distinguir las desintegraciones que daban muones de las que daban positrones. Encontraron más de cincuenta mil ejemplos



de desintegraciones que daban muones, y seis ejemplos claros de positrones: una relación consistente con la esperada si se estaba violando la paridad.

Así pues, el «catálogo» de desintegraciones beta se estaba ampliando. Las desintegraciones tradicionales de partículas nucleares producían electrones (o positrones) y neutrinos. Una vez de cada diez mil, el pión también se desintegraba así, pero la mayor parte de veces lo hacía en forma de un muón y un neutrino. Bruno Pontecorvo empezó a preguntarse lo siguiente: los neutrinos que se producen cuando un pión se desintegra dando un muón ¿son los mismos que se emiten en las desintegraciones beta convencionales? Una vez más, Pontecorvo estaba haciendo la pregunta adecuada con una anticipación asombrosa.

#### HISTORIA DE DOS NEUTRINOS

En 1958, la teoría de Fermi de la desintegración beta estaba bien establecida, hasta cierto punto. Ya se había descubierto el neutrino, y el ritmo al que Cowan y Reines detectaban neutrinos en su experimento encajaba bastante bien con lo que Fermi había esperado. El fenómeno de la violación de la paridad requería que se revisaran algunos detalles matemáticos, pero las ideas básicas eran las mismas. La teoría de Fermi implicaba que la probabilidad de que los neutrinos interactuaran aumentaba con la energía. Esto sería una buena noticia para los experimentos en los aceleradores, pero también tenía consecuencias absurdas. Si nos imaginábamos haciendo experimentos con energías extremadamente altas, más allá de las posibilidades técnicas en 1958 pero posibles en principio algún día, la teoría implicaba que algunas cosas podían suceder con una probabilidad mayor que el cien por cien.

Esto era ilógico. La solución era abandonar la idea de Fermi de que todas las partículas implicadas se encontraban en un mismo punto. Las fuerzas electromagnéticas eran transmitidas por unos agentes, los fotones, y así empezó a afianzarse la idea de que quizá

la fuerza débil también tuviera un agente, un bosón W (de *weak*, o sea, «débil» en inglés<sup>[51]</sup>). Mientras que esto evitaría el absurdo, G. Feinberg indicó que tenía una consecuencia relativa a la desintegración del muón. Un muón se desintegra dando un electrón y dos neutrinos por la acción intermediaria de un bosón W. Las leyes de la mecánica cuántica implican que se puede prescindir de los neutrinos, y que el muón puede desintegrarse en forma de un electrón y un fotón, aproximadamente una de cada diez mil veces. Sin embargo, por aquel entonces se habían registrado más de cien millones de ejemplos de desintegraciones de muones y en ninguno aparecía esa modalidad de un electrón y un fotón.

Feinberg indicó, sin embargo, que en su razonamiento se daba por supuesto que el neutrino asociado con el muón y el emparejado con el electrón (véase la figura 7) eran iguales. Aquí estaba la primera sugerencia de que en realidad dichos neutrinos podían ser diferentes. Al margen de esto, Pontecorvo lo articuló en su forma más limpia, y examinó todas las pruebas, sugirió comprobaciones experimentales e indicó que, teniendo en cuenta las energías cada vez mayores de los aceleradores, tales experimentos podrían ser viables en un futuro próximo si se usaban haces de neutrinos. Como ya hemos comentado, Pontecorvo vivía en Moscú, por lo que escribió su artículo en ruso y lo publicó en la *Revista Soviética de Física* en 1959. Su trabajo no se dio a conocer en Occidente hasta que apareció traducido al inglés en 1960.

A Pontecorvo le fascinaba el hecho de que el muón no se desintegre en forma de un electrón y un fotón. Olvídese la cuestión de si ocurre una vez de cada diez mil. Para él, la paradoja era mucho más cruda: ¿por qué no sucedía casi de continuo? Liberar un fotón tenía que ser mucho más fácil que ser destruido por la fuerza débil. Se dio cuenta de que, si no sucedía así, tenía que ser porque algo se lo prohibía. Después de haber sido el primero en argumentar que el muón era un pariente del electrón, ahora Pontecorvo era el primero en proponer que el muón no consiste simplemente en un electrón pesado, sino que tiene alguna propiedad especial que le da

la «muonicidad». Hoy en día lo llamamos «sabor», pero continúa siendo un misterio saber en qué consiste exactamente.

Pontecorvo tomó esa idea y exploró sus implicaciones más amplias: si un muón y un electrón tienen distinto sabor, ¿por qué no iban a tenerlo también los neutrinos? Vio que esto daba lugar a una bonita simetría entre las partículas: un electrón y su neutrino acompañante forman una pareja, mientras que el muón y su neutrino acompañante forman otra. Se adoptaron los términos «neutrino electrónico» y «neutrino muónico», respectivamente. En la notación abreviada de la física de partículas se escriben « $\nu_e$ » y « $\nu_\mu$ », pero utilizando la letra griega  $\nu$ , no una  $\nu$  curvada.

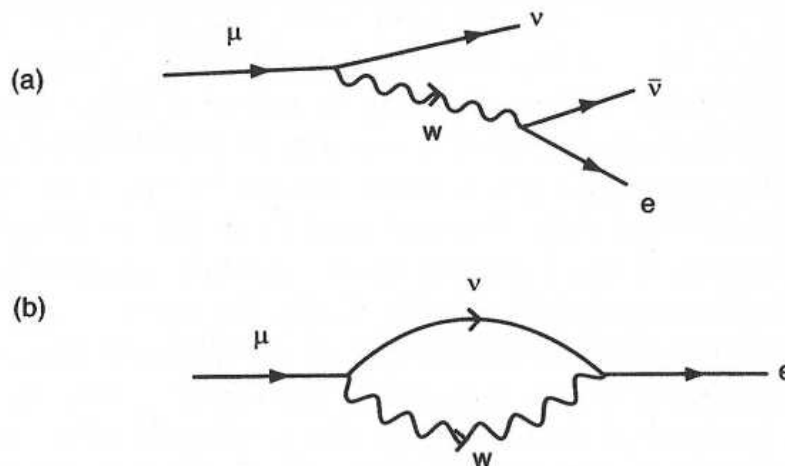


Figura 7. *El bosón W y las desintegraciones de muones.* El bosón W es el agente intermediario en la desintegración del muón,  $\mu$ , en forma de un electrón y un par de neutrinos,  $\nu$  y  $\bar{\nu}$  (mostrados en la fig. [a]). Si estos dos neutrinos fueran del mismo tipo, sería posible que un muón se convirtiera en un electrón y un fotón, cortesía del bosón W y de un neutrino que estarían momentáneamente presentes en un paso intermedio, mostrado en (b).

Primero demostró que, si la «electronicidad» y la «muonicidad» se preservaran en la naturaleza, esto prohibiría que un muón se desintegrara en forma de un electrón y un fotón. Luego enumeró algunas maneras de comprobar la idea. La más dramática era que un neutrino, además de tener energía, de algún modo tenía

memoria con respecto a su origen. Por consiguiente, si se produce un neutrino junto a un electrón o un muón, más tarde, cuando choque con la materia y adquiera carga eléctrica, su energía tiene que materializarse como un electrón o un muón, respectivamente.

Esta idea estaba clara, pero como la propiedad más singular de los neutrinos había sido su resistencia a dejarse ver siquiera, cualquier esperanza de efectuar mediciones muy detalladas respecto a si se convertían en electrones o muones parecía estar muy lejos de conseguirse en la práctica. Aquí es donde Pontecorvo hizo su segundo comentario importante: los ritmos a los que interactuaban los neutrinos aumentaban cuando lo hacía la energía, lo cual significaba que podían volverse detectables siempre que, de algún modo, pudieran conseguirse neutrinos de alta energía. Esto le dio una inspiración: sugirió que los nuevos aceleradores de alta energía serían el lugar adecuado para hacer el experimento.

Su idea era producir grandes cantidades de piones de alta energía haciendo colisionar un haz de protones de alta energía contra un objetivo. Los piones se desintegran en forma de muones y neutrinos, que continúan volando en la misma dirección del haz original. Un escudo de acero absorberá los muones, pero será casi transparente para los neutrinos. Varios metros más allá se necesita otro gran objetivo como detector. Los neutrinos tendrán una alta energía, por lo que existirá una probabilidad razonable de que algún neutrino choque de manera ocasional con un átomo en el detector y se dé a conocer. Si todos los neutrinos son iguales, las cantidades producidas de electrones y muones serán similares. En cambio, si solo aparecen muones, entonces los neutrinos tienen una identidad: los neutrinos electrónicos difieren de los muónicos.

Como estaba en la Unión Soviética, Pontecorvo carecía de posibilidades de realizar el experimento, pues por aquel entonces las instalaciones de allí eran inferiores a las occidentales. Hacia 1960 el experimento ya era posible en Brookhaven, en Estados Unidos, y en el CERN de Ginebra, pero en Dubna, el laboratorio cercano a Moscú, no lo era. A Pontecorvo no se le permitió cruzar el

Telón de Acero hasta la década de 1980. Aquel premio lo ganarían otros.

#### LEON LEDERMAN Y MEL SCHWARTZ

---

En la década de 1950, en el Departamento de Física de la Universidad de Columbia, los viernes era tradición discutir los problemas más recientes de la especialidad durante un almuerzo con comida china. El viernes 4 de febrero de 1957, T. D. Lee pidió el menú y luego anunció que en los experimentos con núcleos de cobalto empezaba a parecer que se violaba la paridad en la interacción débil. Cuando iban por el penúltimo plato empezó a formarse una idea en la mente de Leon Lederman<sup>[52]</sup>.

Lederman había nacido y crecido en Nueva York, y en aquel momento estaba en Columbia, donde era miembro del profesorado. Había estado haciendo experimentos con piones y muones en el Laboratorio Nevis, en el cercano Irvington-on-Hudson, en particular midiendo la desintegración del pión cargado en forma de un muón y un neutrino. Esto lo causaba la interacción débil, y de repente se dio cuenta de que ahí había una manera mucho más fácil de buscar casos de violación de la paridad que la lenta desintegración beta nuclear.

En Nevis, un haz de protones chocaba contra un objetivo y producía intensos haces de piones. A medida que los piones atravesaban la estancia, aproximadamente un 2.0 % de ellos se desintegraban y daban un muón y un neutrino, los cuales continuaban en la misma dirección en la que habían estado moviéndose sus progenitores. El pión no tiene espín, de modo que el neutrino y el muón tenían que girar en sentidos opuestos para que los momentos angulares se cancelaran. Pero si se viola la paridad, el neutrino sin masa solo gira en un sentido (tradicionalmente conocido como de mano izquierda), lo que también limitaría el espín del muón a una única orientación. La cuestión era la siguiente: ¿cómo medir la dirección de ese muón giratorio?

Gracias a una propiedad de la naturaleza según la cual el muón también se desintegra por la interacción débil, y produce un electrón y dos neutrinos. Todo lo que se necesitaría sería detener los muones y ver en qué direcciones emergían los electrones. Si se violaba la paridad, la tendencia del muón a girar en un solo sentido provocaría que salieran más electrones en la dirección en la que se movían previamente los muones, hacia delante, que, en la dirección opuesta, hacia atrás. Nada más terminar su trabajo en la universidad por la tarde, Lederman se apresuró a llegar al Laboratorio Nevis, donde les dijo a sus estudiantes que modificaran el experimento que habían estado haciendo, para comprobar su idea. Mientras cenaba rápido habló por teléfono con un colega, Dick Garwin, y lo invitó a que fuera a colaborar con ellos. Hacia las ocho de la tarde estaban trabajando intensamente rediseñando el experimento. Poco después de medianoche comenzaron a tomar medidas, y empezaron a aparecer algunos indicios fascinantes que sugerían que iban por el buen camino. Por desgracia, el acelerador ya estaba reservado para otros experimentos, y tuvieron que hacer una pausa, y dedicar el día siguiente a comprobar y mejorar el aparato. El lunes estaban listos para continuar, pero los equipos de mantenimiento del acelerador tenían problemas. No pudieron empezar en serio hasta el anochecer del lunes. Garwin cogió el turno de noche. A las tres de la madrugada del martes, una llamada telefónica despertó a Lederman: «Será mejor que vengas. Lo hemos logrado». Hacia las seis de la mañana no había duda: estaban viendo un efecto enorme, pues iban hacia delante más del doble de los electrones que iban hacia atrás. No solo se violaba la paridad, sino que era completamente destruida. Ahora le tocaba a Lederman despertar a alguien: T. D. Lee. Hacia las siete de la mañana estaban recibiendo llamadas de colegas de la Universidad de Columbia que ya sabían la noticia y, hacia el final del día, físicos de varias partes del mundo, como Ginebra y Moscú, estaban repitiendo el experimento y verificándolo por sí mismos. Lederman anunció los resultados a una audiencia de unas dos mil personas en la reunión

anual de la Sociedad Americana de Física, en Nueva York, el 6 de febrero de 1957.

Como ya hemos visto, al año siguiente Steinberger midió la poco frecuente desintegración de un pión en forma de un neutrino y un electrón: la desintegración beta «normal». Ya no cabía duda de que esas desintegraciones implicaban a la desintegración débil, y de que las partículas fantasmales ausentes eran neutrinos. Lederman y Steinberger no tardaron en unirse a Mel Schwartz, antiguo alumno de Steinberger y por aquel entonces profesor asistente en Columbia, en la colaboración que iba a reescribir la terminología de los neutrinos. En este caso la historia también empieza en uno de los famosos almuerzos de Columbia. En noviembre de 1959, T. D. Lee estaba pensando en las consecuencias paradójicas de la teoría de Fermi para el comportamiento de las interacciones débiles a altas energías, y encabezaba una discusión sobre el modo de comprobarla experimentalmente. Sería difícil de estudiar porque cuando las partículas colisionan a altas energías, los efectos de las fuerzas electromagnética y fuerte tienden a ocultar los de la fuerza débil.

Más tarde, Mel Schwartz rememoró que «la idea me vino aquella noche, tumbado en la cama. Era increíblemente simple. Todo lo que debía hacerse era usar neutrinos»<sup>[53]</sup>. La idea era que la producción de piones, seguida por sus desintegraciones, podría producir neutrinos en cantidad suficiente para usarlos en experimentos.

Resumió aquellas ideas en un breve artículo que fue publicado en 1960. Y solo entonces apareció la traducción al inglés del artículo de Pontecorvo. Al final de su artículo, Schwartz hizo referencia al «artículo relacionado que acaba de aparecer» que había escrito Pontecorvo, y agradeció a Lee y Yang el que subrayaran la importancia de las interacciones de los neutrinos de alta energía.

Al hablar de «artículo relacionado» se refería a la mención que hacía Pontecorvo de que el camino a seguir era el estudio de los neutrinos de alta energía. Sus ideas, más profundas, sobre los dos «sabores» distintos del neutrino no estaban en el artículo de

Schwartz. No obstante, al mismo tiempo, Lee y Yang también habían estado pensando en qué podía aprenderse de aquellos experimentos. En el verano de 1960 habían llegado a la misma conclusión a la que, sin ellos saberlo, había llegado Pontecorvo: la ausencia de la desintegración de un muón como un electrón y un fotón podía ser la pista clave para demostrar que el neutrino muónico y el neutrino electrónico eran diferentes. Esto se convirtió en el objetivo a conseguir.

Pero la cuestión era la siguiente: ¿cómo hacerlo? Aunque no existía ningún acelerador con suficiente potencia para producir un haz de neutrinos lo bastante intenso para el experimento, en Brookhaven estaba a punto de completarse el nuevo AGS (*Alternating Gradient Synchrotron* o Sincrotrón de Gradiente Alterno). Leon Lederman calculó que el experimento podía hacerse allí, y convenció a Schwartz de que podía funcionar<sup>[54]</sup>. Un equipo de siete miembros se puso manos a la obra: Schwartz, Steinberger, Lederman y cuatro estudiantes y posdoctorados.

Usaron el acelerador de Brookhaven y dispararon sus intensos haces de protones contra objetivos de berilio. Esto producía grandes cantidades de piones, que se desintegraban rápidamente como muones y neutrinos. Una barrera de acero de trece metros de grosor, construida con las placas de un viejo barco de guerra, filtraba los muones. Los neutrinos la atravesaban limpiamente, y algo más lejos se encontraban con diez toneladas de aluminio. Durante un período de diez días, más de cien billones de neutrinos pasaron a través de ella, de los cuales solo 51 se dieron a conocer al chocar con el aluminio y adquirir carga eléctrica. No obstante, cada una de estas 51 colisiones dio como resultado un muón. Ninguna dio lugar a un electrón. El trío de científicos había demostrado que los neutrinos muónicos y los neutrinos electrónicos tienen identidades distintas<sup>[55]</sup>.

Tres décadas después, en 1988, Lederman, Steinberger y Schwartz compartieron el Premio Nobel de Física. Su trabajo había establecido que es posible producir haces de neutrinos de alta



energía y usarlos para sondear las interacciones débiles, y en los años que mediaron habían investigado las interacciones débiles de varios modos con esas técnicas. Su descubrimiento de que los neutrinos muónicos y los neutrinos electrónicos son distintos se convirtió en uno de los fundamentos del modelo estándar moderno de la física de partículas.

Es posible que Schwartz se perdiera la oportunidad de ganar un segundo Premio Nobel. En 1971 estaba usando un dispositivo experimental similar en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (Stanford Linear Accelerator Center, SLAC) de California. Halló cinco casos poco usuales en los que aparentemente los neutrinos habían interactuado con el objetivo, pero sin que el resultado fuera un muón. En retrospectiva, parece probable que estuviera observando por primera vez las interacciones de «corriente neutra», en las que un neutrino rebota en el objetivo sin adquirir carga eléctrica.

En 1971, la administración del SLAC tenía otras prioridades. Algunos experimentos realizados allí acababan de revelar indicios de que los protones y los neutrones no son partículas puntuales, sino que están hechas de constituyentes más fundamentales, que hoy conocemos como quarks. Dado que esto parecía muy probable, pero no se entendía del todo, en el SLAC se le dedicó la mayor parte de los esfuerzos. Dicha cuestión también valdría un Premio Nobel. A la desesperada, Schwartz intentó conseguir financiación de la Fundación Nacional para la Ciencia, pero sin éxito. Por aquel entonces yo estaba en el SLAC, y recuerdo que Schwartz insistía una y otra vez en que había descubierto algo completamente nuevo, y que estaba muy frustrado por no poder seguirle la pista. Más tarde dejó la física de partículas y fundó Digital Pathways, una empresa de informática.

Las «corrientes neutras» acabarían descubriéndose en el año 1973 en la colaboración *Gargamelle* en el CERN. Esto confirmaba las teorías que unían las fuerzas electromagnética y débil, las cuales se habían inspirado en parte por el descubrimiento de los dos tipos

de neutrino. En su discurso de aceptación del Premio Nobel, Schwartz subrayó en un alarde de generosidad que muchas de las ideas de Pontecorvo, a las que había llegado por su cuenta, eran las mismas que las de Schwartz, Steinberger y Lederman, y dijo: «Su contribución general al campo de la física de neutrinos fue ciertamente de la mayor importancia»<sup>[56]</sup>.

#### «POST SCRIPTUM»: TRES NEUTRINOS

En 1976 se descubrió una forma todavía más pesada del electrón, conocida como tau,  $\tau$ . Por aquel entonces ya había aparecido el «modelo estándar» de la física de partículas, el cual predice que cada variedad de leptón cargado (electrón o partícula similar) tiene un compañero neutro. Así que era necesario un tercer tipo de neutrino, asociado con la partícula tau, para completar la historia.

Si encontrar el  $\nu_e$  y el  $\nu_\mu$  había sido difícil, detectar el  $\nu_\tau$  lo era más todavía. Al adquirir carga, el neutrino tauónico se convertirá en una partícula tau, pero esta última es muy masiva, más del doble que el protón, de modo que, para empezar, necesita neutrinos de alta energía. La partícula tau es inestable, y se desintegra en menos de una milésima de millonésima de segundo, y da un muón o electrón y otras partículas. Todo esto la hace difícil de identificar, incluso cuando está presente. En la década de 1990 se habían hallado indicios indirectos de la existencia del neutrino tauónico en el CERN, mediante el gran colisionador de electrones y positrones llamado LEP (*Large Electron Positron Collider*), pero la observación directa no se consiguió hasta el año 2000 mediante el experimento DONUT (*Direct Observation of Nu-Tau*) en el Fermilab de Chicago.

El descubrimiento de la partícula tau en 1976 había sido completamente inesperado, y le valió el Premio Nobel a Martin Perl. Indicó el camino a seguir para encontrar su neutrino acompañante, y anticipó su descubrimiento, aunque este fuera difícil. Tal vez la consecuencia más profunda sea que treinta años después del descubrimiento de la partícula tau cabía reivindicar una vez más el

artículo de Pontecorvo de 1959 que identificaba el «sabor» como una propiedad especial, y les atribuía un «carné de identidad» a los neutrinos.

Los experimentos en el LEP también demostraron que los ligeros neutrinos no tienen más que tres tipos. Esto implica que no tienen más compañeros con carga aparte del electrón, el muón y la partícula tau. En el modelo estándar de la física de partículas, el protón, el neutrón y el pión están formados por «quarks», y los seis leptones están acompañados por seis variedades (o sabores) de quarks. Todos ellos han sido también identificados en experimentos realizados a lo largo de medio siglo. Así que el humilde y misterioso neutrino, con sus tres variedades, nos ha permitido delimitar los tipos de materia que usa la naturaleza. Esta es la primera vez en la historia en que se ha encontrado un límite al número de partículas fundamentales.

¿Por qué hay tres sabores de neutrino? Nadie lo sabe todavía. Sin embargo, con otra de sus intuiciones fundamentales, Pontecorvo iba a demostrar que el hecho de que haya más de uno desempeña un papel importante en el misterio de los neutrinos solares.

## MÁS NEUTRINOS AUSENTES

### TODO EL GALIO DEL MUNDO

En 1978, los datos del experimento de Davis en la mina de Homestake estaban mejorando y haciéndose más precisos. El conflicto entre lo que se estaba midiendo y lo que se esperaba encontrar se hacía más profundo.

El ritmo medido de producción de neutrinos solares en el raro proceso que se podía detectar se estaba estabilizando alrededor de 2,2 SNU, con una incertidumbre de 0,4 SNU en uno u otro sentido: el total tenía que encontrarse entre 1,8 y 2,6 o, con una probabilidad mucho menor, fuera de ese intervalo. Esos cálculos teóricos de Bahcall para esa cantidad también se habían agudizado, y en 1980 el valor de su predicción era de 7,5 SNU, con una incertidumbre de 1,5. La teoría básica no había cambiado en realidad. Más bien, lo que había aumentado la confianza de Bahcall en sus números fue la mejora en los datos sobre procesos nucleares fundamentales.

Incluso interpretando el resultado de Homestake al alza, 2,6 SNU, y creyendo que la estimación de Bahcall de lo que debería hallarse podía ser tan baja como 6 SNU, era difícil evitar la conclusión de que Davis estaba detectando una cantidad de neutrinos inferior a la mitad de la esperada.

Persistían las dudas sobre hasta qué punto esta discrepancia era realmente significativa. La razón de tal incertidumbre era que Davis

solo estaba observando neutrinos producidos en una reacción poco frecuente de la que se dan uno o dos casos por cada diez mil fusiones pp iniciales. El ritmo total de producción de esos neutrinos particulares depende mucho de los ritmos individuales de los diversos procesos nucleares implicados en el ciclo pp. Aunque los datos sobre estos habían mejorado sensiblemente como resultado del estímulo planteado por la búsqueda de Davis, y a su vez habían permitido que Bahcall precisara sus predicciones, había una clara necesidad de realizar un nuevo experimento para descubrir si el problema estaba en la teoría del Sol, o en los neutrinos.

Esto se convirtió en uno de los temas de un congreso sobre neutrinos que se celebró en Hungría en 1974. Bruno Pontecorvo anunció que él y tres colegas suyos tenían planes para la excavación de un túnel de cuatro kilómetros bajo el Cáucaso, como ubicación para un laboratorio dedicado a los neutrinos. Esto incluiría un detector basado en cloro con casi dos millones de litros de líquido, unas cinco veces la capacidad del de Homestake, el cual se esperaba que pudiera confirmar los resultados de Davis, y también mejorar la sensibilidad.

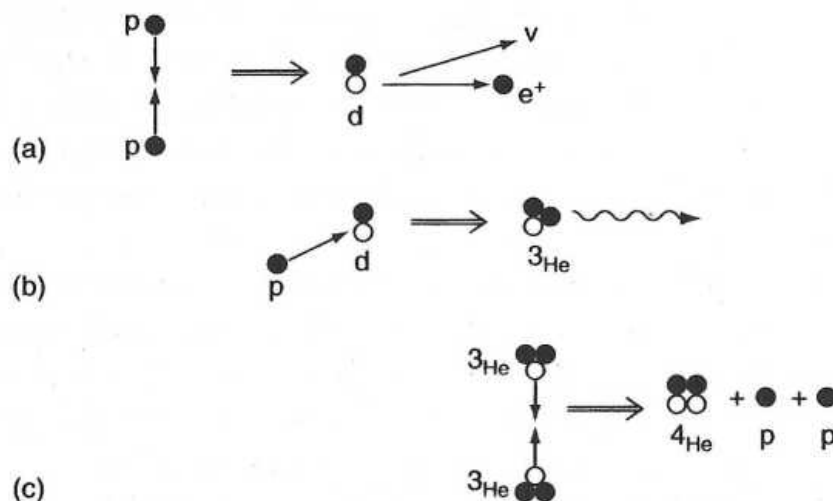


Figura 8. La reacción de fusión protón-protón (pp) en el Sol.

Aunque esto pudiera ser útil, no llegaría hasta el corazón del asunto, lo que requeriría la detección de neutrinos producidos por el proceso de fusión pp básico y dominante. El problema era que las energías de los neutrinos que provienen de esta reacción primaria son demasiado pequeñas para que el cloro reaccione. En fecha tan temprana como 1964, y pensando en el primer intento fallido de Davis, Bahcall había comentado<sup>[57]</sup> que si el nuevo experimento de Davis no conseguía ver neutrinos entonces valdría la pena una búsqueda dedicada a los neutrinos de baja energía provenientes de la cadena pp primaria. Davis sí veía neutrinos, pero nunca los suficientes.

Una ventaja de tales datos, desde un punto de vista teórico, era que resultaba posible predecir la cantidad de esos neutrinos primarios simplemente a partir de la luminosidad visible del Sol: no era necesario conocer con detalle los ritmos de las reacciones nucleares que habían sido un engorro hasta entonces. Esta era la buena noticia. El problema era que para detectar esos neutrinos de baja energía se necesitaba un dispositivo experimental con galio en lugar de cloro. Un experimento exitoso con galio sería enormemente caro, y un motivo no precisamente menor para ello era que, para funcionar en la práctica, necesitaría unas tres veces más galio del que se producía cada año en el mundo.

Davis y Bahcall ya habían dedicado la mayor parte de las dos últimas décadas a cazar neutrinos solares, así que estaban dispuestos a hacer lo que fuera necesario para resolver la cuestión. Si ello les obligaba a construir un detector que contuviera todo el galio del mundo, por lo menos tenían que intentarlo.

Para tener alguna posibilidad necesitaban reunir apoyos. Un artículo en *Physical Review Letters*, firmado por varios colegas que eran físicos experimentales, describió las ventajas de un detector de galio, argumentando que sería sensible a los neutrinos producidos por la reacción pp fundamental, y que sería capaz de distinguir entre las diversas explicaciones del problema de los neutrinos solares. Si conseguían construir un detector con galio, su sensibilidad,

comparada con lo que habían logrado hasta entonces, prometía ser considerable. Bahcall había calculado que en el detector de Davis el ritmo de captura de neutrinos solares sería de 8 SNU, de los cuales 1,2 provendrían del berilio-7, 6,2 del boro-8, y el resto de su muy variado «bufé» de otros procesos nucleares. En el caso del detector de galio se podía esperar que el ritmo de captura fuera tan enorme como 132 SNU. La razón principal es que el detector de galio es sensible a neutrinos de energía mucho más baja, que el cloro no captura. Esto incluye el muy importante caso de los neutrinos provenientes del proceso de fusión pp básico, que según lo esperado aportaría por sí solo 74 SNU y era el motivo principal para usar galio. Pero también se eleva el ritmo para los neutrinos producidos por otras fases de la cadena de reacciones solares. Mientras que la sensibilidad a los neutrinos del berilio-7 y el boro-8 había sido solo de 7,5 SNU en el detector de Davis, Bahcall estimó que un experimento con galio aumentaría ese ritmo hasta 50 SNU. Con galio podrían tener acceso a todo el espectro de neutrinos y, lo que es más, con una buena intensidad. Si se podía montar un experimento con galio, seguramente se encontrarían las respuestas.

Durante los cinco años siguientes la propuesta fue examinada por varios comités que actuaban en nombre del Departamento de Energía de Estados Unidos, el cual financiaba el Laboratorio Brookhaven y buena parte de la investigación en física. Todos los informes eran igualmente favorables. La política no lo fue.

Los físicos decían que el experimento tenía un inmenso potencial para comprender la naturaleza fundamental del Sol, y que estaba claro que debía financiarse. Pero después decían que el dinero tenía que salir del presupuesto de astronomía antes que del de física. Los astrónomos también consideraban que la física del experimento era excelente... ¡pero recomendaban que lo pagaran los físicos! Las secciones de física nuclear y de física de partículas del Departamento de Energía no podían conseguir que sus respectivos miembros se pusieran de acuerdo acerca de la responsabilidad financiera.

Como el Departamento de Energía no podía lograr que nadie pagara, Davis y Bahcall se dirigieron a la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF, National Science Foundation). En este caso había un inconveniente inmediato: Davis trabajaba en el Laboratorio Nacional de Brookhaven pero, por una cuestión de criterios, la NSF no apoya propuestas de investigación provenientes de laboratorios, como el Brookhaven, que ya están financiados directamente por el Departamento de Energía. A la desesperada, Bahcall, que estaba adscrito al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, fue nombrado investigador principal, de modo que con su dirección de la universidad se pudiera hacer una solicitud a la NSF. Así pues, también en este caso el trámite había topado con un conflicto acerca de quién debía firmar.

El final de esta larga historia es que en Estados Unidos jamás se financió ningún gran experimento con galio. Se consiguió realizar una prueba piloto con más o menos una tonelada de galio, que demostró la viabilidad de la técnica. Parte de las ideas y del equipamiento que se desarrollaron en este estudio preliminar acabarían usándose en un experimento a gran escala, «GALLium EXperiment», conocido como GALLEX, que implicaba a científicos europeos y se localizó en Italia central, bajo la montaña Gran Sasso.

En la Unión Soviética las actitudes eran muy diferentes. Moisey Markov, jefe de física nuclear en la Academia Rusa de Ciencias, estaba tan entusiasmado que ayudó a poner en práctica el plan de Pontecorvo de 1974, estableciendo el observatorio de neutrinos Baksan bajo las montañas del Cáucaso en Rusia. Y lo más importante, Markov negoció con éxito que los físicos rusos pudieran usar sesenta toneladas de galio, sin cargo alguno, mientras durara su experimento. Esto condujo a una colaboración entre Rusia y Estados Unidos conocida como SAGE («Soviet American Gallium Experiment» o «Experimento con Galio Soviético-Estadounidense»). Sin embargo, cuando empezó la colaboración, la Unión Soviética ya no existía, y el experimento pasó a llamarse «Experimento con Galio



Ruso-Estadounidense», aunque prudentemente no se cambió el acrónimo SAGE<sup>[58]</sup>.

Las sesenta toneladas que se destinaron a SAGE representaban todo el suministro mundial de galio en aquella época. Se necesitarían otros dos años para producir treinta toneladas más, que se destinaron a GALLEX. Así pues, en la década de 1990 el escenario estaba preparado para que dos experimentos, usando detectores de galio, buscaran el primer atisbo de los neutrinos fundamentales que produce la principal fuente de energía del Sol, la cadena pp.

Pero, coincidiendo incluso con los primeros preparativos, estaba naciendo una nueva manera de detectar neutrinos solares, una que revolucionaría la disciplina y crearía una nueva rama de la ciencia: la astronomía de neutrinos.

#### NEUTRINOGRAFÍA DEL SOL

A principios de la década de 1980, el experimento de Davis con cloro en la mina de Homestake era todavía el único que buscaba neutrinos solares. A causa de la dificultad del experimento, y su dependencia de la técnica radioquímica, muchos físicos seguían insatisfechos. Era cierto que durante veinte años nadie había encontrado errores ni en el experimento ni en los cálculos —Bahcall era siempre muy firme al respecto—, pero los cálculos eran complicados, implicaban la creación de largos códigos informáticos, y aunque Bahcall siempre daba respuesta a las preguntas que le hacían, existía cierta preocupación por si podía haber algún error en los programas. Bahcall era visto por muchos como «el tipo que calculó mal el flujo de neutrinos del Sol»<sup>[59]</sup>.

Lo que se necesitaba era una manera de capturar los neutrinos de uno en uno sobre la marcha, en lugar de ir acumulando datos durante un mes para sacar conclusiones *a posteriori*, como era el caso del detector radioquímico de Davis. Los científicos que trabajaban en la mina de Kamioka, en Japón, se dieron cuenta de

que podían hacerlo, y otros científicos, que trabajaban en el experimento IMB<sup>[60]</sup> bajo el lago Erie, descubrieron por accidente que ellos también podían.

En ambos experimentos se habían estado buscando indicios de que los protones se desintegran, porque algunas teorías que intentaban unificar las fuerzas de la naturaleza implicaban que esto debía ocurrir de manera ocasional. La estabilidad de la materia demuestra que si ello ocurre en absoluto es extremadamente infrecuente. La vida media de un protón sería muchas muchas veces mayor que la edad del universo observable. Para tener alguna posibilidad de observar el fenómeno, habían construido enormes tanques de agua ultrapura rodeados de miles de tubos fotomultiplicadores o PMT (*photo-multiplier tube*) para capturar partículas producidas por la desintegración de los protones. Los fotomultiplicadores funcionan como bombillas, pero al revés. Cuando la corriente eléctrica pasa por una bombilla, esta da luz. Cuando la luz entra en un fotomultiplicador, su energía se convierte en una corriente eléctrica, que se puede enviar a un ordenador para registrar el suceso. ¿De dónde vendría la luz en esos tanques de agua situados a gran profundidad bajo tierra? Esperaban que la respuesta fueran las partículas moviéndose a través del agua a velocidades superlumínicas.

Esto necesita una explicación, pues ¿acaso no es imposible moverse más rápido que la luz? Eso es cierto en el vacío, pero la luz se ralentiza cuando pasa a través de materiales como el cristal o el agua. Por lo tanto, es posible que algunas partículas cargadas, como los electrones, puedan moverse a través del agua a una velocidad superior a la que tiene la luz en el agua (aunque, por supuesto, a una velocidad menor que la de la luz en el vacío, que es un límite fundamental de la naturaleza). Cuando esto ocurre, se rompe la «barrera de la luz» de un modo parecido al de los aviones cuando rompen la barrera del sonido, y se emite un cono de luz de color azul pálido en la dirección de movimiento de la partícula. Esto se conoce como «radiación de Cerenkov», así llamada por el

científico ruso Pável Cerenkov, cuyos experimentos condujeron a la comprensión del fenómeno<sup>[61]</sup>. Cuando el cono de luz llega a las paredes del tanque de agua, lo detectan los fotomultiplicadores con arreglo a una configuración parecida a un anillo cuyo tamaño y forma se reconstruyen mediante ordenador. A partir de ello es posible obtener la energía de la partícula original y su dirección de movimiento.

El interés por la desintegración del protón venía de un experimento erróneo, el cual había hecho pensar que en mil toneladas de material podía desintegrarse un protón cada día. Si eso hubiera sido cierto, habría sido posible detectarlo siempre y cuando se pudiera eliminar el fondo de rayos cósmicos. Esto provocó una fiebre por la construcción de dispositivos experimentales en minas profundas y túneles bajo las montañas.

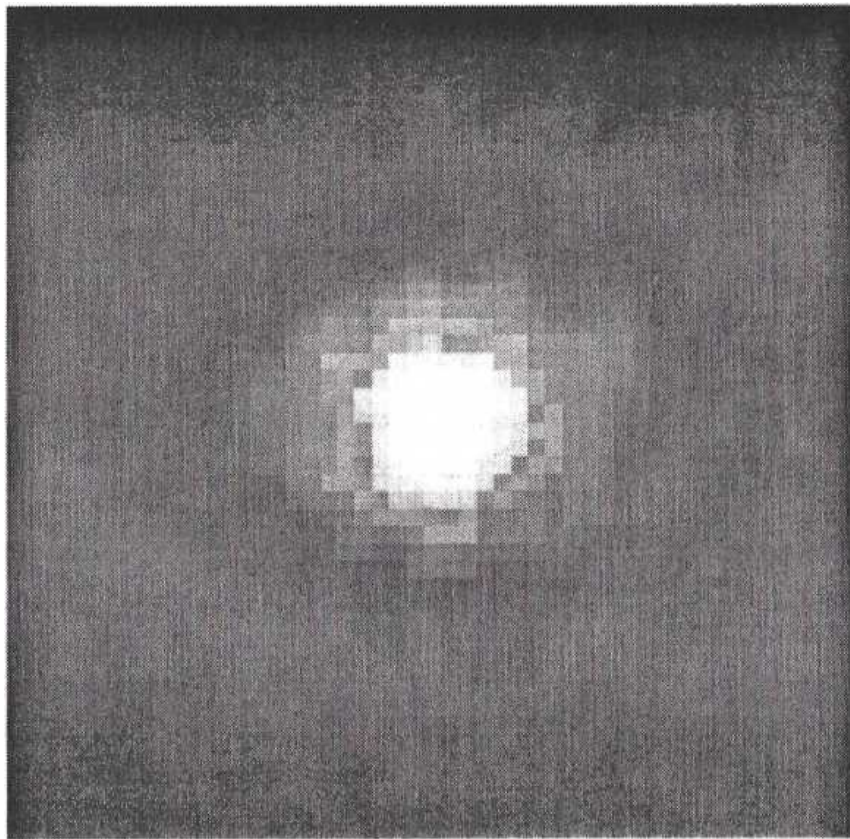


Figura 9. *Neutrinografía del Sol*. El Sol tal como se «ve» cuando se detectan sus neutrinos. Cortesía de Robert Svoboda, Universidad de California, en Davis.

Pero había un problema: los rayos cósmicos chocan con los átomos de la alta atmósfera, y emiten neutrinos que penetran en la tierra. Estos podían activar los detectores a un ritmo parecido al de las esperadas desintegraciones de protones. Abdus Salam, Premio Nobel y entusiasta físico teórico que creía firmemente en la desintegración de los protones, escribió un artículo en el que sugirió la posibilidad de eliminar los neutrinos atmosféricos realizando un experimento en la Luna. Cuando Don Perkins, un destacado investigador experimental de los neutrinos y no muy respetuoso con los teóricos, evaluó el artículo de Salam comentó que si él y otros físicos teóricos querían ir a la Luna, ¿por qué no iban a hacerlo? «Cuanto más, mejor»<sup>[62]</sup>.

Tuvo que transcurrir algún tiempo para esclarecer por fin que, si los protones se desintegran, el fenómeno es tan infrecuente que tiene que resultar invisible. Como esta desafortunada revelación hacía inútiles para su propósito original aquellos enormes detectores subterráneos, los equipos de experimentadores empezaron a estudiar los neutrinos que antes habían sido el ruido de fondo no deseado. Escoger ese rumbo no necesitó mucha inspiración: no se podía hacer mucho más con aquellos carísimos mastodontes.

La técnica de detección basada en el agua podía usarse para hallar neutrinos, pero requería algunas modificaciones. Los experimentos originales se habían diseñado para identificar desintegraciones de protones, pero cualesquiera partículas resultantes de la desintegración de un protón tendrían mucha más energía que un neutrino solar. Al no haber encontrado ninguna señal de desintegraciones de protones, y conscientes de la preocupación cada vez mayor con respecto al problema de los neutrinos solares, los miembros del equipo de Kamioka adaptaron los detectores para que fueran sensibles a dichos neutrinos de baja energía.

Por casualidad, los científicos estaban yendo a tropezar con los verdaderos descubrimientos.

Los neutrinos provenientes de la reacción del boro-8 en el Sol, los que estaba estudiando Davis, tienen energía suficiente como

para hacer retroceder una partícula cargada, como un electrón en el agua, en la misma dirección de movimiento del neutrino, cual bola de billar dando de lleno en otra.

Entonces el cono de la radiación de Cerenkov, que resulta del movimiento superlumínico del electrón a través del agua, es detectado por los fotomultiplicadores que rodean el tanque. La figura resultante tiene forma de anillo, y su tamaño varía con la velocidad del electrón, que a su vez depende de la energía que cede el neutrino original. Así, esos «detectores Cerenkov de agua» no solo tenían la posibilidad de detectar neutrinos, sino también la de medir su energía y la dirección de donde venían. Además, podían registrar en qué instante se producía el fenómeno.

La potencia de este detector estaba en el hecho de conocer toda la información sobre el neutrino: su energía, cuándo impactó, y de dónde venía. En particular podía confirmarse si venían del Sol, y no de alguna otra fuente como la radiactividad ambiental. De hecho, lo que habían construido era un telescopio de neutrinos, una nueva ventana al universo.

Como resultado, pudieron hacerle una «neutrínografía» al Sol. En esta imagen, el Sol parece mucho mayor de lo que vemos con nuestros ojos. Esto se debe a que en las observaciones de neutrinos la precisión en la dirección es peor que en la observación óptica. La astrofísica de neutrinos todavía está en su infancia. En el futuro, las imágenes del Sol y otros objetos astronómicos se volverán mucho más definidas.

El equipo de la mina de Kamioka completó las revisiones del detector Kamiokande<sup>[63]</sup> a finales de 1986. Entonces tuvieron un golpe de suerte. El 23 de febrero de 1987, sin aviso previo alguno, pudo verse aparecer en el cielo austral una supernova en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia satélite de la Vía Láctea. Una ráfaga de neutrinos de aquella explosión había estado viajando a través del espacio durante ciento setenta mil años, y aquel día cruzó la Tierra durante unos quince segundos. Esto se explicará en el capítulo 10, pero de momento basta decir que tanto Kamiokande

como los experimentos IMB detectaron un puñado de neutrinos de la supernova. Esta fue la primera vez, y hasta ahora la única, en que se detectaron neutrinos causados por un fenómeno de este tipo. Es irónico que se detectaran e identificaran neutrinos de una supernova, y nada menos que una exterior a nuestra galaxia, cuando todavía se estaba debatiendo sobre el misterio de los neutrinos solares. Tras este acontecimiento único, en IMB continuaron buscando indicios de desintegraciones de protones, mientras que en Kamiokande decidieron centrarse en el nuevo campo de la astronomía de neutrinos.

#### NEUTRINOS AUSENTES POR TODAS PARTES

De 1987 a 1995, Kamiokande detectó neutrinos solares. La luz de Cerenkov solo se medía con claridad si los electrones tenían energías por lo menos cinco veces superiores a las que podía registrar el detector de Davis. Esto significaba que solo estaban detectando los neutrinos solares de energía relativamente alta procedentes de la reacción del boro-8, pero con mucho más detalle del que había podido conseguir Davis. En particular, podían medir la cantidad de energía que tenía cada neutrino. Los resultados demostraban que la cantidad de neutrinos que llegaban del Sol disminuía al aumentar su energía, como debía ocurrir si provenían del boro-8, tal como había predicho Bahcall. Por fin algo del modelo solar encajaba con lo que se estaba observando. Sin embargo, la cantidad total se negaba obstinadamente a cuadrar, y seguía llegando más o menos a la mitad de lo que se había predicho.

Primero Davis, y luego Kamiokande: los escasos neutrinos que se producían al final del ciclo pp eran demasiado pocos. Ahora eso estaba claro. A pesar de todo, quedaba sin responder la cuestión de si eso era aplicable también a los neutrinos dominantes, los de menor energía producidos en la fase temprana del ciclo de fusión solar. Eso era lo que estaban a punto de investigar los experimentos SAGE y GALLEX, usando galio en sus detectores.

SAGE empezó primero, pues había tenido el monopolio mundial del galio, y GALLEX se puso en marcha en 1991. En el año 2000, SAGE había hecho cerca de cien mediciones del flujo de neutrinos solares a lo largo de un período de diez años. Los modelos solares predecían que deberían ver una gran cantidad de neutrinos, alrededor de 130 SNU. Cuando se reunieron todos los datos, tanto SAGE como GALLEX hallaron la misma respuesta: la cantidad era solo de unos 70 u 80 SNU. De modo que, una vez más, el déficit en los neutrinos solares era de un 50 %. Los resultados reivindicaban a Davis: parecía que, para cualquier energía, la cantidad de neutrinos detectada solo era la mitad de la que habían predicho los modelos del Sol.

Fuera cual fuera el motivo, no se debía a ningún fallo del equipo de Davis: dos experimentos independientes estaban lanzando el mismo mensaje. Tampoco parecía que el culpable fuera el Sol. Por aquel entonces, los astrónomos habían efectuado muchas mediciones de la superficie solar, las cuales demostraban cómo vibra el Sol, y a su vez daban información muy importante sobre el interior de este. Esos datos de «heliosismología», el equivalente solar del estudio de los terremotos, confirmaban cada vez más que las suposiciones de Bahcall sobre el funcionamiento interno del Sol eran correctas. Se acumulaban los indicios de que el neutrino era el principal sospechoso.

En 1996, tras un año de reconstrucción, Kamiokande estaba otra vez listo para funcionar. Con diez veces más agua y fotomultiplicadores que antes, se lo llamó SuperKamiokande, o SuperK para abreviar. Si todavía quedaba alguna duda de que los neutrinos eran la clave de los misterios, SuperK iba a despejarla. La astronomía de neutrinos podía detectar neutrinos no solo del Sol, o de una supernova, sino también de la atmósfera. Los rayos cósmicos que inciden en la alta atmósfera provocan chorros de neutrinos, y SuperK empezó a detectarlos. Aunque las mediciones de neutrinos solares habían resultado sorprendentes, esto no era

nada en comparación con lo que SuperK estaba a punto de descubrir cuando empezara a observar los neutrinos atmosféricos.



## «SOY TAN FELIZ QUE ME PONDRÍA A BAILAR»

### NEUTRINOS ATMOSFÉRICOS

Los neutrinos se producen en muchas circunstancias. La mayoría de los que pasan cerca de nosotros han nacido en el Sol o en la tierra bajo nuestros pies. Además, muchos de ellos vienen de los rayos cósmicos.

Muy por encima de nuestras cabezas, partículas más pequeñas que los átomos llueven del cielo. Son el resultado de antiguas explosiones de estrellas. Los campos eléctricos y magnéticos permean el espacio interestelar, y azotan dichas partículas moviéndolas con violencia. Algunas de esas partículas tienen energías mucho mayores que las que podemos reproducir mediante los experimentos que se realizan en la Tierra. En nuestro movimiento a través del cosmos, los rayos cósmicos están chocando continuamente con nosotros.

La violencia de esas colisiones rompe los átomos del aire, los desmenuza y crea chorros de partículas secundarias que se mueven casi a la velocidad de la luz y en la misma dirección que sus progenitores. El aire o la tierra absorben la inmensa mayoría de los rayos cósmicos, que no penetran nunca hasta las profundas cavidades subterráneas donde los aguardan los detectores de neutrinos. No obstante, dichos rayos contienen piones y muones, muchos de los cuales se desintegran antes de ser absorbidos.

Como resultado producen neutrinos, los cuales llegan a los detectores porque, de hecho, las rocas de en medio son tan transparentes para ellos como para los neutrinos solares.

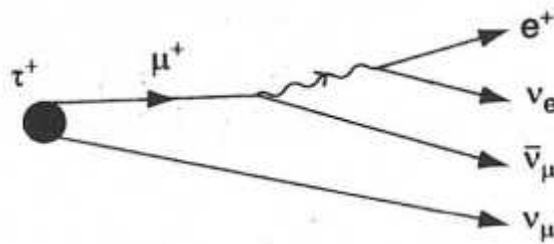


Figura 10. *Un neutrino electrónico y dos neutrinos muónicos.* Véase también la figura 6. Un pión con carga positiva ( $\pi^+$ ) se desintegra y da un muón con carga positiva ( $\mu^+$ ) y un neutrino. Este es un neutrino muónico, denotado por  $\nu_\mu$ . A su vez, el muón se desintegra en forma de un positrón, un antineutrino muónico denotado por  $\bar{\nu}_\mu$ , y un neutrino electrónico,  $\nu_e$ . Por lo tanto, los productos finales de la desintegración del pión contienen dos neutrinos del tipo muónico por cada uno del tipo electrónico.

He aquí dos importantes diferencias entre los neutrinos procedentes de rayos cósmicos que chocan con la atmósfera y los que nos llegan del Sol. En primer lugar, las energías de los neutrinos «atmosféricos» son entre decenas y varios centenares de veces mayores que las de sus parientes solares. En segundo lugar, mientras que el Sol produce neutrinos electrónicos,  $\nu_e$ , los restos de rayos cósmicos producen sobre todo la variedad muónica,  $\nu_\mu$ . Los experimentos realizados a lo largo de varios años en laboratorios como el CERN han demostrado cómo se comportan las partículas cósmicas, y a partir de ello ha quedado claro que el contenido en neutrinos de los restos cósmicos sería de un neutrino electrónico por cada dos de tipo muónico, siendo estos un  $\nu_\mu$  y un antineutrino, denotado  $\bar{\nu}_\mu$  [64].

Una característica fundamental de los detectores basados en el agua es que, además de registrar la energía de un neutrino y de dónde viene, también pueden indicar qué tipo de neutrino han capturado. Cuando un neutrino choca contra un átomo adquiere

carga eléctrica, y se convierte o bien en un muón o bien en un electrón, con carga negativa o positiva<sup>[65]</sup>. Como hemos visto en la página 128, esta partícula cargada pasa a través del agua, y emite la radiación de Cerenkov que detectan los fotomultiplicadores. Los muones son unas doscientas veces más pesados que los electrones y avanzan con facilidad, moviéndose en líneas rectas, mientras que los ligeros electrones suelen desviarse de su camino. Cuando esto ocurre, radian energía, que da lugar a más electrones y positrones. Así pues, un electrón individual genera un chorro de partículas cargadas, que se ensancha de modo difuso en torno a la dirección original de su neutrino progenitor. La radiación de Cerenkov resultante se comporta de manera distinta según el tipo de partícula. En el caso de los muones, la figura obtenida a partir de los fotomultiplicadores es un anillo bien definido, mientras que en el de los electrones, dispersados hacia aquí y hacia allá, el anillo es más difuso. La forma del anillo, y los tiempos de llegada precisos de la radiación de Cerenkov a los fotomultiplicadores, revelan la dirección y la energía del neutrino incidente, así como su tipo.

A mediados de la década de 1980 hubo indicios, tanto en IMB como en Kamiokande, de que la razón entre la cantidad de neutrinos muónicos y la de neutrinos electrónicos procedentes de las colisiones en la atmósfera era más próxima a uno que al valor esperado de dos. Lo llamaron «anomalía de los neutrinos atmosféricos». Empezaron a crecer las especulaciones de que la causa de dicha anomalía en el experimento de Davis podían ser los neutrinos, y no la astrofísica del Sol. Nadie podía estar seguro de si la anomalía de los neutrinos atmosféricos indicaba que había demasiados  $\nu_e$  o demasiado pocos  $\nu_\mu$ , o si era alguna peculiaridad del método de detección. Esto es lo que había motivado las mejoras en Kamioka que convirtieron el Kamiokande en el SuperK.

El SuperK era mayor que su predecesor, y los fotomultiplicadores de su superficie ocupaban casi media hectárea. Sus instrumentos electrónicos estaban especialmente ajustados para obtener la máxima información sobre los neutrinos. Era posible decir si habían

llegado del cielo, unos veinte kilómetros sobre el cielo de Japón, o del otro lado de la Tierra tras viajar 13 000 kilómetros a través del planeta y entrar por la parte inferior del tanque. Podían medir las direcciones de los neutrinos lo bastante bien como para decir en qué parte del globo terráqueo se habían originado.

El nuevo detector capturó muchos más neutrinos muónicos que antes. Había una cantidad mayor de datos, y estos demostraban que las cantidades de neutrinos muónicos y de neutrinos electrónicos acababan siendo comparables porque los neutrinos muónicos estaban desapareciendo. Esto era interesante, pero los datos revelaban un hecho incluso más destacable: el déficit era mayor en el caso de los neutrinos que llegaban a través de la Tierra que en el de los que venían de arriba. Cuantos más datos acumulaba el SuperK, más claro se hacía el mensaje. Todo encajaba con la idea de que los rayos cósmicos realmente producían los tipos muónico y electrónico en una razón de dos a uno, pero que cuanto más lejos viajaban los neutrinos muónicos, más probable era que desaparecieran.

Todos pensaron de inmediato en el problema de Davis con los neutrinos electrónicos del Sol. ¿Podía ser que los neutrinos desaparecieran en pleno vuelo? ¿Y no solo los neutrinos muónicos, como en el caso de la anomalía atmosférica, sino también los neutrinos electrónicos? A fin de cuentas, habían viajado 150 millones de kilómetros desde el Sol, y si era posible que los neutrinos atmosféricos hicieran un truco para desaparecer, los neutrinos solares tendrían tiempo de sobra para hacer algo parecido. Por primera vez, incluso los escépticos empezaron a aceptar que, al fin y al cabo, los resultados de Davis podrían ser correctos. El Sol se comporta como debe. Son los neutrinos los que hacen cosas extrañas. La nueva pregunta era la siguiente: si los neutrinos desaparecen, ¿qué ocurre con ellos?

## NEUTRINOS OSCILANTES

Medio siglo después de que Pauli propusiera por primera vez su «solución desesperada», los experimentos habían demostrado no solo que el neutrino existe, sino también que se presenta en tres tipos distintos. Esta intensa y continua búsqueda de neutrinos había ido en paralelo con el problema de los neutrinos solares, el cual, lejos de resignarse a morir, seguía vivo todavía. Como hemos visto, el experimento de Davis se volvió más preciso, y los datos indicaban una vez más que había un déficit de neutrinos solares, por lo menos tal como los detectaba su dispositivo experimental.

Si tenemos en cuenta el tiempo y los recursos invertidos, y la cantidad de científicos que sudaron tinta acerca de esta cuestión en la década de 1990, es irónico que dos décadas antes, un año tras el primer y tentativo anuncio de Davis, se hubiera hallado la respuesta, y que no se tomase en consideración. Pisando los talones a la demostración experimental (efectuada en 1962) de que el neutrino electrónico y el neutrino muónico son distintos, Bruno Pontecorvo y su colega Vladímir Gribov, en Rusia, y Maki, Nakagawa y Sakata en Japón<sup>[66]</sup> habían descubierto que la existencia de más de un tipo de neutrino ofrecía una posible solución al problema de los neutrinos solares.

El Sol produce neutrinos del tipo electrónico,  $\nu_e$ . El detector basado en cloro solo registra la llegada de neutrinos de ese tipo. Si no ha ocurrido nada por el camino que haya transformado el  $\nu_e$  en alguna otra cosa, el recuento del detector de Davis, aquí en la Tierra, indica qué cantidad de  $\nu_e$  se creó en el Sol hace menos de diez minutos. Sin embargo, en 1962 se había determinado la existencia de otro tipo de neutrino, el que tiene afinidad con el muón,  $\nu_\mu$ . Esto condujo a una pregunta intrigante.

Schwartz, Steinberger y Lederman habían demostrado que los neutrinos recordaban su origen en recorridos de decenas de metros, pero ¿y si esta memoria fallaba a escalas mayores? Unos pocos nanosegundos cruzando el laboratorio son una nimiedad. Los neutrinos que vienen del Sol llevan viajando casi diez minutos, un tiempo más de mil millones de veces mayor. ¿Podría un  $\nu_e$  nacido

en el Sol cambiar su naturaleza de algún modo, y transformarse en un  $\nu_\mu$  durante su travesía por el espacio?

Si el neutrino electrónico cambiara de identidad de esa manera, pasaría de largo del detector de Davis como si nada. A efectos prácticos, habría desaparecido sin dejar rastro<sup>[67]</sup>. Solo los neutrinos electrónicos que hubieran sobrevivido intactos al viaje caerían en la trampa de Davis y serían contados. Esto podría explicar la discrepancia entre las 2 a 3 SNU que registró Davis y las 6 que había calculado Bahcall.

La idea de que los neutrinos padecieran algún tipo de trastorno de personalidad, y que una vez emitidos por el Sol pudieran cambiar de identidad durante el viaje, iba en contra de todo lo que decían los libros de texto. Según la teoría estándar de la física de partículas, era imposible. O, por lo menos, era imposible si, como creía todo el mundo, los neutrinos no tenían masa y viajaban por el espacio a la velocidad de la luz. Mucho antes de que Davis descubriera el déficit de los neutrinos solares, Pontecorvo había visto que las leyes de la mecánica cuántica permitían que los neutrinos oscilaran entre un estado y otro. Pero ello solo era posible si tenían algo de masa. Esta no tenía por qué ser grande. De hecho, podría ser (y probablemente sea) casi insignificante, incluso miles de veces más pequeña que la masa de un electrón. Tras el anuncio de Davis de 1968, al año siguiente, Gribov y Pontecorvo publicaron su teoría, basada en la hipótesis de que hay dos tipos de neutrino, con masas distintas<sup>[68]</sup>.

En la mecánica cuántica, la certidumbre es sustituida por la probabilidad, que sube y baja como una onda. La longitud de onda depende de la velocidad y la masa de la partícula. Así, las ondas de dos partículas con la misma energía, pero con masas ligeramente distintas, tendrán longitudes de onda algo diferentes. La rareza del mundo cuántico es todavía más profunda porque permite que el neutrino electrónico, producido por el Sol, sea un híbrido de neutrinos con dos masas distintas. En el viaje a través del espacio, las ondas cuánticas asociadas a esos dos estados se balancean a ritmos diferentes.

A todos los efectos hay dos ondas, de distintas longitudes de onda, que viajan juntas e interfieren la una con la otra mientras avanzan. Así como dos ondas sonoras de frecuencias ligeramente distintas se mezclan y dan lugar a una pulsación de intensidad junto a la nota media, del mismo modo las ondas cuánticas asociadas a dos neutrinos de masas ligeramente distintas pueden dar lugar a un altibajo en la intensidad. El resultado es que, a lo largo del viaje, las dos ondas solo encajan de manera ocasional en la forma precisa con la que empezaron. Solo en esos puntos su combinación representa un neutrino electrónico. En el resto, a causa de la oscilación, hallamos presente una mezcla de neutrino electrónico y neutrino muónico. Cuando algo como, por ejemplo, un átomo de cloro en un tanque situado 1400 metros bajo las colinas de Dakota se interpone e interrumpe el flujo, la onda cuántica se convierte milagrosamente en un  $\nu_e$  o un  $\nu_\mu$ . Es imposible saber cuál será. Todo lo que implica la teoría cuántica es una probabilidad de hallar lo uno o lo otro. A efectos prácticos, si se repite la medición una cantidad suficiente de veces, se obtendría (en promedio) un 50 % de neutrinos electrónicos y un 50 % de neutrinos muónicos, aproximadamente.

Este fenómeno recuerda al dibujo de Escher, *Metamorfosis*, en el que, a lo largo de la imagen, se ve un animal transformándose en otro de manera gradual. Pongamos un ejemplo. Imagínese algún extraño híbrido capaz de metamorfosearse entre perro y gato. El perro sale de casa y camina por la calle, y se transforma en gato sobre la marcha. Cuando va por la mitad de la fachada la transformación se ha completado. El antiguo perro (que ahora es un gato) continúa caminando y metamorfoseándose. Al llegar al final de la fachada vuelve a ser un perro una vez más. Si usted se cruza con el perro-gato, lo que vea dependerá de la distancia a la que se encuentre del extremo de la fachada.

Ahora suponga que usted no se fija en perros-gatos, sino solo en cosas que son o bien lo uno o bien lo otro: o bien un perro o bien un gato. Si usted está cerca del principio o del final de la fachada,

probablemente lo interpretará como un perro. Si está cerca del punto medio, seguramente lo verá como un gato. Si solo tiene ojos para los perros, y no para los gatos, podría sacar la conclusión de que las características perrunas han desaparecido por el camino.

Esto es lo que ocurre con los neutrinos. En esta analogía, el neutrino electrónico es el perro, y el neutrino muónico el gato. El Sol había emitido un perro, y el detector de Davis era una trampa para perros. Según esta teoría, al Sol no le pasaba nada raro. Los neutrinos eran los culpables. La medición tentativa que hizo Davis de un aparente déficit de neutrinos solares se podía comprender. Todo lo que tenía que hacerse era abandonar el modelo estándar de la física de partículas, que incluía la suposición de que los neutrinos no tienen masa y viajan a la velocidad de la luz. No era nada sorprendente que pocos estuvieran dispuestos a hacer tal cosa, y que en general la idea se viera como poco más que una curiosidad matemática.

Sin embargo, no todo el mundo había pasado por alto la idea de las oscilaciones de neutrinos. Para que estas se produjeran, no podían carecer de masa todos los neutrinos. El que la tuvieran no violaba ningún principio sagrado, y Murray Gell-Mann, uno de los físicos teóricos más influyentes del siglo XX, incluso expresó la opinión de que lo que la Naturaleza no prohíba, ocurrirá. Con la llegada de la anomalía de los neutrinos atmosféricos, y los datos cada vez mejores de Davis sobre los neutrinos solares, la gente empezó a preguntarse si los neutrinos podrían tener masa en realidad, aunque esta fuera casi insignificante comparada con la de todas las demás partículas materiales.

En la teoría original de Pontecorvo, los neutrinos electrónicos creados en el centro del Sol podían convertirse en neutrinos muónicos, o incluso neutrinos de tipo tau, que eran invisibles en el experimento de Davis. No obstante, si los modelos solares eran correctos, y el experimento de Davis también lo era, entonces un porcentaje grande de neutrinos electrónicos tendrían que haber oscilado hacia alguna de las otras formas. Para hacerlo, los



neutrinos tendrían que ser tan ambivalentes que llamarlos neutrinos electrónicos y neutrinos muónicos sería retorcido. Esa fue una de las razones por las que la idea de Pontecorvo fue tan desdeñada.

Las opiniones empezaron a cambiar cuando tres físicos teóricos descubrieron una nueva consecuencia de la idea de la oscilación. Se lo llamó efecto MSW, por sus iniciales. Un estadounidense, Lincoln Wolfenstein, en 1978, y dos rusos, Stanislav Mikheyev y Alexei Smirnov, en 1985, habían descubierto que, al pasar los neutrinos a través de las capas del Sol, la presencia de materia podía amplificar la probabilidad de que los neutrinos oscilaran, lo que supondría que sus masas se hallaran en cierto intervalo. Como resultado de esta probabilidad más alta, la confusión inicial de los neutrinos con respecto a sus identidades no era necesariamente muy grande. Durante su viaje hacia la superficie del Sol, incluso una pequeña confusión podía convertirse en una grave crisis de identidad a causa de la presencia de materia.

Movidos en gran parte por la elegancia de la teoría, hacia 1990 los físicos empezaron a tomarse en serio la idea de las oscilaciones de los neutrinos. El descubrimiento de la anomalía de los neutrinos atmosféricos había empezado a despuntar allá por 1985, pero esta no quedó bien establecida hasta 1993, cuando los primeros resultados del SuperK demostraron que cuanto más lejos viajaban los neutrinos mayor probabilidad tenían de desaparecer.

En 1998, el equipo de SuperK pudo anunciar que el déficit no solo variaba según la distancia sino también según la energía de los neutrinos atmosféricos. Si era cierto que sus identidades oscilaban, entonces, con arreglo a la teoría de la relatividad, las oscilaciones deberían ser más rápidas para los neutrinos de menor energía, y esto fue exactamente lo que los datos indicaron. Todo encajaba con la hipótesis de que los neutrinos oscilaban.

Aunque hubiera costado treinta años, Pontecorvo había sido reivindicado. ¿Resolvería también esto el problema de los neutrinos solares? ¿Podían Davis y Bahcall estar ambos en lo cierto después de todo?

El Observatorio de Neutrinos Sudbury (SNO, Sudbury Neutrino Observatory), ubicado en Ontario, en Canadá, fue diseñado para resolver el problema de los neutrinos solares de una vez por todas. Observaba una franja particular de neutrinos de alta energía, como había hecho Davis. Solo eran aproximadamente un 0,01 % del total, pero su mayor energía les daba una mayor probabilidad de interactuar. Sin embargo, el SNO abriría una nueva posibilidad: medir neutrinos no solo del tipo electrónico, sino también de todos los tipos. En un primer momento esto implicaría establecer una comparación entre los resultados del SNO y los del SuperK. Si en el momento de llegar a la Tierra los neutrinos del Sol se habían convertido realmente en los de tipo muónico o tau, el SNO podría demostrarlo.

Para que el experimento funcionara de la manera adecuada, el detector SNO tenía que ser tan grande como un edificio de diez plantas. Su peculiaridad estribaba en sus mil toneladas de agua pesada, que en lugar de hidrógeno contiene deuterio, que tiene un protón y un neutrón en el núcleo. Dicha agua fue prestada por Atomic Energy of Canada, Ltd., y llenaba un contenedor de plástico acrílico de 12 metros de diámetro. A su vez, este estaba rodeado por una esfera geodésica con un diámetro de 18 metros y diez mil sensores de luz repartidos por su superficie. El aparato entero estaba situado en el interior de una cavidad, llena de agua ordinaria ultrapura, de 34 metros de altura y 22 metros de ancho, y colocado a dos kilómetros bajo el suelo en una antigua mina de níquel en Sudbury, en Ontario. Incluso una simple cucharadita de polvo dentro del aparato lo habría inutilizado.

Cuando empezaron las mediciones en 1999, el SNO llevaba un coste acumulado de 73 millones de dólares canadienses y diez años de construcción. ¡El coste incluía la cuota de un dólar pagada a la compañía de energía atómica canadiense por el préstamo del agua pesada, valorada en trescientos millones de dólares! La astronomía

de neutrinos se estaba convirtiendo en ciencia a gran escala. El detector del SNO podía captar neutrinos electrónicos de modo parecido a como lo hacía el de SuperK. Las colisiones de neutrinos electrónicos producen electrones que emiten radiación de Cerenkov, luz azul, al moverse a través del agua. Igual que en el SuperK, la intensidad de la luz depende de la energía del electrón, a partir de la cual se puede determinar el intervalo de energías de los neutrinos entrantes. El SNO interceptaba unos diez neutrinos cada día.

Los primeros resultados se anunciaron el 18 de julio de 2001. Se presentaron como «la solución a un misterio de treinta años de antigüedad: el enigma de los neutrinos solares desaparecidos».

El flujo de neutrinos de tipo electrónico resultó ser de 1,75 millones por centímetro cuadrado cada segundo. Entonces Art McDonald, el líder del equipo del SNO, anunció que habían hecho algo nuevo. El detector SuperK de Japón también había medido neutrinos electrónicos en condiciones similares, pero además tenía cierta sensibilidad a los neutrinos de tipo muónico o de tipo tau. Al combinar los resultados del SNO y del SuperK fue posible estimar no solo cuántos neutrinos electrónicos habían llegado a la Tierra, sino también cuántos había de cada tipo de neutrino. SuperK había medido un flujo total de 2,32 millones de neutrinos por centímetro cuadrado cada segundo. La diferencia se debe a que el muestreo de SuperK también incluía algunos neutrinos de tipo muónico o de tipo tau.

Esto ya bastaba para demostrar que algunos de los neutrinos electrónicos tenían que estar cambiando a otros tipos durante su viaje desde el Sol. El nuevo reto era determinar cuántos neutrinos muónicos o de tipo tau estaba interceptando SuperK en total. Una vez hechos todos los cálculos, el resultado combinado de SNO y SuperK demostró que el flujo total de neutrinos, de todos los tipos, era de 5,44 millones por centímetro cuadrado cada segundo, con un margen de error de aproximadamente un 20 % hacia arriba o hacia abajo. Esta cantidad encajaba con la que había predicho Bahcall.

Así, en el año 2001, otros cuatro experimentos habían confirmado ya el déficit de neutrinos solares que Davis había sido el primero en observar. SAGE y GALLEX veían la reducción en el caso de los neutrinos de baja energía, y la combinación del SuperK con los primeros resultados del SNO demostró que el déficit se debía a que los neutrinos de tipo electrónico solo eran aproximadamente un tercio del total. La consecuencia era que los neutrinos electrónicos cambian a los otros tipos de neutrino, los cuales, a su vez, pueden cambiar de un tipo a otro. A lo largo de los 150 millones de kilómetros que separan el Sol de la Tierra, la distribución de neutrinos se queda en una mezcla más o menos homogénea de los tres tipos. Los neutrinos no registrados no habían desaparecido en absoluto: habían cambiado, por el camino, a formas que eran simplemente mucho más difíciles de detectar.

Este era un resultado fundamental, pero quedaba un punto débil: la conclusión se basaba en la combinación de datos de dos experimentos bastante diferentes. Lo ideal sería que un único experimento pudiera proporcionar toda la información. Esto es lo que el equipo del SNO se propuso hacer a continuación. Durante 2002 y 2003 reunieron más datos, que fortalecieron sus resultados y los hicieron más precisos. Con una astuta modificación, utilizaron el agua pesada de tal modo que permitía detectar todos los tipos de neutrinos presentes en el SNO, por lo que no sería necesario hacer comparaciones con datos de otros experimentos. Como dijo irónicamente un miembro del SNO: «Este no hará aguas».

Esta era la propuesta original de Herb Chen. En el agua pesada, en lugar de átomos de hidrógeno hay átomos de hidrógeno pesado, o deuterio, cuyo núcleo consiste en un protón y un neutrón. Los neutrinos tenían energía suficiente para partir el núcleo de deuterio en dos, liberando su neutrón y su protón individuales. Lo que saliera dependería de qué tipo de neutrino había chocado con el núcleo. Un neutrino electrónico podía adquirir carga, transformarse en un electrón y convertir el neutrón en un protón: el resultado de la colisión serían un electrón y dos protones. Los neutrinos muónicos o

de tipo tau no podían hacer esto. Sin embargo, sí podían rebotar en el protón o el neutrón, algo que el neutrino electrónico también podía hacer. El choque expulsaría al neutrón o al protón del deuterio, pero por lo demás no habría alteraciones. Si comparaba la cantidad de casos de esta última categoría con el recuento de casos en los que salían dos protones, el SNO podía medir el flujo de todos los tipos de neutrino, y además determinar cuál era la proporción de neutrinos electrónicos. Por desgracia, Herb Chen murió de leucemia en 1987, de modo que no vivió para ver el resultado de su inspirada idea.

Una mejora fundamental tuvo lugar en el verano de 2002, cuando añadieron dos toneladas de sal de mesa de alta pureza, cloruro sódico, a las mil toneladas de agua pesada en el corazón del detector. El cloro de la sal aumentaba la probabilidad de interceptar neutrinos y la capacidad de distinguir entre los diferentes tipos.

En un informe provisional, en 2002, anunciaron que los resultados obtenidos exclusivamente en el SNO ya eran lo bastante buenos como para poder afirmar, con una seguridad del 99,999 %, que los neutrinos del Sol cambian de un tipo a otro antes de llegar a la Tierra. Por último, el 7 de septiembre de 2003 anunciaron los resultados definitivos. El número de neutrinos de tipo electrónico era el mismo que habían encontrado antes: 1,75 millones por centímetro cuadrado cada segundo. Por lo que respecta a la cantidad total, esta resultó ser de 5,21 millones. Esto encajaba con el resultado anterior, que había combinado las mediciones del SNO y del SuperK. También era más preciso: la cantidad de neutrinos electrónicos está cerca de un tercio del total.

Por fin las conclusiones estaban claras. En primer lugar, quedaba claro que, durante treinta años, Davis había estado midiendo correctamente la cantidad de neutrinos solares que todavía son neutrinos electrónicos cuando alcanzan la Tierra. En segundo lugar, algo muy emocionante para los astrofísicos, estaba la confirmación de que el cálculo de Bahcall de la producción de

neutrinos solares era correcto. Bahcall comentó que los valores eran tan próximos que estaban «embarazosamente cerca».

Durante tres décadas, la gente había dudado de él. De repente se había demostrado que Bahcall, quien, como mencionamos antes, dijo que lo consideraban «el tipo que calculó mal el flujo de neutrinos del Sol», había estado en lo cierto desde el principio. Más tarde lo comparó con ser una persona a la que se ha acusado por error de algún crimen atroz, hasta que una prueba de ADN demuestra que no es culpable: «Así era exactamente como me sentía». Al saber la noticia, respondió con espontaneidad: «Soy tan feliz que me pondría a bailar».

Los cálculos exitosos de Bahcall demostraban que las cantidades de neutrinos dependen de las temperaturas en el corazón del Sol, multiplicadas por sí mismas 25 veces. El resultado de todo esto era que la medición del flujo de neutrinos es un termómetro muy sensible para el horno de fusión nuclear del Sol. Es realmente extraordinario que detectar un destello de luz en el fondo de una mina muy profunda permita medir la temperatura que hace en el corazón del Sol.

Bahcall y Davis habían sido reivindicados. Ese fue el momento en el que una nueva ciencia, la «astronomía de neutrinos», empezó a convertirse en una posibilidad real. La astronomía de neutrinos había empezado con la búsqueda de neutrinos solares y se había convertido en una ciencia cuantitativa con los experimentos de SuperK y SNO. Antes de que se resolviera el misterio de los neutrinos solares, los neutrinos procedentes de más allá de nuestra galaxia habían tenido también sus diez segundos de fama por una cuestión de pura suerte. Así se demostraría el potencial para nuevos descubrimientos que la astronomía de neutrinos podría ofrecer.

## NEUTRINOS EXTRAGALÁCTICOS

### SUPERNOVA

¿Dónde estaba usted a las 7:30 (horario de Greenwich) del 23 de febrero de 1987? Yo estaba desayunando cuando, sin que lo supiera, una ráfaga de neutrinos pasó a través de mis copos de maíz. Siempre estamos inmersos en el flujo de neutrinos solares, pero la súbita ráfaga de aquella mañana de febrero era algo distinto. Era un fogonazo de una estrella moribunda, situada a 170 000 años luz de distancia en la Gran Nube de Magallanes, o LMC (*Large Magellanic Cloud*), una galaxia satélite de la nuestra, visible en los cielos australes. Durante más de veinticinco años, los astrofísicos habían creído que el colapso gravitatorio de una supernova es una fuente abundante de neutrinos. De hecho, argumentaban que el brillante destello de luz, la habitual manifestación de una supernova que puede superar brevemente el brillo de una galaxia entera, es solo una pequeña parte del drama. Por poderosa que sea esta intensa radiación electromagnética, la luz visible, las ondas de radio, los rayos X y los rayos gamma juntos no llegan al 1 % del total. La mayor parte de la energía radiada por una supernova se la llevan los neutrinos.

Estos eran invisibles en el pasado, pero no ahora que tenemos telescopios de neutrinos. La novedad interesante era que en este caso, por primera vez, detectamos neutrinos procedentes de fuera

de nuestra galaxia, lo que demuestra que la teoría sobre las supernovas es correcta: cuando las estrellas se colapsan expulsan su energía en forma de neutrinos, hasta  $10^{59}$ , cien mil trillones de trillones de trillones de ellos en total.

El hecho mismo de que los neutrinos de esta supernova fueran detectados fue una afortunada coincidencia, y no podría haberse planeado. La última supernova visible a simple vista data de 1604, y se llevaba más de tres siglos sin ver ninguna hasta que esta se hizo famosa en 1987.

En realidad, los violentos hechos tuvieron lugar en la Gran Nube de Magallanes hace 170 000 años. Un destello de luz y una onda expansiva de neutrinos surgieron de los escombros. Avanzando dieciocho millones de kilómetros Cada minuto, se alejaron rápidamente del lugar, abandonaron la Gran Nube de Magallanes y se adentraron en el espacio intergaláctico. Su cita de 1987 todavía estaba muy lejos en el futuro.

A gran distancia por delante estaba la Vía Láctea, en un brazo de la cual, en el pequeño planeta Tierra, la vida humana había avanzado hasta la Edad de Piedra. La cáscara de radiación se expandió durante más de 165 000 años. Por aquel entonces en la Tierra, aún a 3000 años luz de distancia, los pueblos mediterráneos empezaban a tener conciencia de los cielos y estaban inventando la ciencia. Hacia 1930 sus descendientes estaban empezando a sospechar que los procesos radiactivos generan neutrinos, aunque se dudaba que pudieran detectarse alguna vez.

Mientras tanto, la onda expansiva de la estrella colapsada se acercaba a la Tierra a través de los cielos australes. Estaba a treinta y un años luz de la Tierra cuando Clyde Cowan y Fred Reines demostraron astutamente que los neutrinos existían. La onda expansiva estaba aún a veintitrés años luz cuando Ray Davis puso en marcha su detector de neutrinos solares en la mina de Homestake. Aunque era capaz de detectar neutrinos que llegaban del Sol, habría sido casi ciego a los de una supernova. No obstante, cuando los neutrinos que se aproximaban estaban a solo un año luz



de distancia, solo una parte por los 170 000 de su recorrido, científicos estadounidenses y japoneses acababan de finalizar la construcción de enormes tanques subterráneos de agua pura, diseñados para buscar indicios de que los protones se desintegran.

El detector japonés, Kamiokande, el antecesor del SuperK, contenía tres mil toneladas de agua pura. Algo parecido se hallaba a seiscientos metros bajo el lecho del lago Erie en Ohio, donde un equipo del campus de Irvine de la Universidad de California, la Universidad de Michigan y el Laboratorio Nacional de Brookhaven, llamado IMB (por Irvine, Michigan y Brookhaven), también buscaba desintegraciones de protones con un tanque de siete mil toneladas de agua.

Aunque ninguno de estos experimentos detectó desintegraciones de protones, ambos resultaron ser sensibles a neutrinos con más energía que los del Sol. Lo que nadie sabía era que un caparazón de dichas partículas se estaba aproximando a la velocidad de la luz<sup>[69]</sup>. Los  $10^{59}$  neutrinos que habían salido hacía 170 000 años se habían distribuido por la superficie de una esfera de 170 000 años luz de radio, lo bastante grande para contener la galaxia entera. El grosor del caparazón era aproximadamente diez veces la distancia que hay de la Tierra a la Luna, pues los neutrinos habían necesitado unos cuantos segundos para ir saliendo de la estrella colapsada, cuya densidad era como la de un enorme núcleo atómico. Si se calcula la densidad de  $10^{59}$  neutrinos repartidos por la superficie de un caparazón de 340 000 años luz de diámetro, resulta que el flujo correspondiente es similar al que recibimos continuamente del Sol. Si se tiene en cuenta la intensidad del flujo de neutrinos solares, y que estos han nacido a solo ocho minutos luz y no a 170 000 años luz, uno empieza a hacerse una idea de lo verdaderamente extraordinaria que debe de ser la explosión de una supernova. Resulta todavía más impresionante que cada neutrino de la supernova pueda tener entre diez y cien veces más energía que un neutrino solar común.

Por fin, el 23 de febrero de 1987, alcanzaron la Tierra, la atravesaron, y siguieron su camino hacia los cielos boreales. En cuestión de segundos, mil billones de neutrinos pasaron a través del IMB, una cantidad similar a través del Kamiokande y, podemos estar seguros, a través de la mina de Homestake y también de otros laboratorios. Sin embargo, solo el IMB y el Kamiokande eran sensibles a ellos. De entre todas esas hordas, solo ocho llevaban suficiente energía para que el IMB los detectara, y en el Kamiokande se captaron once<sup>[70]</sup>. Dichos detectores de Japón y Estados Unidos estaban en el hemisferio norte, mientras que la Gran Nube de Magallanes solo es visible en los cielos australes. Los neutrinos de la supernova habían pasado a través de la Tierra y habían entrado en los detectores desde abajo.

Una de las grandes ventajas del IMB y el Kamiokande era que se podían medir tanto la dirección como la energía de los neutrinos. Aunque la mayoría de los que llegan del Sol tienen menos de 1 MeV de energía cada uno<sup>[71]</sup>, y mientras que los de energía más alta a los que era sensible el experimento con cloro de Davis en Homestake tenían a lo sumo 14 MeV, los que se detectaron de la supernova estaban en el intervalo de 10 a 50 MeV. Los once del Kamiokande estaban en el intervalo de 10 a 20 MeV, mientras que el IMB, que no era sensible a esas energías relativamente «bajas», registró once de entre 20 y 50 MeV cada uno.

La cantidad de información que los científicos pudieron deducir de esos escasos eventos es extraordinaria. En primer lugar, la energía. Las cantidades realmente detectadas no eran sino una diminuta fracción de los billones que habrían pasado a través del detector. A su vez, esos detectores ocupaban una minúscula parcela en la superficie de la vasta esfera de la onda expansiva en aquel momento. Si se tiene en cuenta todo esto, puede hacerse una estimación de la energía total que los neutrinos se llevaron de la supernova. Resultó ser aproximadamente una décima parte de la energía total que contiene el Sol, es decir, una décima parte de su y con un destacable ajuste a las predicciones de las teorías sobre

explosiones de supernovas. Según dichas teorías, la energía también se radia como luz y en elementos químicos de nueva formación. Además, todavía hay mucha energía atrapada en la  $mc^2$  de la compacta estrella de neutrones que queda tras la explosión. En total, uno empieza a hacerse una idea de lo poderosa que tiene que ser la explosión de una estrella.

El descubrimiento de que las energías de los neutrinos de la supernova eran mucho mayores que las de los neutrinos solares demostró de inmediato que la temperatura en el interior de la estrella antes de su colapso era proporcionalmente mayor. Resultó una estimación de unos cuarenta mil millones de grados, lo cual encajaba también con las predicciones teóricas. Así pues, la energía, la duración de la ráfaga de neutrinos y la cantidad de estos concordaban con la hipótesis de que la supernova era el resultado del colapso de una estrella bajo su propio peso.

El hecho de que la ráfaga durara unos diez segundos era muy significativo. Si el origen de los neutrinos hubiera sido el fallecimiento de un tenue objeto estelar, todo habría terminado en una milésima de segundo. Sin embargo, el que los neutrinos tardaran varios segundos en escapar de la superficie de un objeto era de esperar en el caso de que este fuera tan denso como un núcleo atómico. Todo ello sugería la formación de una estrella de neutrones. Los astrofísicos teóricos sospechaban que las explosiones de supernova se producían así, pero era la primera vez que se encontraban pruebas directas de ello.

Al detectar ese fogonazo momentáneo de neutrinos, los humanos habían echado su primera ojeada al funcionamiento de una supernova. Al hacerlo, confirmaron todo lo que hasta entonces solo había sido teoría: una supernova se produce cuando una estrella se colapsa, y forma una estrella de neutrones. Durante el proceso se forma una mezcla de elementos de la tabla periódica, incluidos los necesarios para sembrar futuras formas de vida. Esto es lo más cerca que hemos llegado hasta ahora de confirmar la creencia según la cual estamos hechos de polvo de estrellas o, si es

usted menos romántico, de los productos de un reactor nuclear extinto.

Como estas observaciones confirmaron las predicciones teóricas de que la mayor parte de la energía que se produce en las supernovas es emitida en forma de una inmensa ráfaga de neutrinos, los laboratorios de neutrinos del mundo están esperando la próxima con impaciencia. El objetivo será medir no solo cantidades y energías, sino también los tipos de sabores que lleguen a la Tierra. Cuando la estrella se colapsa, la densidad en su núcleo alcanza los  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>: cien billones de gramos en cada centímetro cúbico. Es tan alta que los protones y los electrones se combinan y forman un neutrón, y se libera un neutrino electrónico.

Esta es la primera de las dos maneras independientes en que se crean los neutrinos en una supernova. El núcleo de neutrones resultante tiene una temperatura de más de cien mil millones de grados, y esta energía térmica se disipa mediante el segundo mecanismo: la formación de pares neutrino-antineutrino de todos los sabores. Según las predicciones, esta segunda manera es la fuente más intensa de neutrinos de una supernova. Una medición precisa de la fracción correspondiente a cada sabor podría servir para determinar la importancia relativa de la primera fase (que produce neutrinos electrónicos) y de la segunda, que produce neutrinos de todos los tipos.

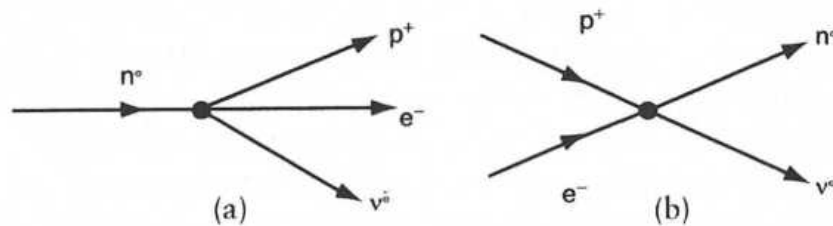


Figura 11. *Las estrellas de neutrones y los neutrinos se crean conjuntamente.* La historia empezó con el modelo de Fermi de la desintegración del neutrón (la figura 2 repetida aquí como fig. a). Cuando se crea una estrella de neutrones, se da una variante de este mismo proceso básico. En una estrella densa, los electrones y los protones son comprimidos tan fuertemente que se unen. Un electrón y un protón dan lugar a un neutrón y un neutrino (fig. b). Los neutrones forman la estrella de

neutrones, y los neutrinos son radiados hacia el espacio. Los superíndices indican las cargas eléctricas.

## NEUTRINOS OSCILANTES

La «astronomía de neutrinos» había empezado con la primera detección por Davis de los neutrinos solares, aunque se habían necesitado más treinta años para que todo el mundo se convenciera. La llegada del SuperK, con sus neutrinografías del Sol, y su detección de neutrinos de la atmósfera y de una supernova, estableció la astronomía de neutrinos como una nueva rama de la ciencia. Esto abría la emocionante posibilidad de que la captura de neutrinos de objetos astronómicos más distantes permitiera explorar tarde o temprano el universo a gran escala de una manera nueva y única.

Desde un punto de vista pragmático, si los neutrinos iban a utilizarse para investigar las interioridades de objetos celestes exóticos, como supernovas y explosiones de rayos gamma, sería imperativo entender los neutrinos mismos, porque si algo había quedado meridianamente claro era que los neutrinos cambian de naturaleza en su camino desde el Sol. Es cierto que los neutrinos electrónicos desaparecen, pero ¿acaban convirtiéndose en los del tipo muónico, los del tipo tau, o en una mezcla de ambos? He aquí la nueva pregunta. Una consecuencia de lo más radical era que si los neutrinos oscilan realmente, tal como Gribov y Pontecorvo habían sugerido hacía tiempo, esto significaría que no podrían carecer todos de masa. Los neutrinos con masa se saldrían del modelo estándar de las partículas, que necesitaría una revisión.

Con el problema de los neutrinos solares por fin resuelto, empezaron a surgir nuevas y profundas preguntas. ¿Cuán rápidas son las oscilaciones? Cuando un tipo de neutrino desaparece, ¿cuál se crea? Para que la astronomía de neutrinos se convierta en una ciencia cuantitativa, antes tendrán que entenderse las oscilaciones de neutrinos.

Cuando Cowan y Reines detectaron el (anti)neutrino por primera vez, para capturar algunos tenían que estar cerca del reactor nuclear que los emitía. Hoy, con enormes detectores bajo el suelo, es posible captar los antineutrinos que emiten los reactores situados a varios kilómetros de distancia. Eso está bien si quieren estudiarse los neutrinos de los reactores, pero estos pueden ser un ruido de fondo molesto si en realidad se está interesado en estudiar los neutrinos procedentes de otra parte. En un experimento de la década de 1990, para hacer una medición de neutrinos de mucha sensibilidad, se necesitaba saber cuántos de ellos provendrían de una central de energía nuclear cercana. No fue fácil averiguarlo.

Al llamar al encargado del gabinete de prensa y preguntar cuántos antineutrinos producía la central de energía, se hizo un silencio. Tal vez ajeno por completo a la existencia del antineutrino, y preocupado por las continuas protestas de los ecologistas contra la presencia de una central nuclear en la localidad, la respuesta del encargado llegó abruptamente: «¡Ninguno!».

Entonces el científico le explicó que es inevitable que un reactor nuclear produzca antineutrinos a la vez que energía. Por lo tanto, si no había antineutrinos entonces tampoco estaba produciendo energía. Así pues, ¿por qué estaba la compañía facturando por la electricidad? O bien la compañía estaba cometiendo un fraude o bien la respuesta «ninguno» no podía ser correcta. El encargado de prensa prometió comprobarlo y devolver la llamada.

Algo más tarde sonó el teléfono del despacho del científico. Era el encargado de prensa. «Tiene razón —dijo—, sí producimos antineutrinos —y a continuación le dio una cifra, aunque añadió en voz muy alta—: ¡Pero *ninguno* escapa!».

A menos que la central hubiera encontrado el santo grial de cómo capturar todos y cada uno de los neutrinos, eso era un disparate, pero por lo menos los científicos tenían la cifra que necesitaban. De aquí salió una idea astuta: ¿por qué no usar los reactores como fuente de antineutrinos en un experimento... para estudiar antineutrinos? La idea era que si se los detectaba lejos de su origen, y se comparaba cuántos habían

llegado con cuántos habían salido, se podría saber si habían oscilado de una variedad a otra por el camino.

Eso es lo que hicieron los científicos japoneses en fechas recientes. Usaron un detector en la mina de Kamioka para medir energías de antineutrinos. Se llama KamLAND, de Kamioka Liquid Scintillator Neutrino Detector («Detector de Neutrinos de Centelleador Líquido de Kamioka»), y solo es sensible a los antineutrinos de tipo electrónico, que es la forma que producen las centrales de energía nuclear. En función de la dirección de donde llegaba cada antineutrino, podían determinar de cuál de las 53 centrales nucleares de Japón provenía<sup>[72]</sup>. Comparando las cantidades que llegaban con las que salían de las centrales, hallaron que la intensidad no disminuía de manera uniforme con la distancia recorrida. En cambio, dependía a la vez de la distancia y de la energía, y de tal modo que disminuía y luego volvía a aumentar. La clave resultó estar ahí.

Cuanta más energía tiene un antineutrino, más cerca está de moverse a la velocidad de la luz. La distancia recorrida dividida por la energía es una medida del tiempo que lleva viajando el antineutrino. Resultó que la disminución y el aumento dependían de la duración del viaje. Tenía todas las características de una oscilación.

KamLAND está a más de cien kilómetros de algunos reactores, y el resultado fue que desaparecía un promedio del 40 % de la cantidad esperada de antineutrinos. Se han realizado varios experimentos situados aproximadamente a un kilómetro de un reactor, pero en estos no se han hallado indicios de oscilación. Tanto en las Árdenas como en Palo Verde (en Arizona), los resultados concordaban: un kilómetro no es suficiente para que un neutrino cambie sus características de modo medible.

KamLAND demostró que los neutrinos oscilan, pero todavía no sabemos lo suficiente para decir qué tipo de neutrino se transforma y en qué se transforma.

No obstante, empieza a ser posible averiguar algo de las masas de los neutrinos. Las matemáticas de las oscilaciones dan una medida de las diferencias entre los cuadrados de las masas. El resultado es una cantidad muy pequeña, unos  $10^{-5} \text{ eV}^2$ . ¿Qué significa esto para sus verdaderas masas? Bueno, eso depende de cuán grande sea una de ellas. Si alguno no tiene masa, entonces otro debe tener una masa de solo  $10^{-2} \text{ eV}$  aproximadamente. En comparación, la masa de un electrón está cerca de medio millón de electronvoltios<sup>[73]</sup>. En cambio, si ambos están cerca de  $1 \text{ eV}$  cada uno, sus masas solo pueden diferir en  $10^{-5} \text{ eV}$ .

De todos modos, una cosa es segura: algunos tipos de neutrino tienen que poseer masa. Es posible que todos ellos la tengan, pero los valores son extremadamente diminutos, incluso a la escala del ligero electrón. Por qué sus masas son tan parecidas, y a pesar de todo no idénticas, es uno de los principales rompecabezas que ojalá resuelvan las generaciones futuras.

## MINOS

Entre los lagos y bosques del norte de Minnesota, cerca del municipio de Soudan, hay una mina de hierro de principios del siglo XX, que seguía una veta extremadamente pura de mineral de magnetita a unos ochocientos metros bajo tierra. En la década de 1950 la extracción de mineral ya no resultaba rentable, por lo que los propietarios, US Steel, le cedieron la mina al estado de Minnesota, que ahora la administra como un parque donde pueden hacerse visitas turísticas a las instalaciones subterráneas. A principios de la década de 1980, unos físicos de la Universidad de Minnesota, que buscaban indicios de desintegraciones de protones, se dieron cuenta de que aquel sería un sitio ideal para instalar un detector subterráneo. De propina, también podía registrar neutrinos producidos por las colisiones de rayos cósmicos en la atmósfera.

Junto a algunos colegas estadounidenses e ingleses, construyeron un dispositivo experimental en una cavidad excavada



en el nivel más bajo de la mina. La novedad era que su funcionamiento se basaba en un principio completamente distinto del de los detectores de agua. Las partículas cargadas que producían las interacciones de neutrinos se detectaban a través de los electrones que liberaban de un gas noble, el argón. No hallaron ningún indicio de protones inestables, pero su detección de neutrinos atmosféricos, los producidos por los rayos cósmicos al incidir en la alta atmósfera, confirmaba los informes del experimento de Kamiokande de que estos exhibían un déficit de neutrinos muónicos. Ello demostraba que el efecto era real, y no se trataba de una peculiaridad de la técnica de detección basada en el agua.

A finales de la década de 1980, Maury Goodman observó que, al hallarse a una distancia de 735 kilómetros del complejo del acelerador del Fermilab cerca de Chicago, la mina de Soudan daba la oportunidad de efectuar mediciones sistemáticas de las oscilaciones de neutrinos. El problema de los neutrinos atmosféricos es que los físicos no tienen ningún control sobre su producción. Debe aceptarse lo que da la fortuna, y se intenta modelar cómo se producen los neutrinos a partir de un conocimiento previo de los rayos cósmicos y de los procesos de interacción. En cambio, si los neutrinos se producen en un acelerador, entonces pueden prepararse con arreglo a ciertas condiciones, lo que permite seleccionar neutrinos muónicos o electrónicos, y con energías específicas.

En primer lugar, el acelerador produce protones de alta energía, que se dirigen contra un objetivo de carbono. Esto produce grandes cantidades de piones cargados eléctricamente, que se enfocan en un haz paralelo y se envían a lo largo de un túnel al vacío donde se desintegran y dan neutrinos muónicos. Al final del túnel, la pared de roca filtra todas las partículas cargadas, y tan solo deja un haz de neutrinos.

Apuntando el túnel hacia la mina de Soudan, el haz pasaría a través del detector que ya estaba allí, y podrían estudiarse las interacciones de neutrinos para ver si realmente habían

desaparecido algunos de ellos. A causa de la curvatura de la Tierra, el haz tenía que dirigirse hacia abajo según un ángulo de unos tres grados. Así, la trayectoria del haz de neutrinos pasa de lleno a través de la corteza terrestre.

A partir de los resultados de Kamiokande y de Soudan se esperaba que, si el déficit de neutrinos se debía a las oscilaciones, los neutrinos muónicos oscilarían y se convertirían en neutrinos de tipo tau. Como los neutrinos muónicos producen muones cuando interactúan, y los neutrinos de tipo tau producen partículas tau, un detector que aislara muones podría comprobar si habían desaparecido neutrinos muónicos. Debido a un golpe de suerte, 735 kilómetros eran la distancia justa para que se produjera un máximo en las oscilaciones previstas de un haz emitido desde el Fermilab.

Como ocurre siempre en los experimentos con neutrinos, el problema estribaba en que casi todos ellos pasarían a través de la Tierra y del detector sin interactuar. Por aquel entonces, los aceleradores del Fermilab no podían producir ningún haz de neutrinos lo bastante intenso como para llevar a cabo su experimento. No obstante, en el laboratorio se estaba construyendo un nuevo acelerador, y su suministrador de partículas, conocido como inyector principal, sería lo suficientemente potente como para producir un haz de neutrinos que fuera de utilidad en Soudan. En 1995 empezaba la construcción del nuevo acelerador, y una colaboración de físicos, incluyendo los grupos originales que habían puesto en marcha el laboratorio subterráneo de Soudan, estaba planeando el experimento MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search, «Búsqueda de Oscilaciones de Neutrinos del Inyector Principal»).

En una cavidad nueva y más grande de la mina de Soudan se construyó un enorme detector de cinco mil toneladas. Utilizaba otro método de detección más. Las partículas cargadas pasaban a través de plástico, al que se habían añadido pequeñas cantidades de productos químicos especiales, y emitían destellos de luz (centelleos). Estos centelleos pueden captarse y enviarse a unos

fototubos similares en principio a los usados para detectar la luz de Cerenkov en los detectores de agua. Modelando el plástico como tiras estrechas, intercaladas entre placas de acero, puede seguirse la trayectoria de las partículas cargadas a través del detector y, magnetizando las placas de acero, la curvatura de las trayectorias, y por lo tanto la energía de las partículas producidas, puede medirse. Con toda esta información, pueden reconstruirse los detalles de la interacción del neutrino, y en particular su energía. Luego, tanto la distancia recorrida (los 735 kilómetros que lo separan del Fermilab) como la energía del neutrino son conocidas. Un detector muy similar (pero más pequeño) se construyó también en el Fermilab, así que si se comparaba la distribución de energía de los neutrinos medida en el Fermilab con la medida en Soudan, podía medirse de qué modo el déficit, fuera el que fuera, dependía de la energía de los neutrinos. Si, como se esperaba, exhibía una pauta de oscilación, esta mediría la diferencia de masa entre los neutrinos producidos y los resultantes de dicha oscilación.

A principios de 2005, el acelerador, el haz de neutrinos y los dos detectores estaban a punto, y empezó el experimento. En Soudan se registraron dos o tres interacciones a la semana debidas a neutrinos procedentes del haz y, tras un año de funcionamiento, se observaba un claro déficit de neutrinos. El experimento todavía está funcionando, y da resultados cada vez más precisos. Se espera que tarde o temprano permita averiguar si los neutrinos muónicos se transforman en neutrinos electrónicos y también neutrinos de tipo tau, y además si los antineutrinos oscilan igual que los neutrinos. Incluso cabe la posibilidad de que se encuentren diferencias fundamentales entre los neutrinos y los antineutrinos. Tal descubrimiento podría arrojar luz sobre la cuestión de cómo es posible que nuestro mundo dominado por la materia surgiera del universo simétrico de materia-antimateria producido por el *Big Bang*<sup>[74]</sup>.

La investigación de los neutrinos solares había experimentado un cambio drástico desde que Davis empezó a hacerlo. Hacia 1990, el objetivo principal se había convertido en comprender los neutrinos mismos. Cuando Davis empezó su búsqueda, su equipo consistía en solo un puñado de científicos e ingenieros. Un experimento típico implica en la actualidad a más de cien físicos, en una colaboración internacional. Casi todos los experimentos usan la electrónica y no la radioquímica. Aunque Davis halló en promedio un neutrino a la semana, y no sabía nada de su energía excepto que tenía la suficiente, por lo menos, para ser detectado, los experimentos electrónicos registran miles de eventos cada año, junto a mediciones de sus energías, e incluso las direcciones de procedencia. Como vimos en la página 129, incluso es posible mostrar una imagen del Sol brillando con «luz de neutrinos».

El mayor desafío para la investigación de los neutrinos solares sigue siendo el de detectar los neutrinos de energía más baja que se producen en las reacciones de fusión primarias. Con energías tan bajas, tienen muy pocas probabilidades de interactuar, pero abarcan más del 99 % del flujo solar total. Las predicciones de la astrofísica sobre los neutrinos solares son de lo más precisas con respecto a las energías más bajas, que están por debajo de 1 MeV. El detector del SNO, basado en el agua pesada, continuó estudiando el Sol hasta 2006, cuando expiró el préstamo por diez años de la AECL. Todavía existe parte del aparato y, en lugar de agua pesada, se usará un líquido orgánico, el cual emite destellos de luz cuando lo atraviesan partículas cargadas. Estos destellos serán más brillantes que en el caso del agua pesada. Una consecuencia será que el SNO, en su nueva fase, podrá detectar neutrinos con energías más bajas que antes. Esto podría empezar a enseñarnos algo sobre el proceso primario y dominante de producción de energía solar, a partir de los protones como fuente básica de dicha energía.

También cabe la esperanza de que, al acumular más datos, nos resulte posible ver si los flujos cambian del día a la noche. Por la noche los neutrinos tienen que pasar a través de toda la Tierra, en

lugar de hacerlo solo un par de kilómetros, como sucede de día. Se predice que este efecto MSW de la Tierra sea pequeño, así que será un reto.

La posibilidad de examinar en profundidad el espacio mediante las inmensas cantidades de neutrinos que llenan el vacío es una meta emocionante. Los astrofísicos creen que las explosiones de rayos gamma, que han dejado perplejos a los astrónomos, están acompañadas de hordas de neutrinos. Se predice que estos tengan energías superiores a cien billones de electronvoltios, es decir por lo menos diez veces mayores que las energías que pueden obtenerse para los haces primarios en el acelerador más potente del mundo, el LHC del CERN. Para capturar algunos de esos neutrinos procedentes de la galaxia, e incluso más allá, se necesitan enormes detectores subterráneos.

La astronomía de neutrinos ha abandonado los laboratorios situados en cavidades subterráneas y, para capturar las más elusivas partículas, ahora utiliza características naturales de la Tierra como detectores. Esos nuevos telescopios de neutrinos son subacuáticos y están en el mar Mediterráneo y en el lago Baikal, en Rusia. También los hay bajo el hielo de la Antártida. Ocupan un kilómetro cuadrado, y tienen nombres tan románticos como AMANDA y ICECUBE.

AMANDA significa Antarctic Muon And Neutrino Detector Array («Alineación de Detectores de Muones y Neutrinos de la Antártida»). Está enterrada bajo un kilómetro de hielo y trata de detectar neutrinos cósmicos de alta energía procedentes de nuestra galaxia o de otras. Además de los neutrinos solares, hay neutrinos viajando por el universo que son restos del *Big Bang*, y también inmensas cantidades producidas por colosales explosiones estelares.

Por supuesto hay neutrinos en cantidades enormes ahí fuera, pero su flujo es relativamente poco intenso en el momento de llegar aquí. La captura de neutrinos solares ha requerido detectores con miles de toneladas de material. Es probable que el flujo de neutrinos de las partes lejanas de nuestra galaxia y de más allá sea tan tenue

con relación al flujo de neutrinos solares como la luz de las estrellas con respecto a la luz del día. Para tener alguna posibilidad de capturarlos se necesitan detectores que contengan más de un kilómetro cúbico de materia. Es obvio que resulta imposible construir algo así en un laboratorio, pero la ingeniosa solución ha sido usar el hielo de la Antártida como un detector natural.

Cuando los neutrinos de los rayos cósmicos chocan con los átomos del hielo, pueden producirse muones. A su vez, al pasar a través del hielo, estos generan radiación de Cerenkov, tenues destellos de luz azul. Todo lo que se necesita es detectarlos.

El hielo de la Antártida no es como el hielo que estamos acostumbrados a ver en un frío día de invierno. En la Antártida, la nieve ha caído sobre el hielo durante un tiempo mucho más largo que el de los registros históricos. A un kilómetro bajo la superficie actual, la nieve cayó hace diez mil años, poco después de la última glaciación. La presión es tan grande que ahí abajo todas las burbujas de aire han sido expulsadas, y el resultado es un hielo tan puro que los destellos de luz, producidos por los neutrinos, pueden viajar centenares de metros sin perder intensidad. Se han hecho descender tubos fotomultiplicadores por pozos abiertos en el hielo mediante un taladro especial que lo derrite con chorros de agua caliente. Al volver a helarse, fija en su sitio al detector, que está unido a un largo cable. A partir de entonces no deja de registrar datos. Una alineación de esos detectores espera los destellos de luz indicativos que señalan un neutrino. El sistema es tan sensible que registra regularmente neutrinos atmosféricos de todas partes alrededor del globo. Algunos provienen directamente de una zona situada sobre la Antártida, mientras que otros han recorrido todo el camino a través de la Tierra, desde el Polo Norte.

Ideas similares se están desarrollando en el hemisferio norte, pero usando agua en lugar de hielo. Desde 1998 ha habido un detector relativamente pequeño, con un área de unos cuantos miles de metros cuadrados, bajo el lago de agua dulce más profundo del mundo, el lago Baikal, en Siberia. No obstante, se necesitan

detectores más grandes para hacer mediciones verdaderamente sensibles. Se está construyendo una gran alineación de fototubos en profundas fosas naturales del mar Mediterráneo. ANTARES significa Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch («Astronomía con un Telescopio de Neutrinos e Investigación del Medio Abisal»), y es un detector en fase de construcción ante la costa sur de Francia, cerca de Toulon. Otro detector, NESTOR, estará en las regiones más profundas del mar Mediterráneo, al sureste del Peloponeso, en Grecia.

El núcleo galáctico de la Vía Láctea está completamente oscurecido por gas denso y numerosos objetos brillantes. Sin embargo, es posible que los neutrinos producidos en el núcleo galáctico sean detectables mediante telescopios terrestres de neutrinos en la próxima década.

El objetivo estriba en saber qué hay en el universo que no podamos ver mediante luz visible u ondas electromagnéticas de cualquier longitud de onda. El reto será desarrollar los instrumentos adecuados para detectar esos neutrinos, medir sus energías e identificar de dónde han venido. Si las explosiones de rayos gamma se pueden ver mediante neutrinos, estaremos detectando neutrinos que llevan miles de millones de años viajando por el espacio. Así como el viaje de diez minutos de los neutrinos solares es inmenso en la escala de los nanosegundos del laboratorio, a su vez los tiempos de viaje de los neutrinos cósmicos son respectivamente más inmensos todavía.

El viaje desde las regiones más distantes del universo, a lo largo de escalas de tiempo tan inmensas, podría revelar propiedades exóticas de los neutrinos. Es posible que interactúen con la radiación cósmica de fondo procedente del *Big Bang*. Podrían estarnos esperando sorpresas que resulten ser incluso más sensacionales que cualquier cosa que haya ocurrido hasta ahora.

## RECAPITULACIÓN

Ocho décadas después de que Pauli exclamara que había hecho «algo terrible», al admitir que había «postulado la existencia de una partícula que no se puede detectar», la astronomía de neutrinos está a punto de permitirnos mirar en el interior de lejanas galaxias, y hallar ecos del *Big Bang*. Han ocurrido muchas cosas desde aquel instante fundacional en que Pauli ideó el neutrino. La primera fase de nuestra historia duró veintiséis años, hasta el día de junio de 1956 en que Clyde Cowan y Fred Reines decidieron que se sentían suficientemente seguros como para decirle a Pauli que por fin habían demostrado que tenía razón.

Le enviaron un telegrama, que recibió mientras asistía a un congreso en el CERN. Interrumpió la reunión para leérselo a los presentes. «Nos alegra informarle de que definitivamente hemos detectado neutrinos. El [ritmo al que los detectamos] encaja con [lo que] se esperaba». Pauli y sus colegas consumieron una caja de champán para celebrarlo<sup>[75]</sup>. Pauli pagó por el champán que se había apostado años antes, y también envió una agradecida respuesta, dándoles las gracias por la noticia, y añadiendo el comentario: «Todo llega al que sabe esperar».

Resulta que ese comentario resume toda la historia de los neutrinos, y las distintas fortunas de los héroes de nuestro relato.



Como dijo concisamente un destacado físico, Luis Álvarez, una vez descubierto el neutrino: «¿Cómo logras un “más difícil todavía”?». Si alguien esperaba un Premio Nobel por ese descubrimiento, tendría que esperar. Reines marcó un «más difícil todavía» al continuar su búsqueda «para hacer la medición más difícil posible». La probabilidad de que un neutrino interactúe con algo es pequeña, y la teoría implicaba que su probabilidad de interacción con un electrón es la más pequeña de todas. Reines pasó veinte años intentando efectuar esa medición, haciendo experimentos cada vez más precisos. Finalmente lo logró, y cuatro décadas después, en su discurso de aceptación del Premio Nobel, dijo que había sido la probabilidad de interacción más pequeña de cualquier proceso jamás medido.

Sin embargo, no había dedicado veinte años solamente a esto. Su principal actividad a partir de 1960 había sido la búsqueda de neutrinos producidos de modo natural por los rayos cósmicos. Las colisiones entre los rayos cósmicos y la atmósfera producen muchos piones, que se desintegran en forma de muones y neutrinos. Desintegraciones del mismo tipo, producidas en aceleradores, fueron las que inspiraron a Steinberger, Schwartz y Lederman en 1960. Esto intrigó a Reines, quien se dio cuenta de que los piones cósmicos tienen que producir chorros de neutrinos. El reto era cómo detectarlos.

Tras progresar en paralelo a Davis en 1950, cuando ambos buscaban neutrinos en el reactor de Savannah River, sus carreras volvían a seguir un curso similar. Davis bajó a 1,6 kilómetros de profundidad en Dakota del Sur en busca de neutrinos del Sol, a la vez que Reines construía un dispositivo experimental a 3,2 kilómetros bajo tierra en una mina de oro de Johannesburgo en busca de neutrinos de los chorros cósmicos. El 23 de febrero de 1965 Reines detectó el primer neutrino «natural». Hasta esa fecha, los únicos neutrinos registrados se habían producido en reactores o aceleradores.

Los experimentos subterráneos de Reines que detectaban neutrinos cósmicos se convirtieron en su principal foco de interés. Era uno de los principales investigadores del IMB (véase la página 127) cuando en 1987 llegaron los primeros neutrinos de una supernova. Los datos no solo demostraron que nuestras teorías sobre las supernovas eran correctas, sino que también revelaron algunas cosas sobre los neutrinos. Los resultados implicaban que solo hay tres tipos de neutrinos: el tipo electrónico, el tipo muónico y el tipo tau. En los experimentos de 1990 realizados en el CERN, que no guardaban ninguna relación con las supernovas, también se demostró que el número de tipos es tres<sup>[76]</sup>. Esa observación también encaja con la cosmología teórica, que puede explicar las abundancias relativas de los elementos químicos ligeros en el universo a gran escala si se supone que del *Big Bang* salieron tres tipos de neutrino. Así pues, en 1995 se había establecido la existencia de tres tipos de neutrino, y la astronomía de neutrinos, dedicada al Sol y las explosiones de supernova, había nacido como disciplina científica.

Ese año, treinta y nueve después de demostrar la existencia de «la más diminuta cantidad de algo real jamás imaginada por un ser humano», y a la edad de setenta y siete años, Reines recibió el Premio Nobel. El galardón reconocía su trabajo de una vida con los neutrinos: su descubrimiento, la determinación de sus propiedades, y la inspiración del nacimiento de la astronomía de neutrinos. Su discurso de aceptación<sup>[77]</sup> fue extremadamente elogioso para quien había colaborado con él una vez: «Clyde Cowan fue un colega de igual a igual. Lamento que no viviera lo suficiente para compartir conmigo este honor».

#### KOSHIBA EN JAPÓN

Para Masatoshi Koshiba, la espera fue de otro tipo. Nació en Tokio en 1926, estudió física en la universidad de la misma ciudad, y se licenció en 1951. Fue a Estados Unidos para hacer su doctorado, en

la Universidad de Rochester, se pasó tres años como investigador asociado en la Universidad de Chicago, entre 1955 y 1958, y luego regresó a Japón. Consagró su vida a la física nuclear y de partículas experimental, y ascendió de manera gradual hasta obtener el puesto de profesor en la Universidad de Tokio en 1970. Solo cuando estaba cerca de los sesenta años y de la jubilación se incorporó al proyecto que le daría renombre: inspirado por los intentos de Davis de detectar neutrinos solares, Koshiba dirigió el grupo que construyó el primer observatorio de neutrinos solares plenamente equipado.

Tuvo tres aplicaciones diferentes: aquella para la que fue diseñado, una que se produjo por casualidad, y otra completamente inesperada. La primera fue su capacidad para tomar neutrinografías del Sol, que confirmaron los resultados de Davis y, junto al SNO, resolvieron el problema de los neutrinos solares. La segunda fue pura buena suerte cuando, solo dos meses después de la puesta en marcha, oyeron que se había visto una supernova en los cielos australes. La energía de cada (anti)neutrino de una supernova es mucho mayor que la de un neutrino solar, lo que los hace más fáciles de detectar. Como el detector ya era capaz de detectar neutrinos solares, comprobaron los datos y les resultó fácil encontrar las señales de los neutrinos de la supernova.

En tercer lugar, obtuvieron una propina inesperada al detectar neutrinos procedentes de los rayos cósmicos. Como las distintas pautas de la radiación de Cerenkov permitían distinguir los electrones de los muones, podían saber si estaban detectando señales de neutrinos de tipo electrónico o de tipo muónico. Esperaban ver dos de tipo muónico por cada uno de tipo electrónico, pero se encontraron con que había menos neutrinos muónicos de los esperados. Podían distinguir los neutrinos que venían de una zona situada sobre Japón, tras un recorrido de no más de veinte kilómetros, de los que llegaban horizontalmente después de haber viajado unos mil kilómetros, y de los que llegaban desde abajo, tras cruzar toda la Tierra en una travesía de trece mil kilómetros. Los neutrinos que llegaban de más lejos tenían una proporción menor

del tipo muónico. Así pues, en el SuperK podían afirmar que habían sido los primeros en hallar indicios claros de que los neutrinos tienen masa<sup>[78]</sup>. Esto podía explicar por qué Davis había encontrado menos neutrinos solares de los que él y Bahcall esperaban, y encajaba con otra de las ideas de Pontecorvo: que los neutrinos pueden oscilar.

Entre las muchas ironías que ha producido la historia de los neutrinos, la aventura de los neutrinos atmosféricos y la contribución de Koshiba bien merecen un comentario aparte<sup>[79]</sup>. Los primeros experimentos para detectar neutrinos atmosféricos datan de 1963, y en aquel caso dichos neutrinos eran el resultado inesperado de la medición, efectuada por Fred Reines y otros, de la penetración de los rayos cósmicos (principalmente muones) a través del suelo. A pesar de que por aquel entonces el equipo japonés, y también Pontecorvo y Gribov, habían predicho las oscilaciones de neutrinos, nadie estaba lo bastante interesado en ello como para instalar grandes detectores de neutrinos bajo tierra. En cambio, todos los esfuerzos se destinaron a realizar experimentos que usaban los haces de neutrinos mucho más intensos que se empezaban a producir en los aceleradores<sup>[80]</sup>. Sin embargo, los veinte años de búsqueda de oscilaciones de neutrinos en los aceleradores acabaron en fracaso.

De hecho, por aquel entonces algunos científicos habían 1 propuesto que se instalaran detectores a varios kilómetros de distancia de los aceleradores, una idea que se retomó después (véase el capítulo 10), pero la administración del CERN canceló los planes originales. Una propuesta para situar un detector en el lado más alejado de las montañas de Jura, para detectar neutrinos procedentes del CERN, se consideró excesivamente delicada en un momento en que el CERN estaba intentando conseguir apoyo para su gran colisionador de electrones y positrones (LEP), un acelerador subterráneo de 27 kilómetros. En apariencia, la inquietud de la administración se debía a que, si la gente se enteraba de que los neutrinos podían atravesar un macizo montañoso, la opinión pública

podría empezar a preocuparse de lo que pudiera pasarles a los seres humanos. Explicar que los neutrinos son inocuos sería una tarea «educativa» extra a la que habría que recurrir durante las delicadas negociaciones. La política ganó, y los cazadores de oscilaciones del CERN perdieron.

Ya era la década de 1980 y, como vimos en el capítulo 10, los intentos fallidos de detectar desintegraciones de protones no dejaron a los experimentos subterráneos otra opción que estudiar los neutrinos atmosféricos. Y por ese motivo Koshiba empezó a defender la idea del SuperK.

En 1990, cinco experimentos realizados en Estados Unidos, Europa y Japón estaban detectando la anomalía en las cantidades relativas de neutrinos atmosféricos de los tipos muónico y electrónico. La ironía es que no se le daba crédito. En 1992, en el principal congreso internacional de física de partículas, celebrado en Dallas, la persona que explicó los progresos en aquel campo resumió las razones por las que podía dudarse de que la supuesta anomalía fuera real<sup>[81]</sup>.

La observación de las oscilaciones de los neutrinos atmosféricos en la Tierra se debe en parte a la naturaleza única de nuestro planeta. El campo magnético terrestre determina el comportamiento de los rayos cósmicos incidentes y, por lo tanto, de las energías de los neutrinos y de la intensidad de su flujo. Por suerte, el radio de la Tierra, que determina la distancia que recorren los neutrinos de un lado a otro, es el que más se ajusta al ritmo de oscilación de los neutrinos de esa energía y esa masa. Además, la densidad de la Tierra es lo bastante pequeña como para que solo uno de cada mil neutrinos se perdiera al atravesar el planeta en sentido diametral. Fue todo cuestión de suerte.

La detección de las oscilaciones de los neutrinos atmosféricos fue un afortunado efecto colateral de una búsqueda fallida de desintegraciones de protones, y de la extraordinaria precisión que podían proporcionar los grandes detectores llenos de agua pura. La inspiración del SuperK fue el legado de Koshiba, aunque ya se

había jubilado cuando se hallaron los indicios clave. Koshiba compartió el Premio Nobel con Davis en 2002 por sus «contribuciones precursoras a la astrofísica [de neutrinos]». Con setenta y seis años, Koshiba era casi un joven.

#### DAVIS Y BAHCALL

---

Ray Davis, que había sobrevivido hasta la edad de ochenta y siete años, recibió con gratitud un Premio Nobel enormemente justificado. Había intentado mirar en el interior del Sol, y había dedicado toda su carrera a un logro que finalmente llegó.

Su colaborador durante mucho tiempo, John Bahcall, también había consagrado toda su carrera a una misma búsqueda. Fueron su artículo y el de Davis, publicados consecutivamente en *Physical Review Letters* en 1964, los que pusieron en marcha la aventura. Cuando Davis y Koshiba compartieron el Premio Nobel por su trabajo experimental, no se incluyó a Bahcall. Se especuló que si él y Davis hubieran escrito un único artículo en colaboración, en lugar de dos individuales, el resultado podría haber sido distinto. Sin embargo, esto parece improbable: el comité del Premio Nobel había citado ambos artículos en sus notas técnicas, así que no cabía ninguna posibilidad de que Bahcall hubiera pasado desapercibido. El premio reconocía los principales y definitivos actos de experimentación que habían creado una nueva rama de la ciencia: la astronomía de neutrinos. Los cálculos de Bahcall del flujo de neutrinos solares, sin los cuales quizá nada de esto habría empezado, eran por supuesto de singular importancia en la historia de la ciencia del siglo XX, pero, por lo menos según la opinión del comité del Premio Nobel, estaban en otro plano cualitativo.

A pesar de todo, en los meses anteriores al anuncio del premio, habían abundado las especulaciones de que, ahora que todo había encajado limpiamente, aquel sería el año en que el Premio Nobel reconocería la tarea de los cazadores de neutrinos. Muchos físicos especulaban con que el nombre de Bahcall estaría en la lista de los

principales candidatos, y quedaron sumamente sorprendidos cuando no se lo incluyó. Al pedirle una respuesta ante el anuncio de los premios, dijo generosamente que eran muy merecidos, y que le complacía ser «mencionado en esa distinguida compañía».

John Bahcall no ganará nunca el premio, pues murió en 2005, con solo setenta años. Había sobrevivido lo bastante como para ver confirmado el trabajo de su vida, y será recordado durante mucho tiempo por su espontáneo comentario del año 2001, cuando se anunciaron los resultados del experimento del SNO que les daban la razón a él y a Davis: «Soy tan feliz que me pondría a bailar».

Si los neutrinos no hubieran oscilado, entonces es probable que Davis hubiera medido la misma cantidad de SNU calculada por Bahcall en los primeros años de búsqueda. El curso de la historia podría haber sido muy distinto. Si tuvo que pasar tanto tiempo fue porque los neutrinos llevan carnés de identidad, y pueden intercambiarlos de manera subrepticia cuando se les da la ocasión. Ambos hechos fueron anticipados por Bruno Pontecorvo. Ciertamente, toda la trayectoria de la física de neutrinos había llevado el sello teórico de Pontecorvo durante más de medio siglo.

#### BRUNO PONTECORVO

---

Uno de los placeres que da el escribir un libro es que la trama no siempre se desarrolla como uno esperaba. En un primer momento me había inspirado en la singular dedicación de Ray Davis a la búsqueda de los neutrinos solares, que culminó en su Premio Nobel. No había previsto que la identidad del personaje central de la trama acabaría siendo la de Bruno Pontecorvo. Era en Pontecorvo, no menos que en Clyde Cowan y John Bahcall, en quien estaba pensando cuando preparé el desarrollo narrativo con la frase: «La longevidad es una gran baza en el oficio de los neutrinos. No todos serían tan afortunados».

En 1934, el joven Bruno Pontecorvo había notado que la radiactividad se comportaba de un modo extraño en el experimento

de Fermi. Este siguió la pista que le había dado Pontecorvo, y ganó el Premio Nobel. Una de las consecuencias a largo plazo de todo esto fue el desarrollo de los reactores nucleares, que producen la intensa emisión de neutrinos que Cowan y Reines utilizaron para su descubrimiento.

La entrada de Pontecorvo en la historia de los neutrinos llegó en 1946, con su temprana argumentación con respecto a las ventajas del uso del cloro como detector de neutrinos. Fue esa idea la que impulsó a Davis a una búsqueda que duró el resto de su vida.

La propuesta de Pontecorvo de utilizar el cloro como un medio ideal para capturar neutrinos era correcta. El problema estribaba en que los reactores producen antineutrinos, para los que dicha técnica no es aplicable. Así pues, el descubrimiento del neutrino por Cowan y Reines le debía poco a Pontecorvo. Si se hubiera dado el caso de que los reactores emitieran neutrinos en lugar de antineutrinos, o de que los neutrinos y los antineutrinos se comportaran igual, entonces sin duda Davis habría hecho el descubrimiento, y él y Pontecorvo probablemente habrían compartido el Premio Nobel por ello. Esa no fue más que la primera oportunidad de ganar un Premio Nobel que la fortuna se conjuraba para negarle.

Donde la idea de Pontecorvo dio frutos fue en la búsqueda de neutrinos solares. El Sol sí produce neutrinos, pero no antineutrinos. Davis fue la primera persona que miró al interior de una estrella, y lo hizo mediante la idea de Pontecorvo. Sin embargo, la gente tardó cerca de treinta años en convencerse de que Davis tenía razón. Hoy sabemos por qué costó tanto: los neutrinos electrónicos oscilan, por lo que se transformaban durante su recorrido desde el Sol, y escapaban a la trampa de Davis.

Pontecorvo incluso había anticipado por qué los neutrinos solares tenían ese mal comportamiento. Fue el primero en suscitar la cuestión de si los neutrinos electrónicos y los neutrinos muónicos son distintos, demostró cómo resolver dicha cuestión mediante experimentos y, cuando se averiguó que eran distintos, incluso



sugirió que las oscilaciones podrían ser la causa del déficit en el experimento de los neutrinos solares de Davis.

No solo Pontecorvo tenía razón también en eso, sino que además la historia de sus revelaciones está llena de ironías. Si las oscilaciones de neutrinos no hubieran existido, Pontecorvo habría tenido razón la primera vez (por su idea del cloro como detector) y Davis habría capturado los neutrinos solares al ritmo previsto. En este caso la ironía estriba en que Pontecorvo tuvo razón más de una vez. Las oscilaciones de neutrinos diluyeron la señal de Davis hasta el punto de que sus resultados se pusieron en duda durante casi treinta años. La sugerencia de Pontecorvo de que las oscilaciones de neutrinos eran las responsables fue desdeñada casi por completo. Esto no empezó a aclararse hasta 1998, y solo en 2001 quedó firmemente establecido.

La hipótesis de las oscilaciones de los neutrinos era una consecuencia de su anterior idea según la cual los neutrinos producidos en asociación con electrones eran de algún modo distintos a los producidos junto a muones. En este caso, Pontecorvo fue un espectador cuando Lederman, Steinberger y Schwartz ganaron el Premio Nobel por haber efectuado este mismo descubrimiento de manera independiente, y valiéndose de los mismos medios que él había sugerido. Pontecorvo perdió la oportunidad porque, en un momento decisivo de la historia de los neutrinos, había decidido vivir tras el Telón de Acero. Sus artículos fundamentales aparecieron originalmente en ruso, y no fueron leídos en Occidente. En la Unión Soviética las instalaciones experimentales no eran las adecuadas para que pudiera hacer realidad sus sueños, y las autoridades le denegaron el permiso para viajar a los países occidentales, donde habría podido añadir un Premio Nobel al premio que recibió de Moscú, el Premio Stalin.

De todas sus ideas, quizá la de más alcance sea su inspiración de 1959 según la cual los neutrinos electrónicos y los neutrinos muónicos son distintos. Esto condujo al modelo estándar moderno de la física de partículas, y a la hipótesis de que los epónimos

neutrinos electrónicos y muónicos podían intercambiar sus identidades según una oscilación, siempre y cuando tuvieran algo de masa. Esta idea fue desarrollándose a lo largo de varios años hasta alcanzar su madurez en 1967, un año entero antes de que Davis descubriera la anomalía de los neutrinos solares. Algunos años más tarde, mientras miraba una vieja edición de una revista científica, me topé con el artículo de Pontecorvo y «descubrí» que estaba en Moscú.

Quizá sea este artículo, más que ningún otro, el que resume el triunfo y la tragedia de la carrera científica de Pontecorvo. A causa de las oscilaciones de neutrinos los neutrinos del Sol quedaban diluidos antes de llegar al tanque de cloro. Si no hubiera sido así, entonces Davis habría detectado el flujo en toda su intensidad en 1964 y habría recibido los honores de inmediato, junto a Pontecorvo: una segunda oportunidad de compartir un Premio Nobel. En cambio, por aquel entonces las oscilaciones de neutrinos resultarían ser una maldición. Ray Davis tuvo que pasarse treinta años intentando averiguar por qué parecían estar ausentes tantos neutrinos del Sol. Esto no quedó aclarado hasta el cambio de siglo, y acabó conduciendo a su Premio Nobel, obtenido en 2002, a la edad de ochenta y siete años. Pontecorvo, en cambio, había muerto en 1993, sin saber qué grandes verdades había sacado a la luz.

Nunca vio firmemente establecido el fenómeno de la oscilación de neutrinos, ni el modo en que se usa hoy en día para medir las más sutiles características de esas entidades fantasmales. En la actualidad, dichos experimentos prometen mostrarnos cómo ha evolucionado el universo material hasta adquirir su forma presente, con la posibilidad real de que los neutrinos guarden el secreto de por qué hay un exceso de materia en el universo a gran escala. Las oscilaciones de neutrinos están bien confirmadas, y nos arrojan indicios de que hay nuevos fenómenos físicos esperando ser descubiertos, pero solo si hacemos experimentos a energías que no se han visto desde el *Big Bang*. El LHC del CERN empezará a revelar algunos de estos nuevos fenómenos a lo largo de la próxima

década. Sin embargo, sean cuales sean las sorpresas que nos aguardan, ninguno de los héroes principales de este relato estará ahí para construir sobre las nuevas visiones.

Bruno Pontecorvo «abrió los ojos a todos con sus originales inspiraciones»<sup>[82]</sup>. Pocos científicos han sido tan ricos en ideas de gran alcance sin que les llegara su parte del Premio Nobel.

## CREPÚSCULO

Esta ha sido la historia del Sol no menos que la del neutrino. Davis y Bahcall empezaron con la intención de que los neutrinos revelaran algo del Sol, pero, en cambio, el Sol reveló algo sobre los neutrinos. A lo largo de todo este relato, lo que la gente se propuso lograr no coincidió jamás con lo que iban a encontrarse.

En el siglo XIX, la cuestión de cómo brilla el Sol hizo que la geología y la evolución entraran rápidamente en conflicto. Los físicos teóricos más destacados de aquella época dieron una respuesta equivocada tras otra: sobre la fuente de energía del Sol, sobre la edad de la Tierra, y con respecto a las consecuencias que tendría en otras ramas de la ciencia. Lo hacían tan bien como podían, dados los conocimientos de que disponían entonces. Con los beneficios que nos da todo lo que sabemos ahora podemos decir, en retrospectiva, que el calor y la longevidad del Sol revelaron que hay más cosas en el Cielo y la Tierra de las que sospechaba su filosofía del siglo XIX.

Ni la llegada de la teoría de la relatividad especial de Einstein ni las mediciones muy precisas de las masas de los átomos de hidrógeno y helio tenían nada que ver con esta historia, o así se creyó al principio. No obstante, a mediados del siglo XX había quedado claro que desempeñaban un papel decisivo en la trama.

Dichos logros permitieron a los astrofísicos determinar cómo brillan las estrellas. Se pudo demostrar que las estrellas son reactores de fusión nuclear en el cielo, que las explosiones de supernovas dan lugar a estrellas de neutrones, y que la estrella más

próxima a nosotros, el Sol, obtiene la energía de la fusión del hidrógeno. Al principio, todo esto era mera teoría, basada en la observación remota y en los resultados de experimentos realizados en laboratorios del planeta Tierra. A finales del siglo XX, una vez se hubo establecido la existencia del neutrino, se hizo posible detectar neutrinos de las estrellas y averiguar directamente qué sucedía dentro de ellas. Bastó con una veintena de neutrinos de una supernova, repartidos a lo largo de unos cuantos segundos, y cuyas energías se midieron mediante destellos de luz en una cavidad subterránea, para demostrar que una supernova está mucho más caliente que el Sol, y que da lugar a una densa estrella de neutrones. Esto sucede tal como lo habían predicho los astrofísicos, y para mí es quizá la más extraordinaria sinergia<sup>[83]</sup> de toda la ciencia pura.

El Sol está lo bastante próximo como para que los neutrinos nos permitieran hacer mediciones muy precisas de lo más profundo de su núcleo. En este caso, los neutrinos volvieron a indicar que la teoría es correcta. Las energías reales de los neutrinos se ajustaban a las predicciones, igual que sus cantidades excepto por un factor de dos o tres. Dado que se habrían podido hallar neutrinos con valores cientos de veces mayores, o incluso no hallarse ninguno en absoluto, el hecho de que los resultados estuvieran tan cerca era extraordinario. En la actualidad, cuando las oscilaciones se toman en cuenta, el ajuste es muy bueno. Igual que había ocurrido con las mediciones de las masas de los átomos de hidrógeno y helio unas décadas antes, una vez más se hacía evidente la importancia de la precisión en las mediciones.

El resultado de décadas de investigación es que ahora estamos seguros de que las reacciones nucleares que producen neutrinos son las mismas que hacen que el Sol brille. Esto cierra el debate científico más amplio sobre la edad de la Tierra, y sobre el origen de la energía del Sol, que empezó con Darwin y lord Kelvin a mediados del siglo XIX. El hecho de que las cantidades se midieran con

suficiente precisión permitió revelar no solo el funcionamiento del Sol, sino también los inesperados misterios de los neutrinos.

La etapa de encontrarles explicaciones duró medio siglo. Ahora los neutrinos se están convirtiendo en instrumentos para la investigación cuantitativa de fenómenos cósmicos muy lejanos en el espacio y el tiempo. No solo nos permitirán ver en el interior de estrellas distantes, sino también que una nueva iniciativa está cerrando el círculo. La radiactividad natural de la Tierra ayudó a demostrar que su edad es de miles de millones de años, y no de millones, y menos aún de miles. Esa misma radiactividad libera neutrinos. Ahora, detectando esos «geoneutrinos», será posible mirar a gran profundidad en el interior del núcleo de nuestro propio planeta.

Nadie se imaginaba nada de esto cuando Becquerel descubrió la radiactividad, cuando Pauli postuló el neutrino, y ni siquiera cuando Reines y Cowan lo atraparon finalmente. La larga marcha para resolver el misterio de los neutrinos solares ha creado nuevas ramas de la ciencia: la astronomía de neutrinos y la geofísica de neutrinos. Y el hecho de que resulta que los neutrinos tienen masa, después de todo, nos está dando pistas sobre un reino de teorías físicas aún por descubrir.

La última palabra es para John Bahcall. Resume la historia de esta ciencia, y también podría aplicarse al mismo Bahcall y a Davis, a Cowan y a Reines, y, en el caso más doloroso, a Pontecorvo: «Si usted puede medir algo con suficiente precisión, tiene una posibilidad de descubrir algo importante. La historia de la astronomía demuestra que muy probablemente lo que usted descubra no será lo que estaba buscando». Luego añadió, con su típica modestia: «La suerte ayuda».



FRANCIS EDWIN CLOSE (Peterborough, Inglaterra, 1945), es físico de partículas y es profesor emérito de física en la Universidad de Oxford y miembro del Exeter College de Oxford. Pertenece a la Orden del Imperio Británico y tiene la beca del Instituto de Física — premio otorgado por el Instituto de Física para físicos que «indica un nivel muy alto de logros en física y una contribución sobresaliente a la profesión».

Es autor de obras de divulgación imprescindibles como *Neutrino o Fin: La catástrofe cósmica y el destino del universo*. Su obsesión con el vacío le ha llevado a escribir dos libros sobre el tema: *The Void* y *Nothing: A Very Short Introduction*, no traducidos al español. Además, publicó en el Reino Unido y Estados Unidos una biografía de Bruno Pontecorvo, científico nuclear italiano cuyos logros quedaron ensombrecidos por las sospechas de espionaje.

## Notas

[1] Citado en Pais, A., *Inward Bound*, Oxford, Oxford University Press, 1986. <<



[2] Debo hacer un inciso para mencionar a Oliver Lodge. Este produjo y detectó ondas electromagnéticas en 1888, antes que Hertz, pero en lugar de comunicarlo públicamente se fue de vacaciones. Hertz fue el primero en publicar resultados, y su nombre estará asociado para siempre a dichas ondas. En 1894, en la reunión de la British Association en Oxford, Lodge hizo una demostración de la transmisión de señales, nada más y nada menos que en código Morse, a lo largo de una distancia de cincuenta metros. Posteriormente admitió que no le había visto ninguna aplicación práctica al fenómeno, por lo que no acertó a darse cuenta del potencial de la comunicación inalámbrica. <<

[3] Esa historia se explica en mi libro *Lucifer's Legacy*, Oxford, Oxford University Press, 2000. <<

[4] Dmitri Ivanenko fue el primero en proponer la idea de que los electrones se crean en la desintegración beta, igual que los fotones se crean en las transiciones atómicas, por lo que no «preexistirían» en un átomo. <<

[5] En teoría, la física nuclear justifica el sueño de los alquimistas, es decir, la transformación de los elementos químicos, pues la composición del núcleo atómico determina las características químicas del átomo. No obstante, transformar cantidades significativas de metal en oro no resultaría viable hoy en día, y mucho menos rentable. (N. del t.) <<

[6] Véase mi libro *Antimatter* para una explicación de esto. Para leer un relato de la vida de Dirac, véase *The Strangest Man*, de G. Farmelo. <<

[7] La carta de Pauli y sus impresiones personales de esa historia pueden encontrarse en su artículo técnico aparecido en Winter, Klaus (ed.), *Neutrino Physics*, Cambridge University Press, 1989. <<

[8] Wolfgang Pauli, en Winter, Klaus (ed.), *Neutrino Physics*, Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology, 1989, p. 14, donde Pauli da las gracias a «la señora Meitner, por guardar una copia de esa carta y dejármela». <<

[9] Farmelo, G., *The Strangest Man*, p. 195. <<



[10] Pauli se dio cuenta de que la hipótesis de Bohr implicaría una distribución de Poisson, característica de efectos estadísticos. <<

[11] Citado por Laura Fermi en *Átomos en mi familia: Mi vida con Enrico Fermi*. Fermi tenía un don extraordinario tanto para la teoría como para la experimentación. Un ejemplo es lo que ocurrió cuando se hizo explotar la primera bomba atómica en el desierto de Nuevo México. Fermi, junto a otros de los más grandes científicos de la época, estaba escondido en un búnker a varios kilómetros de la deflagración. Mientras todos quedaban asombrados por lo que vieron, y se hacía famosa la referencia de Robert Oppenheimer al *Bhagavad Gita* («Ahora me he convertido en la muerte, la destructora de mundos»), Fermi echó unos pedazos de papel al aire, justo al pasar la onda expansiva. Esta los arrastró y, a partir de la distancia que recorrieron, Fermi calculó la potencia de la bomba. Su resultado no fue muy distinto del que dieron después los cálculos técnicos. <<

[12] Suele expresarse mediante la «constante de Fermi», que es aproximadamente una milésima por ciento en unidades del inverso del cuadrado de la masa del protón. <<

[13] Bethe, H. y R. Peierls, *Nature*, vol. 133, p. 532 (1934). Bethe y Fierz fueron los primeros en calcular la probabilidad a partir de la teoría de Fermi y hallaron un valor muy pequeño. Entonces Bethe y Peierls usaron principios generales para relacionar la probabilidad de la desintegración beta con la probabilidad de que un neutrino interaccionara con la materia. Sus resultados demostraron que depende de la energía pero que resulta siempre insignificante a las energías relevantes en los procesos de interés por aquel entonces.

<<

[14] No es relevante aquí, pero, por si acaso se lo está preguntando, esto es lo que estaba sucediendo. Resulta que los neutrones lentos tienen una probabilidad de interacción enormemente mayor que los rápidos. Si, de camino hacia el lugar donde se suponía que debían realizar su función, los neutrones de la fuente de Fermi se topaban con materia y se ralentizaban, esto incrementaba la radioactividad que causaban después. Los materiales con muchos átomos de hidrógeno, como el agua o la cera de parafina, son los más efectivos para frenar neutrones (una consecuencia de que los neutrones y los protones tengan la misma masa). Este truco de ralentizar los neutrones e incrementar su potencia se convirtió en una importante característica del funcionamiento de los reactores nucleares. <<

[15] Crane, R. H., *Reviews of Modern Physics*, 1948. <<

[16] Este es el principio en el que se basa el contador proporcional, el cual contiene un gas y es la versión moderna del contador Geiger.

<<

[17] La desintegración  $n \rightarrow pe^-$  implica una partícula de materia al principio y dos al final, de modo que para cuadrar las cuentas se requiere un antineutrino en los productos de la desintegración. <<



[18] La antimateria, en la realidad y en la ficción, es el tema de mi libro: Close, Frank, *Antimatter*, Oxford, 2009. <<

[19] Reines, F., discurso de aceptación del Premio Nobel. <<

[20] Dicho problema consistía en medir las propiedades del positronio, en el cual un electrón está unido a un positrón. Al tratarse de materia y antimateria, el electrón y el positrón se aniquilan de modo que el positronio dura menos de una millonésima de segundo. Véase Close, Frank, *Antimatter, op. cit.* <<

[21] Reines, F. y C. L. Cowan, Jr., *Physical Review*, vol. 90, p. 492 y vol. 92, p. 830 (1953). <<

[22] Tal como lo rememoró Fred Reines en su discurso de aceptación del Premio Nobel. <<

[<sup>23</sup>] Prentice, A., *Mon. Not. Royal Astronomical Society*, vol. 163, p. 331 (1973); Hoyle, F., *Astrophys. J. Letters*, vol. 197, p. L127; Clayton, D. et al., *Astrophys. J.*, vol. 201, p. 489 (1975). <<

[24] *Nature*, vol. 284, p. 507. <<

[25] Waterstone también había pensado en el colapso. El relato entero está en el libro de Gribbin, John, *Blinded by the Light* («Cegados por la luz»). <<



[26] Citado en Wilson, D., *Rutherford: Simple Genius*, p. 206, Londres, Hodder and Stoughton, 1983. <<

[27] Los dos principales isótopos del uranio, U-238 y U-235, tienen vidas medias de 4500 millones de años y 700 millones de años, respectivamente. <<

[28] Entre la idea de Eddington de 1920 y el trabajo de Bethe de 1939, el científico galés Robert Atkinson y el holandés Fritz Houtermans habían usado en 1929 las masas medidas de los elementos ligeros, junto a  $E = mc^2$ , y predicho que podían liberarse grandes cantidades de energía mediante la fusión de núcleos de elementos ligeros. <<

[29] Su artículo, publicado en 1939 en *Physical Review Letters* (vol. 55, p. 434), fue recibido por el editor en septiembre de 1938. Ese mismo año, el alemán Carl von Weizsäcker también había reparado, por su cuenta, en la posibilidad del ciclo CNO. <<

[30] Al haberse convertido uno de los protones en un neutrón, un positrón y un neutrino, como en la forma de desintegración beta descubierta por Joliot y descrita por la teoría de Fermi. <<

[31] En realidad, el antineutrino. <<

[32] Las energías de las partículas elementales suelen expresarse en electronvoltios, eV. Es la energía que ganaría un electrón al ser acelerado por una batería de un voltio. La cantidad de energía liberada en un átomo individual en una reacción química es habitualmente un poco menor. En los procesos nucleares se intercambian miles (keV) o millones (MeV) de electronvoltios. Un neutrino necesita por lo menos 860 keV para transformar un átomo de cloro y convertirlo en la forma radioactiva de argón que Davis podía detectar. Solo uno de cada diez mil neutrinos del Sol tiene esa cantidad de energía. <<

[33] Citado en Bahcall, J. N. y R. Davis, «The evolution of neutrino astronomy», en *Essays in Nuclear Astrophysics*, Cambridge University Press, 1982, pp. 243-285. <<



[34] Art McDonald, jefe de la colaboración SNO (véase el capítulo 9), usó esta analogía en una conferencia de prensa en 2001. <<

[35] Reines, F., *Ann. Rev. Nucl. Science*, vol. 10, p. 25. <<

[36] En el capítulo 7 veremos que en 1960 la interacción débil había empezado a adquirir un papel destacado en la física. <<

[37] Bahcall, J., *Physical Review*, vol. 126, p. 1143, 1962. <<

[38] Bahcall y Davis, 1982, *op. cit.* <<

[39] Citado por Bahcall y Davis, 1982, *op. cit.* <<

[40] Bahcall y Davis, 1982, *op. cit.* <<

[41] Bahcall y Davis, 1982, *op. cit.*, p. 10. <<



[42] De hecho, la teoría de Fermi se había refinado tras el descubrimiento de que la simetría especular, la «paridad», no se da en los procesos que implican la presencia de neutrinos, como se describe en el capítulo 7. En sus cálculos, Bahcall usó correctamente esta versión sofisticada de la teoría. <<

[43] Este resultado demostró ser consistente, porque en los siguientes veinte años, a medida que Bahcall y otros refinaban sus cálculos, las predicciones nunca cayeron fuera de ese intervalo. En 1980 había quedado establecido el mismo valor de 7,5 SNU, pero con la incertidumbre muy reducida, hasta 1,5 SNU (véase el capítulo 8). <<

[44] Bahcall, J., «Ray Davis: The Scientist and the Man», *Nuclear Physics*, vol. B (Proc. Suppl.) 48, pp. 281-283, 1996. <<

[45] A. Prentice, citado por Bahcall y Davis, 1982, *op. cit.* <<

[46] Pontecorvo, B., *Physical Review*, vol. 72, p. 246, 1947. <<

[47] La fuerza entre dos partículas debida a la gravedad es muy débil. El hecho de que la fuerza gravitatoria entre todos los átomos de un cuerpo grande se suma es lo que la hace dominante en la materia en grandes cantidades, tal como ocurre a la escala de las manzanas que caen o de las órbitas de los planetas. <<

[48] En caso de que tenga carga negativa. El muón con carga positiva produce un positrón. <<

[49] J. Steinberger, según comunicación personal. Esto difiere de su autobiografía en el sitio web de la Fundación Nobel, que habla de doce:

[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1988/steinberger-autobio.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1988/steinberger-autobio.html), tal como figuraba al acceder a ella el 28 de marzo de 2010. <<



[50] O, si lo hace, entonces lo hace tan raramente que resulta inobservable. Incluso hoy, en más de cien mil millones de desintegraciones de muones que se han registrado, no se ha hallado ni un solo caso de  $\mu \rightarrow e + \gamma$ . <<

[51] Esto quedó confirmado en 1983 cuando se descubrió el bosón W en el CERN. Dicha historia se explica en Close, Frank, Michael Marten y Christine Sutton, *The Particle Odissey*, Oxford, Oxford University Press, 2002, y Close, Frank, *Particle Physics: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2004. <<

[52] El relato entero está en Lederman, L. y D. Teresi, *The God Particle*, Houghton, 1993, pp. 256-273. <<

[53] M. Schwartz, explicando sus recuerdos en la ceremonia del Premio Nobel, 1988. <<

[54] Los recuerdos difieren al respecto. En su discurso de aceptación del Premio Nobel, Schwartz, de manera algo ambigua, relató: «Aquella tarde me vino la idea clave. Quizá [cantidades suficientes de] neutrinos podían producirse [para usarlos] en un experimento. Un rápido cálculo que cabía en el reverso de un sobre indicó la viabilidad de hacer esto en alguno u otro de los aceleradores que estaban siendo contruidos o planeados por aquel entonces. Llamé a T. D. Lee a su casa para darle la noticia [...] Al día siguiente, los planes para el experimento empezaron en serio». Lederman escribe lo siguiente en *The God Particle* (p. 290): «De algún modo, Schwartz se había convencido de que ningún acelerador existente era suficientemente poderoso para generar un haz de neutrinos lo bastante intenso, pero yo no estaba de acuerdo [...] Hice los cálculos y me convencí, y luego convencí a Schwartz, de que el experimento era, en realidad, factible». <<

[55] Danby, G. *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 9, p. 36, 1962. <<

[56] M. Schwartz, discurso de aceptación del Premio Nobel, 1988. <<

[57] Bahcall, J., *Physics Letters*, vol. 13, p. 332, 1964. <<



[58] Se trata de un juego de palabras intraducible, pues «Experimento de Galio Ruso-Estadounidense» en inglés sería *Russian American Gallium Experiment*, cuyo acrónimo es RAGE («furia»), un término poco oportuno dada la delicada situación política que se creó tras la desaparición de la Unión Soviética. En cambio, SAGE significa «sabio», que tiene connotaciones más positivas. (N. del t.) <<

[59] J. Bahcall, citado en la página web del programa de televisión *Nova* de la cadena PBS. Entrevista: «Hunting neutrinos» («Cazando neutrinos»), disponible en inglés en: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/physics/solar-neutrinos.html>. <<

[60] IMB hacía referencia a las universidades de Irvine (California) y de Michigan, además del Laboratorio Nacional de Brookhaven, las tres instituciones colaboradoras. Fred Reines era el participante más destacado de Irvine. <<

[61] Los Curie fueron los primeros en observar la radiación de Cerenkov, hacia principios del siglo XX, y el primero que la estudió fue el científico francés L. Mallet en 1926. Sin embargo, este no pudo identificar su naturaleza, así que la historia, y el comité del Premio Nobel, le otorgaron los honores a Cerenkov. <<

[62] Don Perkins, carta a FEC, 19 de mayo de 2009. <<

[63] Kamiokande significaba «Kamioka Nucleon Decay Experiment» («Experimento de Desintegración de Nucleones de Kamioka»). <<

[64] Entre las partículas resultantes iniciales hay varios piones,  $\pi$ , con una ligera mayoría de los que tienen carga positiva,  $\pi^+$ . Dicha carga es un «recuerdo» del núcleo con carga positiva que ha contribuido a su emisión. Cuando el  $\pi^+$  se desintegra, casi siempre produce un muón con carga positiva y un neutrino muónico. A su vez, el muón se desintegra y da lugar a un positrón, un neutrino electrónico y un antineutrino muónico. <<

[65] Por supuesto, en este último caso se trataría de un antielectrón o positrón. (*N. del t.*) <<



[66] Maki, Nakagawa y Sakata, *Prog. Theor. Phys.*, vol. 28, p. 870, 1962. <<

[67] Los neutrinos muónicos solo pueden convertirse en muones si tienen suficiente energía. Esto puede ocurrir en el caso de los neutrinos que producen los rayos cósmicos de alta energía, pero los del Sol tienen una energía demasiado pequeña. Por lo tanto, los neutrinos solares que se han metamorfoseado en la variedad muónica son invisibles a efectos prácticos. <<

[68] Por aquel entonces solo se conocían dos variedades. Su idea se generaliza de inmediato al caso de tres. <<

[69] Ahora se sabe que los neutrinos tienen una pequeña masa, por lo que en realidad viajaban algo por debajo de la velocidad de la luz, pero la diferencia es menospreciable. <<

[70] De hecho, eran antineutrinos. <<

[71] Como recordatorio,  $1 \text{ MeV} = \text{un millón de electronvoltios}$ , o aproximadamente una décima de billonésima de un julio (J). <<

[72] Téngase en cuenta que el texto de la edición original inglesa de este libro se escribió antes del desastre nuclear de Fukushima del 11 de marzo de 2011. Desde entonces, el uso de la energía nuclear en Japón se ha reducido de manera drástica. (*N. del t.*) <<

[73] Un electronvoltio, o eV, en realidad es una unidad de energía. En física, los términos «masa» y «energía» son intercambiables. Están relacionados por  $E = mc^2$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. <<



[74] Véase *Antimatter*, Oxford, Oxford University Press, 2009. <<

[75] Tal como lo relató F. Reines en el discurso de aceptación del Premio Nobel, en Ekspong, G. (ed.), *Nobel Lectures 1991-1995*, Singapur, World Scientific, 1997, p. 251. <<

[76] Los detalles están en *Lucifer's Legacy*, op. cit. <<

[77] F. Reines, discurso de aceptación del Premio Nobel, [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1995/reines-lecture.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1995/reines-lecture.html). <<

[78] La «desaparición» de los neutrinos muónicos podía deberse a desintegraciones o a que se transformaban, u oscilaban. Para hallar indicios claros de esto último sería necesario detectar aquello en lo que se hubieran transformado. Una pérdida de intensidad del flujo de neutrinos podía deberse a cualquiera de esas dos posibilidades, pero ambas requerían que el neutrino muónico tuviera masa. <<

[79] Basado en una carta de Don Perkins al autor, del 19 de mayo de 2009. <<

[80] Véase la historia de Schwartz, Steinberger y Lederman en el capítulo 7. <<

[81] Robertson, Hamish, *Proceedings of International Conference on High Energy Physics, Dallas, 1992*, American Institute of Physics, 1993. <<



[82] Bahcall y Davis, 1982, *op. cit.* <<

[83] Según el diccionario de la RAE, *sinergia* es la «acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales». Recuérdese que si la observación de la supernova hubiera sido anterior a la puesta en marcha de los detectores IMB y Kamiokande, en lugar de unos pocos meses posterior, entonces ni esa observación astronómica fortuita ni los nuevos detectores habrían ejercido un impacto tan inmediato e importante en la ciencia. El autor también puede referirse al hecho de que, con la detección de los neutrinos de la supernova, la física experimental, la física de partículas y la astrofísica quedaban mutua y simultáneamente fortalecidas, en un destacable ejemplo de la unidad de la ciencia. (N. del t.) <<