

Introducción

Estamos rodeados de partículas. No nos referimos solo a las partículas elementales que, como si fueran la pieza más pequeña de una *matrioska* rusa, son la base de los átomos, moléculas, tejidos y órganos que forman nuestros cuerpos. También estamos expuestos a la radiactividad ambiental, es decir, a partículas que proceden de la Tierra, del aire, del espacio, de los materiales de los edificios o, incluso, de la comida que ingerimos.

A la gran mayoría de las personas les asusta la sola mención de la palabra radiactividad, asociada frecuentemente a lugares como Chernóbil o Fukushima. Sobre todo porque nuestros sentidos no son sensibles a la radiación, entendida como el conjunto de las partículas elementales que nos rodea. En realidad, sí podemos ver las partículas llamadas fotones que constituyen el campo electromagnético, pero solo si estos poseen una energía comprendida en el rango de luz conocido como visible, que coincide con los colores del arcoíris. Las *otras* partículas de la radiactividad ambiental, como por ejemplo electrones, muones, protones, neutrones o núcleos de helio, pueden atravesarnos o ser absorbidas por nuestro cuerpo sin darnos cuenta. Podemos decir que los seres vivos estamos acostumbrados a esta radiación ambiental, que no desempeña un papel directo en nuestra existencia diaria,

aunque a lo largo de la historia de la Tierra la radiactividad natural sí que ha influido en la evolución de la vida y, quizás, en su mismo origen.

El Sol es la principal fuente de radiación que llega a la Tierra y emite la mayor parte de las partículas con las energías más bajas. La radiación a energías mayores no tiene un origen plenamente establecido, aunque se cree que proviene de fuentes astrofísicas lejanas como las explosiones de estrellas muy masivas conocidas como supernovas. A las partículas o núcleos atómicos que provienen del espacio exterior se los conoce como rayos cósmicos primarios. Cuando alcanzan la atmósfera terrestre, chocan con sus componentes (es decir, interaccionan) y producen una lluvia o cascada de partículas secundarias cuyo desarrollo llega a la superficie. Y así, sin percibirlo, una persona es atravesada por unos 100.000 rayos cósmicos cada hora. El número exacto depende de varios factores, entre ellos, de la altura a la que estemos o de si nos encontramos en el exterior o dentro de un edificio. Por tanto, nos alcanzarán muchos más rayos cósmicos secundarios si estamos en la cima de una montaña o volamos en un avión que si nos encontramos visitando el interior de una mina.

Es muy posible que nos sorprenda el elevado número de rayos cósmicos que continuamente nos atraviesan. Sin embargo, es bastante fácil *ver* esta radiación si disponemos del detector adecuado. En muchos museos de ciencia e institutos de investigación existe un aparato conocido como cámara de niebla que nos permite distinguir las trazas, es decir, por dónde están pasando rayos cósmicos y otras partículas de la radiactividad ambiental como las que hemos mencionado. Pero existe otro tipo de partículas más misteriosas que jamás podremos ver en una cámara de niebla y cuyo número es infinitamente mayor al de los rayos cósmicos. Esas partículas elementales, que ahora conocemos como neutrinos, son las protagonistas de este libro.

Repasemos algunos números relacionados con los neutrinos. Una persona es atravesada cada segundo por unos 600 billones (600 millones de millones) de neutrinos del

Sol, del orden de 50.000 millones de neutrinos creados por la radiactividad natural y unos 10.000 millones de neutrinos originados en reactores nucleares, dependiendo de la distancia a la que se encuentre de la correspondiente central. Los neutrinos también forman parte de las lluvias de partículas secundarias originadas por los rayos cósmicos, por lo que debemos sumar algunos miles a los números anteriores. Además, el volumen medio que ocupa una persona está siendo atravesado, en cada instante, por unos 20 millones de neutrinos remanentes de los primeros instantes del universo de acuerdo a las predicciones de la teoría del Big Bang.

Si todavía existe algún lector que no se sienta sorprendido por todas estas cifras, podemos añadir que nosotros mismos somos fuentes de neutrinos. Nuestro cuerpo está formado por átomos de distintos elementos químicos, de los cuales, el oxígeno y el carbono son los más abundantes. Uno de ellos es el potasio, que desempeña un papel importante en varias funciones en nuestro organismo, como por ejemplo en la transmisión de los impulsos nerviosos. El potasio se presenta en la naturaleza bajo tres tipos, siendo uno de ellos radiactivo: el potasio-40 (^{40}K). A pesar de ser solo del orden del 0,01% del potasio en la naturaleza y de que su vida media supera los 1.000 millones de años, cada segundo se desintegran 4.000 núcleos de potasio-40 de nuestro cuerpo, emitiendo un neutrino en cada uno de esos procesos.

Estas cifras nos llevan a una única conclusión: por todas partes hay muchísimos neutrinos. Sin embargo, su existencia se predijo hace solo unos 80 años y fueron detectados hace menos de 60. ¿Cómo es posible que siendo tan abundantes hayan pasado desapercibidos? Como comprobaremos en este libro, los neutrinos son unas partículas muy curiosas. Carecen de carga eléctrica y no forman parte de la llamada materia ordinaria, constituida por átomos que a su vez están formados por electrones, protones y neutrones. Los neutrinos prácticamente no se *hablan* con la materia ordinaria, es decir, interaccionan muy poco con las partículas que la forman, por

lo que se han ganado, con mucha razón, el calificativo de partículas fantasma.

¿Por qué nos interesa estudiar los neutrinos y sus propiedades? La respuesta que daría un físico es clara: unas partículas tan singulares pueden ofrecernos información sobre las leyes fundamentales de la naturaleza y la evolución del universo. Además, los neutrinos actúan como mensajeros de fuentes astrofísicas lejanas, complementando nuestra visión del cosmos basada en la detección de luz. ¿Por qué son tan importantes para todo el mundo? Entre otras cosas, porque los neutrinos son actores principales en los procesos nucleares que hacen brillar las estrellas y permiten la existencia de átomos más complejos que el hidrógeno.

En cualquier caso, para obtener información sobre sus propiedades, debemos detectarlos. Se trata de un objetivo complicado, pues la extrema debilidad de su interacción hace que sea muy difícil medirlos y estudiarlos. Por esta razón, la receta de la física experimental de neutrinos incluye los siguientes ingredientes: fuentes de neutrinos muy intensas, poco ruido ambiental (laboratorios subterráneos), grandes detectores y... mucha paciencia, ya que, incluso cuando finalmente se detectan, lo habitual es que se trate de pocas veces al año.

Sin embargo, gracias al ingenio y al esfuerzo de los científicos, en las últimas décadas hemos podido medir la huella que estas escurridizas partículas dejan en experimentos muy diversos. Los correspondientes datos experimentales nos han permitido conocer muchas de las propiedades de los neutrinos. Algunas de sus características han resultado ser completamente inesperadas, y su encaje dentro de la física de partículas es uno de los temas más candentes para los teóricos.

En este libro repasaremos los principales hitos de la historia del neutrino, desde su predicción y primera detección hasta los resultados experimentales de las últimas dos décadas, la llamada edad de oro de la física de neutrinos. Mostraremos su papel como sondas en escenarios astrofísicos y cosmológicos o como mensajeros de nueva física a escalas de altísima

energía; pero, sobre todo, pretendemos describir los experimentos de detección de neutrinos procedentes del Sol, de una supernova, de la radiación cósmica, de reactores nucleares o incluso de las capas internas de la Tierra. En muchos de estos experimentos, situados en lugares tan poco convencionales como el fondo del mar o en laboratorios subterráneos bajo kilómetros de roca, desempeñan un importante papel grupos de investigación de instituciones españolas.

La apasionante historia de la física de neutrinos es la suma de las contribuciones de una larga lista de físicos, experimentales y teóricos, que en muchos casos se han encontrado en situaciones curiosas. El lector que se anime a descubrirlas conseguirá encontrar la relación que existe entre el neutrino y un baile en Zúrich en 1930, una mina de oro en Dakota del Sur, el plomo recuperado de un barco romano hundido o la base Amundsen-Scott en el polo Sur geográfico.