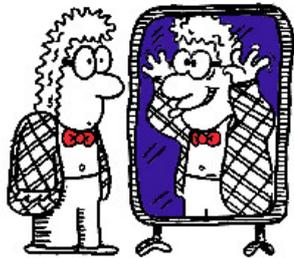


Los neutrinos se miran al espejo



Al principio, la tierra no estaba informe y vacía: ni siquiera existía. Tampoco los átomos que hoy la forman, y ni siquiera las partículas elementales que los forman a ellos. Al principio, tan al principio como somos capaces de ver en cualquier caso, el espacio se expandió enormemente y una multitud de partículas y antipartículas aparecieron. De todas ellas, contra lo que esperaríamos inocentemente, quedó un resto de partículas. Hoy, gracias a T2K, entendemos mejor cómo pudo ser.

ESTE verano ha habido un anuncio espectacular sobre neutrinos. ¿Te habías enterado?

La noticia ha pasado con cierto sigilo fuera del campo de física de partículas, pero es algo que estoy seguro de que la mayoría disfrutará al saber. Más que por ser una pieza clave de un puzzle que se empezó a resolver recientemente, porque tiene implicaciones bastante grandes. Tan grandes como el que existamos.

Se ha visto que partículas y antipartículas definitivamente no son unas imágenes especulares de las otras. El anuncio fue del experimento de neutrinos T2K (*Tokai to Kamio-ka*), y lo que han visto son indicios de que los neutrinos *violan la simetría CP* (simetría de carga y paridad). Y eso, junto a lo que sabemos del Big Bang, tiene que ver con que exista materia... toda la materia que hay, incluyendo nosotros mismos.

¿Recuerdas cómo funcionaba el tema de simetrías, neutrinos, partículas, antipartículas y todo eso? ¿Dices que podríamos hacer un repaso rápido? ¡Venga!

Componentes de la materia

Toda la materia ordinaria, de la que estamos hechos nosotros, nuestro planeta, el sol y demás, está compuesta de solo cuatro partículas. Cuando empiezas a dividir cualquier trozo de materia, acabas llegando a que está formado por átomos, y éstos a su vez por un núcleo con protones y neutrones, y electrones a su alrededor. Hasta aquí es la parte que casi todos sabemos.

El electrón es una partícula fundamental, es decir, no está compuesta por ninguna otra. No puedes coger un electrón y ver de qué está hecho por dentro: hasta donde sabemos por nuestras teorías y también experimentalmente, el electrón no está hecho de nada más. Pero los protones y neutrones sí lo están. Están hechos de dos partículas, que los físicos llaman con los nombres bastante arbitrarios de "up" y "down". Dos quarks up, de carga $+1/3$ la del protón cada uno, y un quark down, de carga $-1/3$, forman un protón. Un up y dos down, el neutrón. Los quarks, a su vez, no están formados por otras partículas. Al igual que el electrón, son partículas fundamentales.

En cierto modo, los quarks up y down forman una familia. Están relacionados entre sí, tienen masas pa-

recidas, sufren el mismo tipo de interacciones. De hecho, de no ser por su carga, serían básicamente la misma partícula. El electrón, por otro lado, es muy distinto a ellos. Pero para él también existe una partícula con la que forma una familia de modo parecido a como los quarks entre sí: el neutrino.

El neutrino, la cuarta de las partículas fundamentales, es como un electrón sin carga eléctrica (igual el nombre te había hecho sospechar). Eso hace que no interactúe con otras partículas electromagnéticamente. Pero además de electromagnéticamente, tiene la costumbre de casi no interactuar con nadie de ninguna forma. Una vez se crea un neutrino, como ocurre en ciertos procesos nucleares (por ejemplo cuando un neutrón se desintegra en protón y electrón), es muy difícil que algo lo pare. Sigue y sigue en la dirección que tenía inicialmente, sin importarle qué atraviesa.

Así que no encontramos a los neutrinos quietos por los átomos. De hecho, en general es muy difícil encontrarlos en ningún sitio, aunque estén ahí.

Ya hemos refrescado lo de las partículas. ¿Dónde entra lo de las simetrías?



En el experimento T2K se crea un haz de neutrinos y antineutrinos con el acelerador de protones J-PARC en Tokai, y se dirige al detector Super-Kamiokande a 295 km de distancia, en Kamioka.

Simetrías en la Naturaleza

El mundo, mirado a nivel microscópico, *en principio* se porta igual si cambias algunas cosas, por ejemplo, si cambias la dirección del tiempo. A nivel de partículas fundamentales, no hay forma de distinguir si estás viendo un vídeo hacia delante o hacia atrás. También, si cambias partículas por antipartículas¹ y viceversa, las leyes de la física son las mismas. Por ejemplo, en un átomo de hidrógeno tienes un protón y un electrón dando vueltas. ¿Y un “antihidrógeno”? Coges un antiprotón y un positrón dándole vueltas. ... ¿el positrón se moverá igual que el electrón antes? ¿Tendrá los mismos niveles de energía disponibles? Si llega un fotón² y lo absorbe o emite otro, ¿lo hará de la misma forma que ocurre con el átomo de hidrógeno?

Antes se creía que siempre era así. Que si cambiabas todas las partículas por antipartículas y viceversa, todo se comportaba igual. Este cambio se llama *conjugación de carga* (C). Y la sorpresa fue monumental cuando en los años 50 descubrieron que no es cierto, que la Naturaleza no se comporta

de forma simétrica para unas y otras, o en el lenguaje de los físicos, que “la simetría C está rota”³.

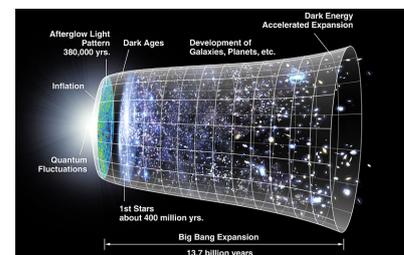
En cierto modo, los físicos se recuperaron del susto poco después. Se dieron cuenta⁴ de que si, además de cambiar partículas por antipartículas (C) también se cambiaba el sentido en que todo giraba (cambio de *paridad*, P), como si se viera en un espejo, entonces sí que se portaban igual. Hasta donde se veía, materia y antimateria se comportaban de forma simétrica.

¿O no? En la década siguiente, fijándose en datos que ya existían del comportamiento de cierta partícula formada por quarks (el kaón⁵), descubrieron algo curioso. Haciendo los dos cambios a la vez (C y P), aún quedaba una pequeña diferencia. Para sorpresa de los físicos, de nuevo, ni siquiera la simetría CP era respetada por la Naturaleza.

Génesis (de la materia)

¿Y por qué es relevante todo esto de las simetrías? Entre otras cosas,

porque si la materia y la antimateria se comportan de forma exactamente simétrica, es difícil entender cómo estamos aquí. Porque en el Big Bang se creó igual cantidad de materia y antimateria, pero nuestro universo claramente está formado casi en exclusivo de materia. Si la Naturaleza se comporta así de simétricamente, tendría que haber la misma cantidad de antimateria en algún lado. No la hay. Y ya imaginarás que para esto viene muy bien que esa simetría, la simetría CP, no sea perfecta.



Del Big Bang a nuestros días. En los primeros momentos tenemos el puzzle sobre cómo se creó la materia.

Gracias al kaón ya sabemos que en los quarks esa simetría no se cum-

¹Toda partícula tiene una partícula con propiedades idénticas pero con la carga opuesta, una “antipartícula”. Con la misma masa, misma forma de interaccionar con otras partículas, pero siempre con la carga opuesta (eléctrica y de otros tipos). El primero que se dio cuenta de esto fue Dirac en los años 20 por razones teóricas, y desde entonces se ha visto que acertó: para todas las partículas conocidas se han encontrado experimentalmente también sus antipartículas.

²La partícula de la luz. De hecho, todos los fenómenos electromagnéticos, incluida la emisión y absorción de la luz, se pueden explicar como el intercambio de fotones.

³Más precisamente, vieron que la simetría de paridad está rota, lo que supone que la de conjugación de carga también. El descubrimiento les valió el Nobel de Física en 1957 a los teóricos Lee y Yang que lo predijeron, pero injustamente no a la experimental Wu que lo descubrió.

⁴El mérito fue del físico Lev Landau, en el mismo 1957.

⁵El kaón es una partícula compuesta de un quark y un antiquark, con una historia fascinante que merece un artículo propio. Por supuesto hay un Nobel asociado: Cronin y Fitch en 1980.

ple, pero la cantidad en la que no se cumple es muy pequeña. Tan pequeña que no parecen salir las cuentas de cómo hay la materia que hay.

Si los quarks no lo solucionan, ¿queda alguna forma? Básicamente sólo una más.

Neutrinos al rescate.

Física experimental de neutrinos

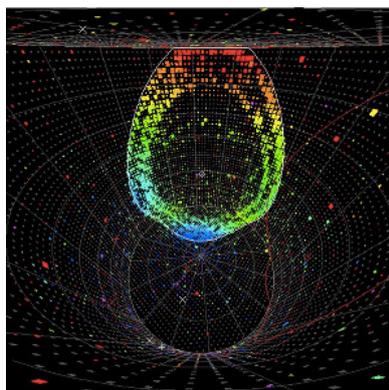
Lo poco que interaccionan los neutrinos, a diferencia de los quarks y los electrones, hace que experimentar con ellos sea extremadamente difícil.

De la misma forma en que se estudió cómo ocurría la violación CP en los quarks, se ha intentado estudiar también con los neutrinos. La dificultad de trabajar con ellos ha hecho que hasta el día de hoy no se haya visto más que una pequeña parte. No por falta de interés: desde los años 50 hasta la actualidad toda una saga de experimentos han ido resolviendo piezas del puzzle.

Entra en escena T2K.

T2K es un experimento que se encuentra en Japón y donde se producen haces de neutrinos y antineutrinos, que recorren unos 300 km hasta ser detectados. Al hacerlo, se estu-

dia un fenómeno que tiene probabilidades distintas para neutrinos y anti-neutrinos si existe violación CP.⁶



Neutrino interaccionando en T2K. De imágenes como ésta se reconstruye su comportamiento.

Es el experimento que el agosto pasado nos dio una gran alegría. Vio lo que muchos sospechaban, pero nadie sabía a ciencia cierta. **Los neutrinos violan CP.**

Antes de descorchar las botellas, hay que ser cautelosos. Los datos de los que dispone T2K no son suficientes como para que se considere un *descubrimiento* en física. Para eso haría falta estar seguros a “ 5σ ”, o sea, que el resultado sólo pueda ser debido al azar en una de cada 10 millones de veces. De momento, lo que han visto es algo menor, un indicio

emocionante a “ 2σ ”, esto es, con sólo un 5% de probabilidad de deberse al azar. Para confirmarlo, T2K seguirá funcionando y tomando datos durante los próximos años. Y muchos esperamos con los dedos cruzados.

Además de emocionante, T2K es un experimento que nos toca de cerca. En él participan más de 400 físicos de 59 instituciones pertenecientes a 11 países, entre los que se incluye España con los grupos del IFIC en Valencia, del IFAE en Barcelona, y recientemente de la UAM en Madrid, y que ha recibido también el apoyo del CPAN. Ha sido objeto de numerosas tesis y ocupado a buena parte de investigadores españoles.⁷

Desde luego seguiremos atentos a lo próximo que vea T2K.

Epílogo

Después de esta breve inmersión por la física de partículas y astrofísica quizá compartamos la ilusión por esta noticia, sencilla y profunda a la vez.

Hoy celebramos que, cuando los neutrinos se miran al espejo, les devuelve la mirada una imagen ligeramente distorsionada.

Una ligera distorsión que es clave para que estemos aquí.

⁶El fenómeno es el de las llamadas *oscilaciones de neutrinos*, un tema apasionante por mérito propio.

⁷El autor no está libre de culpa.