

# La masa de los neutrinos y la asimetría materia-antimateria del universo

*Conferencia pronunciada con motivo de la concesión a*

**Alejandro Ibarra Sixto**

*del Premio Jóvenes Investigadores de la Región de Murcia 2004  
convocado por la Fundación Séneca - Agencia Regional de Ciencia y Tecnología*





**Alejandro Ibarra Sixto**

LA MASA DE LOS NEUTRINOS Y LA  
ASIMETRÍA MATERIA-ANTIMATERIA  
DEL UNIVERSO

LA MASA DE LOS NEUTRINOS Y LA ASIMETRÍA  
MATERIA-ANTIMATERIA DEL UNIVERSO.

© Alejandro Ibarra Sixto

© Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia

Edición realizada para la Fundación Séneca

por *QUADERNA EDITORIAL*

Tel. 968 343 050 - [quaderna@quaderna.es](mailto:quaderna@quaderna.es)

Impreso en España. Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción total o parcial sin permiso expreso  
y por escrito de los titulares del Copyright.

## ÍNDICE

Índice.....	5
Introducción.....	7
¿De qué estamos hechos? .....	11
Los ingredientes para crear un Universo con bariones.....	21
Las masas de los neutrinos .....	27
Leptogénesis.....	31



## INTRODUCCIÓN

En este año 2005 conmemoramos el centenario del *anno mirabilis* de Albert Einstein. Ese año, Einstein propuso su teoría especial de la relatividad, dio una descripción al efecto fotoeléctrico en término de los cuantos de energía de Planck (trabajo por el que se le otorgó el Premio Nobel de Física en 1921) y explicó el movimiento aleatorio de las partículas en un fluido, el movimiento browniano, empleando la por aquel entonces controvertida teoría cinética. Estas tres cruciales contribuciones revolucionaron nuestra concepción del mundo y sentaron la base de la física moderna.

Los cien años transcurridos desde entonces han sido extremadamente proliferos en descubrimientos científicos, especialmente en física. Los libros de física con los que estudió Einstein fueron muy diferentes a los que cualquier estudiante universitario utilizaría hoy. Cuando Einstein asistía a la Universidad, la única partícula elemental conocida era el electrón (el protón no se descubrió hasta 1919, y el neutrón hasta 1932), las únicas fuerzas fundamentales conocidas eran la fuerza electromagnética y la gravedad, y ni siquiera se conocía la realidad de las galaxias, que en aquella época se denominaban “nebulosas espirales” y se pensaba que eran nubes de gas en el interior de la Vía Láctea.

En la actualidad sabemos que ni el protón ni el neutrón son partículas elementales, sino que están compuestos por unos entes más fundamentales denominados “quarks”. Por el contrario, los experimentos realizados hasta la fecha no han detectado ningún tipo de estructura dentro de los electrones, por lo que nos inclinamos a pensar que el electrón es en efecto una partícula elemental. En total, hoy conocemos la existencia de 45 partículas elementales como el electrón o los quarks, además de un incontable número de partículas compuestas, entre las que se incluyen el protón y el neutrón. Por otro lado, aparte de la fuerza electromagnética y la gravitatoria, hoy conocemos la existencia de otras

dos interacciones fundamentales: la fuerza nuclear débil, responsable de la desintegración radiactiva de los núcleos, y la fuerza nuclear fuerte, responsable de que los quarks constituyentes del protón se mantengan unidos. En astrofísica y cosmología los avances también han sido espectaculares. Hoy conocemos millones y millones de galaxias, y hemos sido capaces de determinar que el Universo es un lugar tremendamente grande, con un radio de trece mil millones de años luz o  $10^{24}$  km (¡un uno seguido de veinticuatro ceros!). Además, sabemos con toda certeza que el Universo se está expandiendo, e incluso tenemos indicios muy sólidos de que el Universo no sólo se está expandiendo, sino de que esta expansión es cada vez más rápida.

En este siglo de la física se han logrado tremendos avances científicos, aunque el número de nuevos interrogantes abiertos es también enorme. El filósofo Blaise Pascal describía muy acertadamente el conocimiento como una gran esfera: cuanto mayor es nuestro conocimiento, más puntos de contacto existen con lo desconocido. Hoy los físicos tratamos de responder cuestiones que hace cien años nadie habría planteado, bien por requerir un conocimiento previo del que se carecía, o bien por ser tan sencillas que habían pasado por alto incluso a las mentes más brillantes. Cuestiones sencillas, pero al mismo tiempo profundas y fundamentales. Cuestiones tan fundamentales que era difícil imaginar que su estudio podría abordarse empleando el método científico. Por ejemplo, el concepto de masa ha sido manejado por los físicos durante cientos de años. Todos los objetos tienen una propiedad llamada masa, que según nos enseñó Newton mide la resistencia de ese objeto a cambiar su velocidad. Sin embargo, nadie se planteó por qué los cuerpos tenían masa. Todos los cuerpos tienen una masa, y punto. Hoy sin embargo discutimos este tipo de preguntas, y lo que es incluso más fascinante, podríamos estar próximos a alcanzar una respuesta. Con ese fin, se está construyendo un acelerador de partículas llamado Large Hadron Collider (LHC) en el CERN, cerca de Ginebra (Suiza), cuya construcción finalizará en el año 2007. Este acelerador ha sido diseñado fundamentalmente para la búsqueda de una partícula, denominada la partícula de Higgs, que podría ser la clave para desentrañar el misterio del origen de la masa. No cabe duda de que su detección constituiría un tremendo éxito del ingenio humano.

Sigamos con las preguntas sencillas. ¿Por qué existimos? Esta pregunta ha mantenido ocupados a filósofos y teólogos desde los albores de la historia. Sin embargo, desde hace unas pocas décadas es posible abordar esta pregunta

desde un punto de vista científico. Por supuesto, estamos aún muy lejos de dar una respuesta definitiva a esta pregunta, y cuestiones como “para qué existimos” son desde luego terreno exclusivo de filósofos y teólogos. La manera como el científico aborda la cuestión de nuestra existencia es indirecta: si nuestras teorías físicas pretenden describir la naturaleza, tienen que poder describir el hecho irrefutable de que existimos. O viceversa, si una teoría física no permite nuestra propia existencia, no puede ser correcta. Pues bien, la mejor teoría de la naturaleza de la que disponemos en la actualidad pertenece a esta última clase: no permite nuestra existencia.

A lo largo de esta conferencia expondré cuáles son las razones por las cuales nuestra propia existencia es un gran misterio para la física, y cómo experimentos recientes en física de partículas podrían arrojar algo de luz sobre este misterio.



## ¿DE QUÉ ESTAMOS HECHOS?

La naturaleza es extremadamente compleja y al mismo tiempo extremadamente sencilla. ¿Cómo es esto posible? Fíjense atentamente a su alrededor. Verán personas con aspectos muy diferentes, hombres y mujeres, de diferentes estaturas y complejiones físicas. Ahora fíjense muchísimo más atentamente, cien mil veces más atentamente. Observarán que todos estamos formados por células que si bien a primera vista parecen muy similares, son todavía muy diferentes de persona a persona. La diferencia la encontrarán fijándose, unas diez veces más atentamente, en el núcleo de la célula. Ahí encontrarán el ADN, el carnet de identidad expedido por la naturaleza. Descubrirán que todos nuestros ADNs están formados por únicamente cuatro bases químicas, adenina, citosina, guanina y timina, en una secuencia que es diferente en cada uno de nosotros. Si el carnet de identidad que nos expide la policía consta de una secuencia de ocho números, el carnet de identidad que nos expide la naturaleza consta de una secuencia de millones y millones de estas cuatro moléculas. El mío es ATC CCC GGG... Es asombroso: seis mil millones de habitantes en el planeta, y toda esta variedad se limita a combinar de manera diferente estas cuatro moléculas.

En física de partículas llevamos esta filosofía reduccionista al límite. Buscamos las estructuras más fundamentales y sencillas de la naturaleza, con la esperanza de poder explicar toda la complejidad que observamos a nuestro alrededor. Sigamos con la búsqueda de las estructuras fundamentales donde la dejamos, en el ADN. Las moléculas que constituyen el ADN están formadas por átomos, fundamentalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. En nuestro cuerpo también encontramos otros átomos, como hierro, fósforo o calcio. En total se conocen 118 átomos, de los cuales sólo 92 se encuentran en la naturaleza; el resto son productos de laboratorio. Todo lo que vemos a nues-

tro alrededor, los árboles, las rocas, nosotros mismos o el propio Sol, está formado por combinaciones de únicamente estos 92 átomos.

Si bien la hipótesis atómica remonta hasta los griegos, es justo atribuir el descubrimiento de los átomos y de la teoría atómica moderna a John Dalton. Tras estudiar las propiedades físicas de los gases, Dalton publicó en 1803 su revolucionario trabajo según el cual la materia está compuesta de átomos de diferentes masas que se combinan en proporciones sencillas para formar compuestos. A lo largo del siglo XIX, y a medida que nuevos átomos eran descubiertos, los químicos se percataron de que algunos de estos átomos tenían propiedades similares. Dicha característica puede ilustrarse ordenando los diferentes átomos en una tabla y asignando a cada uno de ellos un número, denominado número atómico. Esta clasificación, propuesta por el químico ruso Dmitri Mendeleiev, es la conocida tabla periódica de los elementos que hoy cuelga de las aulas de los institutos de educación secundaria y las facultades de ciencias. El significado de esta tabla es mucho más profundo que una mera clasificación de los átomos. De hecho, con la física del siglo XIX era imposible entender por qué los elementos podían disponerse en una tabla, o por qué había regularidades en ella. Únicamente tras la aparición de la teoría cuántica se pudo responder a estas preguntas.

Pero sigamos con nuestra búsqueda de las entidades más fundamentales de la naturaleza. Dalton pensaba que los átomos eran sólidos, como si fueran bolas, aunque admitía la posibilidad de que poseyeran estructura interna. Durante muchos años no fue posible dirimir esta cuestión aunque fue objeto de un vivo debate; desafortunadamente se carecía de evidencias experimentales en un sentido u otro. La cuestión quedó zanjada en 1897 cuando Joseph Thomson anunció el descubrimiento del electrón (que él llamó corpúsculo), fruto de sus experimentos con rayos catódicos. Estos electrones debían existir dentro de los átomos, aunque se desconocía de qué manera. El propio Thomson trató de incorporar el electrón a la teoría atómica postulando en 1904 que el átomo consistía en un número de corpúsculos (electrones) moviéndose en el interior de una esfera con carga positiva uniforme. Es el denominado “modelo del pastel de pasas”.

Para comprobar esta hipótesis, bastante razonable por otro lado, Ernest Rutherford realizó en 1911 un experimento que hoy se considera como uno de los experimentos claves de la historia de la física. Bombardeó una fina lámina de oro con rayos alfa (núcleos de helio), esperando que estos rayos atravesaran la

lámina sin apenas desviarse. Para su asombro obtuvo un resultado de lo más inesperado: observó que la mayoría de las veces los rayos alfa atravesaban la lámina, pero unas pocas veces los rayos alfa rebotaban. En palabras de Rutherford, “es tan sorprendente como si bombardearas con bolas de cañón una hoja de papel y éstas rebotaran hacia ti”. Rutherford había descubierto el núcleo atómico, nuestra siguiente parada en la búsqueda de los entes fundamentales de la naturaleza. Si en el átomo de Thomson la masa y la carga positiva estaban distribuidas uniformemente en una esfera, en el átomo de Rutherford la mayor parte de la masa y toda la carga positiva estaban concentradas en una región mil veces menor que el propio átomo, el núcleo atómico. Alrededor de este núcleo cargado positivamente giraban los electrones cargados negativamente, de manera que el estado eléctrico normal del átomo fuera neutro.

Las contribuciones de Rutherford a la física no terminaron ahí. En 1919, bombardeó nitrógeno gaseoso con partículas alfa, y observó la conversión de algunos de los átomos de nitrógeno en átomos de oxígeno, viniendo esta conversión acompañada por la emisión de una partícula cargada positivamente. Esta partícula se conoce en la actualidad con el nombre de protón. Posteriores investigaciones demostraron que los núcleos de todos los átomos contienen protones, y a pesar del tremendo éxito científico que esto supuso, pronto se comprendió que en el núcleo debía de existir algo más. Con la excepción del hidrógeno, todos los átomos tienen una masa mayor de la que uno se esperaría si el núcleo estuviera compuesto únicamente de protones. Rutherford pensaba que el núcleo consistía en protones y unos “pares neutros”, formados por protones y electrones muy ligados entre sí. No obstante, la explicación correcta a este misterio no llegó hasta 1932, de la mano de James Chadwick, con el descubrimiento del neutrón. La imagen del átomo quedó entonces bastante bien definida: el átomo estaba constituido por un núcleo muy denso formado por protones y neutrones, rodeado de una serie de electrones. Esta imagen, junto a la recién formulada teoría cuántica, explicaba con una asombrosa precisión una gran variedad de experimentos en física atómica y física nuclear. De hecho, todos los experimentos excepto uno.

En esos años treinta otro gran enigma atormentaba a algunas de las mentes más brillantes en física: el espectro continuo de rayos beta en las desintegraciones radiactivas. Algunos núcleos atómicos sufren desintegraciones radiactivas, emitiendo radiación beta (electrones, en la terminología moderna). En un experimento clave desarrollado por Lise Meitner y Otto Hahn en 1911, se obser-

vó que los electrones emitidos tenían energías comprendidas entre 0 y 0.65MeV\*. Este resultado experimental contradecía de plano las predicciones teóricas, que vaticinaban que el electrón tendría una energía de exactamente 0.65MeV. ¿Por qué el electrón emitido tenía tan poca energía? Esta cuestión llegó a ser tan turbadora que incluso uno de los padres de la teoría cuántica, Niels Bohr, se atrevió a sugerir que quizás la energía no se conservaba en las desintegraciones nucleares. La solución correcta a este enigma fue propuesta por Wolfgang Pauli en una famosa carta dirigida a unas “estimadas damas y caballeros radiactivos”. En ella postulaba como “solución desesperada” (*sic*) la existencia de una nueva partícula, que hoy conocemos con el nombre de neutrino. Esta partícula interaccionaría muy débilmente con la materia, explicando por qué no había sido observada, y se llevaría parte de la energía de la desintegración, explicando por qué el electrón tenía menos energía de la esperada.

En cuestión de treinta años se pasó de pensar que los átomos eran bolas sólidas cuyas interacciones obedecían la mecánica newtoniana, a tener una visión bastante precisa de los átomos y de los núcleos, entendida desde el prisma de la nueva física cuántica y la teoría de la relatividad. Fueron sin duda los treinta años más gloriosos de la historia de la física. Tal fue la euforia por el tremendo progreso conseguido en esas primeras décadas del siglo XX que el insigne Max Born llegó a afirmar que la física estaría completada en seis meses.

Sin embargo, la disciplina de la física de partículas no había hecho más que empezar a caminar. Curiosamente, la disciplina de la física de partículas no vio su nacimiento en los laboratorios terrestres, sino en globos lanzados hacia las capas superiores de la atmósfera. En 1912, Víctor Hess descubrió “radiación penetrante” proveniente del espacio empleando un globo a 5.000 metros de altitud. Esta radiación penetrante la denominamos en la actualidad rayos cósmicos, y sabemos que tiene un origen extraterrestre; procede de fuentes tan diversas como el Sol, explosiones de supernovas, galaxias activas, quasars, etc. Estudiando las trazas que dejaban los rayos cósmicos al atravesar una cámara de niebla, un precursor de los modernos detectores de partículas, Carl Ander-

---

\* El MeV es una unidad de energía muy común en física nuclear equivalente a  $1.6 \times 10^{-13}$  julios. Si toda la masa del electrón se convirtiera en energía a través de la célebre ecuación de Einstein  $E = mc^2$ , se obtendrían 0.51MeV. Ésta es una energía pequeñísima para nuestros estándares de la vida diaria. Como comparación, la energía de movimiento de un mosquito volando es un millón de veces mayor.

son descubrió en 1933 una partícula con propiedades idénticas a las de los electrones, aunque con carga opuesta y positiva, que él mismo bautizó con el nombre de positrón. Una partícula con unas características tan peculiares hubiera representado un enorme misterio, de no ser por el hecho de que el misterio ya había quedado resuelto incluso antes de plantearse. Sólo cinco años antes Paul Dirac presentó una de las teorías más bellas, elegantes y revolucionarias del siglo XX. Esta soberbia teoría sigue vigente en la actualidad y ha sido comprobada experimentalmente con una precisión asombrosa. Dirac construyó una teoría cuántica relativista que, entre otros fenómenos, predice la existencia de la antimateria, partículas con las mismas propiedades que la materia, pero con carga opuesta. El positrón no podía ser más que la antipartícula del electrón. A pesar de lo extraño que pueda resultar el concepto de la antimateria, su existencia está firmemente establecida en la actualidad e incluso tiene aplicaciones prácticas en medicina, en las técnicas de escáner por tomografía por emisión de positrones.

El descubrimiento de la antimateria también tiene enormes implicaciones para nuestra propia existencia. Al comienzo de la conferencia expliqué que en la actualidad los físicos tratan de entender el porqué de nuestra propia existencia. Quizás en ese momento no pareció claro cómo se podía abordar esa pregunta desde el punto de vista científico, o incluso a algunos de ustedes les pudo parecer un objetivo demasiado pretencioso. Me gustaría a continuación replantear el problema de nuestra existencia, a la vista del descubrimiento de la antimateria. Según la teoría de Dirac la naturaleza no distingue entre materia y antimateria. Tan bueno es un electrón como un positrón, un protón como un antiprotón. Entonces, ¿por qué vemos sólo protones y electrones a nuestro alrededor? ¿Por qué no hay tantos antiprotones como protones? La respuesta a estas preguntas estriba en que la materia se aniquila con la antimateria dando lugar a radiación, por lo tanto no vemos antiprotones porque todos se han aniquilado con los protones. Ahora bien, si la naturaleza no distingue entre materia y antimateria, al principio del Universo debió haber habido tantos protones como antiprotones. Y si se aniquilan entre sí, hoy quedaría... ¡nada!, ¡sólo radiación! No habría protones, ni átomos, ni nosotros; sólo radiación. Más adelante discutiremos con detalle un mecanismo que busca encontrar una explicación a este misterio, el mecanismo de bariogénesis. Pero antes de profundizar en él, me gustaría retomar la narración de la historia de la física de partículas, no sólo por ser interesante en sí misma, sino porque en 1933, el mo-

mento en el que interrumpimos la narración, no se disponía de los conocimientos necesarios para poder abordar este problema.

Los rayos cósmicos no dejaron de deparar sorpresas y en 1937 varios grupos descubrieron de manera independiente una nueva partícula, el muón. El muón también tenía propiedades muy similares a las del electrón, pero en este caso era unas doscientas veces más pesado que éste. La primera reacción de la comunidad científica fue pensar que el muón era la partícula predicha dos años antes por Hideki Yukawa, y que sería la responsable de mediar las fuerzas nucleares fuertes. Sin embargo, pronto se comprobó que el muón no participaba en las interacciones fuertes, por lo que esta idea acabó siendo rechazada. La verdadera partícula de Yukawa fue descubierta en 1947 y fue bautizada con el nombre de pión. En cualquier caso, la existencia del muón era irrefutable y, lo que resultaba aún más misterioso, era una partícula que aparentemente “no servía para nada”: no formaba parte de la materia cotidiana y no mediaba ninguna fuerza. Tal era la frustración por este hecho que el físico Isidor Rabi preguntó tras su descubrimiento: “¿quién pidió eso?”. Sin embargo, con el tiempo los físicos tuvieron que aceptar la existencia de partículas que no servían para nada. No en vano, desde los años cincuenta hasta la actualidad más y más partículas han sido descubiertas, hasta un total de 206 partículas según la edición de 2004 del Particle Data Group, y muy pocas de ellas “sirven para algo”.

En nuestro afán por descubrir los entes fundamentales de la naturaleza hemos acabado con una plétora de ellos. Sin embargo, y al igual que ocurría con los átomos en el siglo XIX, existen similitudes entre estas partículas y pueden agruparse en familias, lo que nos podría estar indicando la existencia de otros entes aún más fundamentales. Esta miríada de partículas elementales puede clasificarse en dos grandes grupos, de acuerdo a sus interacciones. Los hadrones sufren la fuerza nuclear fuerte, mientras que los leptones no. Ejemplos de hadrones son el protón, el neutrón y el pión, mientras que ejemplos de leptones son el electrón y el neutrino. A su vez, los hadrones se clasifican en bariones y mesones. Lo que diferencia a los bariones de los mesones es una propiedad denominada número bariónico. Por definición, los bariones tienen número bariónico mientras que los mesones no. Esta definición no es en absoluto gratuita.

Todos los experimentos realizados hasta la fecha indican que el número bariónico se conserva exactamente, de la misma manera que la carga eléctrica se conserva o la energía se conserva. Ejemplos de bariones son el protón y el neu-

trón, mientras que los piones son mesones. Las antipartículas de los bariones, los antibariones, no sólo tienen carga eléctrica opuesta a la de sus respectivas partículas, sino también número bariónico opuesto. Así pues, el protón tiene número bariónico uno y el antiprotón, menos uno. En consecuencia, el dilema de por qué en el Universo hay más protones que antiprotones cuando inicialmente su número era idéntico, equivale a preguntarse por qué en la actualidad el número bariónico total es diferente de cero, cuando inicialmente era cero. ¿Qué generó el número bariónico del Universo? El mecanismo responsable de ello es lo que conocemos como el mecanismo de bariogénesis.

Llegados a este punto, podríamos comenzar a discutir la bariogénesis e interrumpir nuestra búsqueda de los constituyentes fundamentales de la naturaleza. Sin embargo, no puedo resistir la tentación de relatar los descubrimientos que condujeron a la construcción del modelo más fundamental de los constituyentes de la naturaleza del que disponemos en la actualidad: el Modelo Estándar de la Física de Partículas.

En 1964, Murray Gellmann y Georg Zweig propusieron de manera independiente que toda la variedad de bariones y mesones podía ser debida a que estas partículas estaban a su vez compuestas de otras partículas aún más fundamentales, que hoy denominamos quarks. Las primeras evidencias experimentales de que verdaderamente los quarks existen fueron encontradas a finales de los sesenta en el Acelerador Lineal de Stanford (SLAC). Con el transcurso de los años, nuevos quarks fueron descubiertos, hasta completar un total de seis. Los quarks tienen nombres tan exóticos como up, down, strange, charm, bottom y top, y tienen una propiedad denominada color que es la responsable de que los quarks participen en las interacciones nucleares fuertes. Esta propiedad es análoga a la carga eléctrica que hace que las partículas cargadas participen en las interacciones electromagnéticas. Si la carga eléctrica puede ser positiva o negativa, el color puede tomar tres valores diferentes, rojo, azul y verde.

Por supuesto, este color no tiene nada que ver con el concepto familiar de color que todos tenemos. Es una manera de entender intuitivamente la física de las teorías de Yang-Mills con un grupo  $SU(3)$ , que como se pueden imaginar, de intuitivas no tienen nada. Por consiguiente, en total hay 18 quarks y 18 antiquarks, y se combinan entre sí para formar hadrones de acuerdo a la regla de que todos los objetos compuestos tienen que ser incoloros. Así pues, podemos combinar un quark verde, un quark azul y un quark rojo, y la com-

binación de estos tres colores nos dará una partícula blanca, sin color. Las partículas formadas por tres quarks son precisamente los bariones. También se puede formar una combinación incolora con un quark y un antiquark. Si un quark es verde, el antiquark es antiverde, por lo que su combinación también será incolora. En este caso, el resultado de combinar un quark con un antiquark son los mesones.

Los experimentos actuales indican que estos quarks y los seis leptones conocidos son realmente elementales. Los quarks sufren todas las interacciones fundamentales conocidas: interacciones electromagnética, nuclear fuerte, nuclear débil y gravitatoria, mientras que los leptones sufren únicamente las interacciones electromagnética, nuclear débil y gravitatoria. Sin embargo, ateniéndonos de manera estricta a este esquema, las partículas no podrían tener masa: un requerimiento esencial de la teoría, denominado invariancia gauge, impide que las partículas tengan masa. Es en este lugar donde la partícula de Higgs entra en juego. La partícula de Higgs sería la partícula responsable de que los electrones, los quarks y el resto de partículas tengan masa, mediante un mecanismo que precisamente rompe la invariancia gauge, el mecanismo de Higgs.

La manera como el mecanismo de Higgs induce una masa en las partículas puede entenderse fácilmente gracias a una simpática comparación ideada por David Miller para explicarle al ministro de ciencia británico William Waldegrave cómo funcionaba este mecanismo. Imagínense un cóctel en la sede de un partido político, en el que los diferentes miembros del partido están distribuidos uniformemente a lo largo de la sala y charlando con sus vecinos más próximos. De repente, entra un político ilustre, Margaret Thatcher, en el ejemplo de Miller. La Dama de Hierro intentaría atravesar la sala, pero todos los miembros del partido se acercarían a ella para saludarla, lo que impediría que la señora Thatcher pudiera andar rápidamente. Y una vez que ella se haya detenido, encontrará muy difícil volver a ponerse a andar. Esto es precisamente la masa: la resistencia que encuentra un objeto para moverse, y si está detenido, para ponerse en movimiento. Si la sala hubiera estado vacía, Margaret Thatcher hubiera atravesado la sala en unos pocos segundos, pero debido a la presencia de los miembros del partido, necesitará varios minutos. Los miembros del partido representan la partícula de Higgs, una partícula que permea todo el espacio-tiempo. Si la partícula de Higgs no existiera, las partículas se moverían a la velocidad de la luz, pues no encontrarían ninguna resistencia al moverse

(es decir, tendrían masa cero). Pero si la partícula de Higgs existe, su presencia hace que las partículas se muevan más despacio, lo que significa que tienen masa.

La partícula de Higgs aún no ha sido encontrada, aunque tenemos grandes esperanzas de detectarla de aquí a unos pocos años. Cerca de Ginebra se está construyendo un superacelerador de 27 km de largo, el Large Hadron Collider, que debería ser capaz de producir y detectar la partícula de Higgs, en caso de que ésta exista. La partícula de Higgs, junto con los quarks y los leptones, y las cuatro interacciones fundamentales, constituye el denominado Modelo Estándar de la Física de Partículas. Éste es el final de nuestra búsqueda de los constituyentes fundamentales de la naturaleza: todo lo que vemos a nuestro alrededor, y todos los fenómenos que han ocurrido en el Universo desde un segundo después del Big Bang hasta la actualidad, puede describirse mediante estas pocas partículas y estas cuatro interacciones. Sin embargo, el Modelo Estándar tiene algunas cuentas pendientes que sugieren a muchos de nosotros que éste no puede ser el final de la historia, sino que existe física más allá del Modelo Estándar (nuevas partículas, nuevas interacciones, nuevas dimensiones en el espacio tiempo...). Desgraciadamente, y por falta de tiempo, no puedo extenderme en este interesantísimo campo. No obstante, me gustaría destacar que uno de los motivos por los que pensamos que hay física más allá del Modelo Estándar es precisamente la bariogénesis, que es el tema central de esta conferencia, y que discutiremos a continuación.



## LOS INGREDIENTES PARA CREAR UN UNIVERSO CON BARIONES

Hemos insistido varias veces en que por algún motivo en el Universo hay más protones que antiprotones, o dicho en un lenguaje más técnico, hay más bariones que antibariones. Sabemos que en la Tierra la única antimateria que existe es la que se produce en los aceleradores de partículas y la que nos llega en los rayos cósmicos. El hecho de que sondas espaciales hayan llegado a Marte y nos hayan enviado imágenes significa que Marte también está hecho de materia. Si no, nada más amartizar, la sonda espacial se habría desintegrado produciendo un gran destello luminoso. También sabemos a ciencia cierta que la galaxia está formada de materia y no de antimateria. La razón es que el número de antipartículas que detectamos en los rayos cósmicos es compatible con la hipótesis de que las partículas constituyentes de los rayos cósmicos son de materia, y la antimateria sólo se produce cuando estas partículas chocan contra la atmósfera. En definitiva, tenemos indicios muy sólidos para pensar que en el Universo actual hay muy poca antimateria.

Sin embargo, en el Universo primitivo la antimateria pudo estar presente en abundantes cantidades. A las altas temperaturas del Universo primitivo, las colisiones entre las partículas eran tan energéticas que podían producir fácilmente antimateria. Para ser precisos, una millonésima de segundo después del Big Bang, la temperatura del Universo era de aproximadamente diez billones de grados, y estaba constituido por una sopa de bariones y antibariones que se aniquilaban, se desintegraban y se regeneraban a través de colisiones. A medida que el Universo se expandía, la temperatura fue descendiendo, hasta que llegó un momento en el que la temperatura era tan baja que las colisiones ya no podían regenerar más los antibariones. A partir de ese momento sólo hubo aniquilaciones y desintegraciones. No obstante, la aniquilación de la materia con la antimateria no fue total, como atestigua nuestra propia existencia. En el ins-

tante a partir del cual no era posible regenerar más la antimateria, había un ligerísimo exceso de bariones sobre antibariones: por cada 1.000.000.000 de antibariones había 1.000.000.001 bariones, es decir había un exceso de bariones sobre antibariones de una parte en mil millones. Este caprichoso número es el responsable de que hoy estemos aquí discutiendo sobre su origen.

¿Qué pudo haber generado este exceso? En principio, este exceso podía haber existido desde el propio Big Bang, como una condición inicial del Universo. Sin embargo, y dado lo simétricas que son las leyes de la física, esta solución no parece muy plausible. Más interesante resulta la posibilidad de generar este exceso de bariones sobre antibariones a lo largo de la evolución del Universo, partiendo de un Big Bang en el que había tantos bariones como antibariones. Esta posibilidad es el mecanismo de bariogénesis.

Uno de los físicos más influyentes de este siglo, Andrei Sakharov, fue el primero en reflexionar sobre este problema, y en 1967 dio con las tres condiciones necesarias y suficientes para generar un exceso de bariones sobre antibariones:

- Violación del número bariónico.
- Violación de C y CP.
- El Universo tuvo que estar fuera del equilibrio térmico.
- Discutamos a continuación estas tres condiciones una por una.

La primera de ellas, la violación del número bariónico, es quizás la más obvia de todas. Si partimos de una condición inicial con número bariónico cero, y todos los procesos conservan número bariónico, va a resultar imposible generar un número bariónico diferente de cero. No obstante, la existencia de procesos que violan número bariónico no es suficiente para generar un exceso de bariones sobre antibariones. Las razones quedarán más claras en un momento, pues están estrechamente relacionadas con la tercera condición de Sakharov. Si bien la violación del número bariónico es un ingrediente esencial para generar un universo como el que observamos, hasta la fecha no tenemos ninguna evidencia de que esto ocurra en la naturaleza. El proceso de violación de número bariónico mejor estudiado es la desintegración del protón. Si el número bariónico se violara, el protón podría desintegrarse en un pión y un electrón, sin embargo, esa desintegración no se ha detectado jamás. Los experimentos nos revelan que el protón tiene una vida media mayor que  $10^{33}$  años (¡un uno seguido de treinta y tres ceros!), lo que sugiere que el número barió-

nico es una cantidad que se conserva en la naturaleza con muy buena aproximación. Entonces, si el número bariónico no se viola, ¿cómo podríamos tener bariogénesis? ¿Cómo es que existimos?

En realidad, tenemos buenas razones teóricas para pensar que sí existen procesos de violación del número bariónico. Estos procesos se denominan esfalerones, y son configuraciones del vacío cuántico que violaban el número bariónico cuando el Universo se encontraba a temperaturas muy altas, entre  $10^{15}$  y  $10^{25}$  grados, o lo que es equivalente, entre  $10^{-25}$  y  $10^{-15}$  segundos después del Big Bang. A las temperaturas a las que nos desenvolvemos en la actualidad, o incluso a las altas temperaturas del interior del Sol, estos procesos son totalmente despreciables, explicando por qué no observamos sus efectos en nuestros experimentos. Desgraciadamente, la justificación teórica de cómo aparecen estas configuraciones es bastante técnica y no puedo entrar a discutirla aquí. Para nosotros lo único que nos importa saber es que los esfalerones violan el número bariónico y que abren una puerta a la esperanza de reconciliar nuestras teorías físicas con el hecho irrefutable de que existimos.

Para entender la segunda condición de Sakharov, la violación de C y CP, hay por supuesto que explicar primero qué es C y qué es CP. C representa la simetría de conjugación de carga, es decir, el intercambio de una partícula por una antipartícula. Una teoría que conserva C es aquella que no distingue entre una partícula y una antipartícula. Experimentalmente se observa que las leyes del electromagnetismo y la gravedad son las mismas para las partículas que para las antipartículas, para los electrones y para los positrones. Así pues, las teorías electromagnéticas y gravitatorias conservan C. Por otro lado, P es la simetría bajo paridad, es decir, la simetría bajo cambio de signo de las coordenadas espaciales. Una manera intuitiva de entender esta simetría consiste en observar un proceso en la vida real e imaginarse cómo sería ese proceso reflejado en un espejo. A continuación intentamos reproducir en la vida real el proceso tal y como lo vimos en el espejo. Si el resultado del experimento resulta ser idéntico a nuestro experimento de partida, diremos que la simetría bajo paridad se ha conservado. Hoy en día sabemos que los procesos electromagnéticos y gravitatorios también conservan P. Por último, CP es la acción combinada de cambiar partícula por antipartícula, y observar el proceso en un espejo. Por supuesto, el electromagnetismo y la gravedad también conservan CP.

¿Cómo pueden ayudar C y CP a la bariogénesis? Es posible demostrar que si C y CP son simetrías conservadas exactamente, el ritmo de producción de

bariones en el Universo primitivo es idéntico al ritmo de producción de antibariones. Así pues, en un universo en el que inicialmente había la misma cantidad de bariones que de antibariones, si C y CP se conservaran el ritmo de producción de bariones y de antibariones sería el mismo, por lo que el número bariónico neto producido sería cero. Al igual que ocurría con la violación del número bariónico, la violación de C y CP tampoco son capaces de generar por sí mismas un exceso de bariones sobre antibariones. De nuevo, la tercera condición de Sakharov nos salvará de este escollo.

Durante muchos años se pensó que C, P y CP eran simetrías conservadas de la naturaleza, no en vano las interacciones más familiares para nosotros, las electromagnéticas y las gravitatorias, las conservan. ¿Pero qué ocurre con las interacciones nucleares débil y fuerte? En 1956, y tras sugerir Chen Ning Yang y Tsung-Dao Lee que las interacciones débiles podrían violar C y P, la científica china Chien-Shiung Wu y su equipo desarrollaron un experimento en el que detectaron la violación de la paridad en la desintegración del cobalto-60. Casi simultáneamente, Richard Garwin, Leon Lederman y Marcel Weinrich, investigando la desintegración de los piones, confirmaron el descubrimiento de Wu de la violación de P, anunciando además la violación de C en estos procesos. ¡Las interacciones débiles violan C y P! Sin embargo, esta violación era tal que CP seguía estando conservada: no podríamos distinguir la desintegración del núcleo de cobalto-60 de la desintegración del antinúcleo de cobalto-60 reflejada en un espejo. Hubo que esperar unos años, hasta 1963, para que nuestra concepción de la naturaleza diera otro vuelco. En ese año, Val Fitch y James Cronin observaron una desintegración muy rara del mesón K que estaría prohibida si CP estuviera conservada. Este efecto es pequeñísimo, sólo una desintegración entre quinientas, pero suficiente para establecer de manera firme que CP se viola en la naturaleza. Así pues, ¡la segunda condición de Sakharov también se satisface en la naturaleza!

La tercera condición de Sakharov, la desviación del equilibrio térmico, también es fácil de entender. Si un sistema está en equilibrio térmico, todas las reacciones ocurren con igual probabilidad en sentido directo y en sentido inverso. Aplicado a la bariogénesis, esto significaría que si existe un proceso que viola el número bariónico, este proceso ocurrirá con igual probabilidad en el sentido de generar una unidad de número bariónico como en el sentido de destruir una unidad de número bariónico (y de manera análoga para C y CP). Por lo tanto, en promedio no se generará ningún número bariónico. Para que la ba-

riogénesis surta efecto es necesario que no haya equilibrio térmico, de manera que las reacciones en un sentido estén favorecidas sobre las reacciones en el sentido inverso. ¿Se satisface esta condición en la naturaleza? La respuesta es que sí, y la razón fue descubierta por Edwin Hubble en 1921. El Universo está expandiéndose y enfriándose según se expande. Tras generarse en una reacción una unidad de número bariónico, el Universo es más frío que un instante antes, y esto podría impedir que la reacción inversa tenga lugar. Al transcurrir el tiempo, se estaría generando un número bariónico neto, en acuerdo con lo que observamos. Aparte de la propia expansión, pensamos que pudieron existir épocas en la evolución del Universo en las que la desviación del equilibrio térmico pudo haber sido muy importante: las transiciones de fase. Pensamos que el Universo al enfriarse ha sufrido transiciones de fase, como la que ocurre cuando enfriamos un vaso de agua. Durante un tiempo el agua se enfría permaneciendo líquida, pero a una cierta temperatura el agua empieza a congelarse, que es un estado muy diferente al agua líquida. Ésta es una transición de fase y mientras está ocurriendo el sistema está fuera del equilibrio térmico. Así pues, durante estas transiciones de fase, la bariogénesis pudo haber sido muy eficiente.

En definitiva, las tres condiciones de Sakharov parecen cumplirse en el marco de la física conocida: los esfalerones proporcionan la violación de número bariónico a altas temperaturas, las interacciones débiles violan C y CP, y la expansión del Universo proporciona la desviación del equilibrio térmico. A priori, todos los ingredientes están presentes. Sin embargo, la violación de C y CP que observamos no es lo suficientemente grande, y la desviación del equilibrio térmico no es lo suficientemente fuerte. En el universo debería haber muchísimos menos bariones de los que observamos, tan pocos que nuestra propia existencia no sería posible. En otras palabras, ¡seguimos sin entender por qué existimos!

En el resto de la conferencia, expondré los avances más recientes en la búsqueda de una solución a este enigma, y cómo los neutrinos podrían jugar un papel clave en esta solución.



## LAS MASAS DE LOS NEUTRINOS

Recordemos lo que es un neutrino. El neutrino es una partícula postulada por Pauli para explicar el espectro continuo de rayos beta en las desintegraciones radiactivas. Esta partícula tendría que ser bastante ligera e interactuar muy débilmente. De hecho, sus interacciones son tan débiles que tuvieron que pasar veinticinco años hasta que su existencia fuera confirmada experimentalmente, lo que ocurrió en 1956 gracias a un célebre experimento desarrollado por Clyde Cowan y Frederick Reines. Más tarde, en 1962 se descubrió un segundo neutrino, con propiedades ligadas a las del muón, y cuando se descubrió en 1975 el tau, otro leptón con propiedades similares a las del electrón y el muón, nadie puso en duda que debía existir un tercer neutrino, con propiedades ligadas a las del tau. Éste fue descubierto en 2000.

Los neutrinos son las partículas más abundantes del Universo después de los fotones. El Sol produce una cantidad ingente de neutrinos, tantos que cada segundo cada uno de nosotros está siendo atravesado por unos seiscientos billones de neutrinos. La colisión de los rayos cósmicos con la atmósfera también produce neutrinos. Cuando yo extiendo mi mano, cada segundo hay un neutrino atmosférico atravesando la yema de mi dedo. Incluso nosotros mismos producimos neutrinos, aproximadamente unos cien millones al día, mediante la desintegración radiactiva del potasio de nuestros cuerpos. Sin embargo, ni siquiera nos percatamos de este tremendo bombardeo de partículas que sufrimos y la razón estriba en que los neutrinos interactúan muy débilmente con la materia. De la inmensa cantidad de neutrinos que recibimos del Sol cada segundo, sólo uno de ellos interactuará con nosotros... ¡en toda nuestra vida! Otro ejemplo: si uno proyectara un haz de luz sobre un bloque de vidrio, sería necesario un espesor de unos pocos centímetros para reducir la intensidad del haz a la mitad. Si hiciéramos lo mismo lanzando un haz de neutrinos sobre

plomo, para reducir la intensidad del haz a la mitad sería necesario un bloque de plomo con un espesor de... ¡diez años luz!, ¡seiscientas mil veces la distancia de la Tierra al Sol!

Debido a sus débiles interacciones, la detección de los neutrinos entraña una dificultad enorme y entender sus propiedades supone un reto formidable para la física. No obstante, el ingenio humano no conoce límites y hoy en día disponemos de experimentos capaces de detectar alrededor de un neutrino al día. No parece mucho, pero tras un año de recogida de datos el número de neutrinos detectados es lo suficientemente grande como para aprender algo de sus propiedades. Los experimentos más sofisticados en este campo consisten en gigantescos tanques que contienen cincuenta mil toneladas de agua, y que pueden detectar el pequeñísimo destello de luz producido cuando un neutrino interacciona con los protones del agua.

Una de las propiedades más enigmáticas de los neutrinos es su masa. Dado que es muy difícil detectar los neutrinos, hasta hace unos años la única manera de medir su masa era indirectamente, y lo que resulta más interesante es que todas ellas apuntaban a que la masa de los neutrinos era diminuta. Se sabía que el neutrino más ligero tenía una masa al menos cien mil veces menor que la masa del electrón. Los experimentos tampoco descartaban que la masa pudiera ser exactamente cero, por lo que muchos físicos asumieron esta posibilidad como cierta: era la posibilidad más sencilla y además era plausible. Sin embargo, existía una pieza que no terminaba de encajar. Como dijimos anteriormente, el Sol produce una cantidad ingente de neutrinos. Sin embargo, los primeros experimentos para detectar neutrinos provenientes del Sol únicamente detectaban alrededor de un tercio de los neutrinos predichos por el modelo solar de John Bahcall, que tan bien funcionaba en cualquier otro aspecto. No obstante, si los neutrinos tuvieran masa, este déficit podría explicarse de manera muy sencilla a través de un fenómeno cuántico denominado “oscilaciones de neutrinos”.

En 1998 la colaboración superkamiokande en Japón publicó unos resultados que sugerían fuertemente que los neutrinos oscilaban y, por tanto, tenían masa, lo que revolucionó el campo de la física de partículas, la física solar y la cosmología. Unos pocos años más tarde, en 2002, la colaboración SNO en Canadá encontró *evidencias* de que en efecto los neutrinos oscilaban, y de que el modelo solar de John Bahcall era correcto también en lo que se refiere al número de neutrinos producidos por el Sol. En la actualidad, diversos experimen-

tos han confirmado este resultado, de manera que hoy en día no nos queda ninguna duda de que los neutrinos tienen masa. Esta masa, como adelantamos anteriormente, es diminuta. El neutrino más pesado tiene una masa alrededor de un millón de veces menor que la masa del electrón, y mil millones de veces menor que la masa del protón.

¿Por qué es la masa de los neutrinos tan pequeña? Honestamente, no lo sabemos. Sin embargo, tenemos varias teorías. La más plausible de todas es el denominado “mecanismo de see-saw” (balancín, en inglés). Imagínense subirse a un balancín en el que en el otro extremo hay un luchador de sumo. Ustedes se sentirán muy ligeros y como si flotaran. Ésa es la esencia del balancín: algo pesado en un extremo del balancín provoca que en el otro extremo todo sea liviano. Aplicando este mismo principio a los neutrinos, imagínense que existieran partículas muy muy pesadas, que interaccionaran con los neutrinos de manera que el sistema se asemeje a un balancín. Como resultado del efecto balancín, los neutrinos serían muy muy ligeros, y eso es lo que observamos. Este mecanismo para dar masa a los neutrinos es el “mecanismo de see-saw” y se puede implementar de manera formal, siendo compatible con todas las leyes de la física conocidas sin contradecir ninguno de los experimentos realizados hasta la fecha. En el mecanismo de see-saw, las partículas pesadas se denominan neutrinos right, y su masa es presumiblemente unos mil millones de veces mayor que la masa del protón o quizás más.

De todos los mecanismos propuestos para dar masa a los neutrinos, éste es el más natural, elegante y económico. Históricamente, el mecanismo de see-saw fue descubierto hace poco más de veinticinco años en investigaciones sobre modelos de unificación de todas las interacciones fundamentales. Resulta intrigante que estos modelos predijeran una masa para los neutrinos que resultó ser correcta con una buena aproximación. ¿Podría ser la masa de los neutrinos una pista para encontrar la tan ansiada teoría de la gran unificación? Ésta es una pregunta aún sin respuesta.



## LEPTOGÉNESIS

Hace unos momentos, insistí en que el mecanismo de see-saw era una posibilidad muy natural, elegante y económica, y que además no contradecía ninguno de los experimentos desarrollados hasta la fecha. Me quedé corto a la hora de alabar las virtudes de este mecanismo, pues además de todo lo anterior, el mecanismo de see-saw podría explicar el enigma que nos ha tenido ocupados estos últimos minutos: el enigma de la bariogénesis o el enigma de nuestra propia existencia.

Esta explicación es la bariogénesis a través del mecanismo de leptogénesis, que fue propuesta en 1986 por dos físicos japoneses, Masataka Fukugita y Tsutomu Yanagida.

Antes de conocer los detalles del mecanismo de leptogénesis, es preciso profundizar en las propiedades de los neutrinos right. Dentro de la clasificación de las partículas elementales entre hadrones y leptones, los neutrinos right se clasifican como leptones, pues no sufren interacciones nucleares fuertes. Los leptones tienen una propiedad llamada número leptónico, completamente análoga al número bariónico de los bariones, y del que hablamos anteriormente. Así pues, los leptones tienen número leptónico uno, y los antileptones, menos uno. Si el número bariónico era una propiedad que se conservaba con muy buena aproximación en todas las reacciones entre partículas, el número leptónico también sabemos que se conserva con muy buena aproximación. Sin embargo, tenemos muy buenas razones teóricas para pensar que las interacciones de los neutrinos right violan el número leptónico. Este hecho es clave en el mecanismo de see-saw y es esencial para generar las diminutas masas de neutrinos que observamos. La razón por la que no hemos observado los procesos de violación de número leptónico, a pesar de saber que está roto, está estrechamente relacionada con la pequeñez de la masa de los neutrinos. No obstante, en los

próximos años podría ser posible observar este tipo de procesos por primera vez, a través de ciertas desintegraciones de algunos núcleos atómicos.

Si el mecanismo de see-saw es correcto, el Universo primitivo tuvo que estar poblado por neutrinos right, que interactuaban violando el número leptónico. Por otro lado, la violación de C y CP en el sector de los hadrones sugiere que estas simetrías también podrían estar violadas en el sector de los leptones, y en particular en las interacciones de los neutrinos-right. Recordando por un momento las dos primeras condiciones de Sakharov para la bariogénesis, observaremos un claro paralelismo. Éstas eran: primero, violación del número bariónico, y segundo, violación de C y CP. Unidas a la tercera condición, estar fuera del equilibrio térmico por ejemplo por la propia expansión del Universo, aseguraban la generación de un exceso de bariones sobre antibariones. En este caso, se cumplen tres condiciones análogas: violación del número leptónico, violación de C y CP, y el Universo está fuera del equilibrio térmico, por lo tanto, está asegurada la generación de un exceso de leptones sobre antileptones. ¡Es el mecanismo de leptogénesis! El descubrimiento de la masa de los neutrinos nos sugiere fuertemente que en el Universo hay más leptones que antileptones, o más antileptones que leptones. Desgraciadamente, este exceso o defecto de leptones sobre antileptones no ha sido aún observado, debido a que la mayor parte de los leptones del Universo están en forma de neutrinos que tan difíciles son de detectar y de estudiar.

El último giro de tuerca de esta historia la ejercen los esfalerones. Estas enigmáticas configuraciones del vacío cuántico fueron presentadas anteriormente, y se caracterizaban por violar el número bariónico a altas temperaturas. Se puede demostrar que los esfalerones no sólo violan el número bariónico sino también el número leptónico.

Además, lo hacen de una manera muy peculiar, transformando el uno en el otro. Ésta es la conexión entre la leptogénesis y la bariogénesis: si en el Universo primitivo se generó un exceso de leptones sobre antileptones, los esfalerones producirán un exceso de bariones sobre antibariones. Diversos físicos han estudiado las predicciones para el exceso de bariones sobre antibariones en el marco de la leptogénesis a la vista de las últimas medidas de la masa de los neutrinos, y han llegado a la conclusión de que... ¡funciona! ¡Todas las piezas encajan a la perfección! Tenemos un modelo, el mecanismo de see-saw, que no sólo es capaz de explicar las masas de los neutrinos, sino también por qué en el Universo hay más protones que antiprotones.

Resumamos brevemente la relación entre la masa de los neutrinos y la bariogénesis. Según nos enseñó Sakharov es posible generar un Universo en el que el número de protones es diferente al número de neutrones únicamente cuando, y sólo cuando, existe violación del número bariónico, existe violación de C y CP, y el Universo está fuera del equilibrio. Todos los intentos de generar un número neto de bariones con la física conocida hasta hace siete años han resultado infructuosos. Ahora bien, los esfalerones transforman número bariónico en número leptónico y viceversa, por lo que la primera condición de Sakharov también se satisface cuando hay violación de número leptónico. Así pues, la física de los leptones también podría jugar un papel central en la bariogénesis. Hace únicamente siete años la física conocida de los leptones indicaba que estas partículas no jugaban ningún papel en la bariogénesis. Sin embargo, el descubrimiento y la confirmación experimental de que los neutrinos tenían masa cambió de manera radical el papel jugado por los leptones en la bariogénesis. Si la masa de los neutrinos es debida al mecanismo de see-saw, las interacciones de los neutrinos right en el Universo primitivo violarían el número leptónico y podrían generar un exceso de bariones sobre antibariones que haría posible nuestra existencia.

A pesar de lo excitante y atractivo de la idea, me gustaría recalcar que la leptogénesis es sólo una teoría y está aún a la espera de ser confirmada (o refutada). Cómo confirmar este mecanismo es objeto de una intensa actividad investigadora en la actualidad, y habrá que esperar muchos años, y gastar muchos kilos de papel y bolígrafo, hasta poder llegar a afirmar que los neutrinos right existen y que la leptogénesis es la razón última de nuestra existencia.

En esta dirección, en los próximos años nuevos experimentos en física de partículas y cosmología nos aportarán sin ninguna duda nuevas pistas sobre este misterio y otros muchos que siguen abiertos en la física actual. En concreto, en únicamente un par de años está previsto que se complete la construcción del mayor experimento de la historia, el Large Hadron Collider del CERN, donde podrían encontrarse nuevas partículas como la partícula de Higgs, nuevos fenómenos como la supersimetría, o incluso nuevas dimensiones en el espacio-tiempo. Quizás incluso encontremos nuevos fenómenos que en la actualidad ni siquiera podemos imaginar. Lo que es indudable es que de aquí a diez años conoceremos la naturaleza muchísimo mejor de como la conocemos ahora, y como físico me siento muy afortunado de poder vivir esta época que seguramente marcará un hito en la historia de la ciencia. Para finalizar, y

dato que posiblemente estemos a las puertas de otra época dorada para la física, me gustaría aprovechar esta ocasión para invitar a todos ustedes a compartir con los investigadores esta fascinación por los nuevos descubrimientos. Es una experiencia maravillosa, y éste es el mejor momento para vivirla.





