

Las fronteras del conocimiento

Lección magistral leída en el solemne acto
de apertura del curso 2012-2013

José Bernabéu Alberola

2012

VNIVERSITAT
E VALÈNCIA



Esta publicación no puede ser reproducida, ni total ni parcialmente, ni registrada en, o transmitida por, un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, ya sea fotomecánico, fotoquímico, electrónico, por fotocopia o por cualquier otro, sin el permiso previo de la editorial.

© *Del texto*: José Bernabéu Alberola, 2012

© *De esta edición*: Universitat de València, 2012

Maquetación: Publicacions de la Universitat de València

ISBN: 978-84-370-8875-4

Depósito legal: V- -2012

Impresión:



Índice

- 9 LAS DOS FRONTERAS DE LA FÍSICA
- 11 ESTRUCTURA DE LA MATERIA
- 14 EL LHC Y EL CERN
- 16 DESCUBRIR EL MECANISMO DE HIGGS
- 19 EL UNIVERSO OBSERVABLE
- 22 EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN.
HISTORIA DEL TIEMPO
- 28 LA SEGUNDA REVOLUCIÓN COPERNICANA.
MATERIA Y ENERGÍA OSCURA
- 32 DETECCIÓN Y PRODUCCIÓN DE MATERIA
OSCURA FRÍA
- 35 LA PERSPECTIVA CIENTÍFICA

Excelentísimo Señor Rector Magnífico de la Universitat de València.
Excelentísimas y dignísimas autoridades.
Compañeros y amigos de la Universidad de Valencia.

LAS DOS FRONTERAS DE LA FÍSICA

Como tantos otros aspectos de la cultura occidental, el método científico tiene sus orígenes en la Grecia antigua. De la filosofía natural griega hemos heredado la idea de que hay principios racionales subyacentes que gobiernan el mundo natural, y que los seres humanos tienen la capacidad del pensamiento racional. Aristóteles creía que se puede obtener el conocimiento a partir de una observación pormenorizada, lo cual es un ingrediente fundamental de lo que después se conocerá como método científico. La idea según la cual el mundo natural es susceptible de ser conocido por los humanos fue adoptada por los filósofos griegos como una noción que necesita un conjunto de métodos para ser realizada.

Es cierto que los métodos han variado en la ciencia moderna, pero ésta es una variante, consistente en la combinación de teoría más experimento, de aquella hipótesis fundamental según la cual el conocimiento necesita un método.

Bertrand Russell, en sus *Fundamentos de Filosofía*, señala:

La intención de dar leyes al Universo mediante principios *a priori* ha fracasado; la lógica, en lugar de ser, como era anteriormente, un muro de contención para las posibilidades, se ha convertido en la gran liberadora de la imaginación, y presenta diversas alternativas posibles, al mismo tiempo que deja al experimento la tarea de descubrir las leyes de la naturaleza, entre los varios mundos que la lógica ofrece para nuestra elección.

El uso que hizo del telescopio Galileo Galilei –que descubrió las lunas de Júpiter, desconocidas hasta aquel momento– ilustra la necesidad de instrumentos para objetivar las percepciones humanas y abrir nuevos horizontes en ciencia. Nuestros sentidos no son fiables en muchas situaciones, y un paso importante en el método científico moderno es la complementariedad entre la observación, la evidencia empírica y el pensamiento racional, representados por el telescopio de Galileo, construido en 1609. Galileo no fue el primero que construyó un telescopio, pero sí que fue el primero que usó la nueva tecnología para detectar la existencia de fenómenos previamente inobservables. Aquellos descubrimientos demostraron hasta qué nivel las percepciones sensoriales humanas podían ser poco fidedignas, y Galileo es considerado el padre del método científico.

¿Cuáles son las características del avance del conocimiento en la ciencia? Pensamos que el avance se mide en buena parte por el grado de síntesis de una nueva teoría, la explicación de nuevos fenómenos observados y/o la unificación que permite ampliar sus dominios de validez. En ese esfuerzo siempre aparecen nuevos problemas abiertos no vislumbrados antes, y su resolución conduce a explicaciones más profundas y a la formulación de nuevas preguntas. En mis palabras está implícito que no tengo una visión lineal del avance en la comprensión científica. Si se pretende ilustrar una visión del avance del conocimiento, yo me adheriría a la representación propuesta por Peter Carruthers de una isla de conocimiento, rodeada por un mar de ignorancia, con fronteras móviles entre lo que es conocido y lo que no. En esta visión, las fronteras del conocimiento no desaparecen nunca, y los descubrimientos en la frontera conducen a reestructurar lo que se suele llamar «conocimiento adquirido».

Una manera muy efectiva de hacer avanzar el conocimiento, tragándose la ignorancia, consiste en la convergencia de dos o más campos que antes estaban separados. Ese es el sueño de la unificación, tan presente en la historia de la física: gravitación universal de Newton, electromagnetismo de Maxwell, mecánica cuántica de Bohr, Heisenberg y Schrödinger, relatividad de Einstein. En estos inicios del siglo XXI, la unificación entre las fuerzas débiles –responsables de la generación de energía al Sol y de la desintegración de partículas– y

las electromagnéticas –responsables de la formación del átomo y de toda la materia agregada– provoca nuevas preguntas que más tarde discutiré. En un sentido más general, la convergencia de las dos fronteras en la escala de distancias (la física de partículas y la cosmología) representa un avance considerable del conocimiento.

Las fronteras del conocimiento en la escala de distancias se corresponden al hecho de preguntar a la naturaleza: ¿de qué está hecho el Universo?

Con el acelerador LHC, el Gran Colisionador de Hadrones del CERN (el Laboratorio Europeo de Física de Partículas), estamos penetrando en la estructura íntima de la materia hasta distancias inferiores a 10^{-18} metros, para conocer los constituyentes elementales de la materia, sus interacciones y las cargas responsables de esas fuerzas entre los constituyentes, y también la respuesta a la pregunta más actual: el origen de la masa.

En las grandes escalas del mundo cosmológico, estudiando el Universo como un todo hemos llegado a explorar distancias próximas a los 10^{26} metros del Universo visible. Así es como, a causa de la velocidad finita de propagación de las señales, penetramos en los primeros instantes de la historia del Universo, es decir, que vemos como era el Universo primitivo que ha delimitado su evolución de expansión en el tiempo. Y la conclusión más notable es que esa exploración del cosmos conecta con la investigación que se ha llevado a cabo en los laboratorios de física de partículas. El Universo primitivo no era como el actual, expandido y frío, sino contraído y caliente. Y, a aquellas temperaturas o energías, la materia era como la que recreamos ahora en forma de partículas elementales. La pregunta más actual es, aquí: ¿cuál es el contenido de materia y energía del Universo? ¿Es como el que ya conocemos a partir de la física de partículas?

ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Todas las civilizaciones de la historia han especulado sobre la naturaleza de las cosas. Después de algunas consideraciones hechas por la escuela de filosofía natural de Mileto y por los pitagóricos, los griegos aportaron algunas

ideas interesantes sobre este tema. Empédocles inventó la teoría de los cuatro elementos de la materia: tierra, aire, fuego y agua. Los «atomistas», en su búsqueda de la máxima simplicidad, imaginaron que los elementos verdaderos eran, en esencia, de naturaleza idéntica, pero con tamaños y formas diferentes que explicarían la variedad de la materia. Los átomos serían indivisibles e inalterables, separados por el vacío, lo cual permitiría su movimiento. Demócrito, seguidor de Leucipo, es reconocido por sus ideas fundamentales sobre los átomos. Aunque serían invisibles para el ojo humano, el mundo se explicaría sobre esta base corpuscular. Las sensaciones serían la consecuencia de la interacción de los átomos con los sentidos.

Platón cambia la visión materialista que había dominado la filosofía anterior. Los átomos en movimiento y en colisión imaginados por Demócrito fueron sustituidos por el mundo de las «ideas» como realidad última. Hay una correspondencia entre objetos e ideas, y «conocer» es el camino hacia su esencia. Aristóteles descartó que las ideas tuvieran una realidad independiente de los objetos. Las ideas sólo podrían expresar «calidades» de las sustancias, y atribuye la realidad a las sustancias. Aristóteles reniega del atomismo y del vacío y acepta la teoría de los cuatro elementos, pero añade uno más: la quinta esencia. Él dividió el mundo en dos partes diferentes: el mundo terrestre, constituido por los cuatro elementos, y el cielo, con la quinta esencia como único elemento.

El atomismo no reapareció hasta el nacimiento de la química moderna a principios del siglo XIX, con la hipótesis atomista de John Dalton –para explicar la ley de presiones parciales en los gases– y la ley de proporciones definidas para la combinación de diferentes elementos. Estos desarrollos constituyeron los fundamentos de la teoría atómica de la materia. En 1871, Mendeléiev publicó la tabla periódica de los elementos, y dejó vacías algunas casillas para elementos que aún no eran conocidos. El descubrimiento posterior de esos elementos predichos dio apoyo y aceptación a la teoría atómica. Cuando observamos la tabla periódica sentimos que el calificativo de *elementos* no parece apropiado para objetos atómicos en número de un centenar. La teoría de los cuatro elementos parece más estética, pero es falsa, mientras que la tabla pe-

riódica da una explicación de lo estructura de la materia a distancias de más de 10^{-10} metros.

El descubrimiento posterior del electrón por J. J. Thomson en 1897 proporcionó una comprensión del átomo como un objeto compuesto, y que la propiedad importante de los «elementos» de la tabla periódica era el número atómico, el número de electrones, y no el peso atómico. El electrón era el constituyente elemental a principios del siglo XX.

La física fundamental del siglo XX ha demostrado que el átomo tiene una corteza de electrones que se mueven alrededor de un núcleo central, y que en este núcleo las partículas subatómicas están concentradas a distancias menores a los 10^{-14} m. La masa del átomo se debe, sobretudo, a la masa de su núcleo, ya que los electrones son muy ligeros. Eso hace que el volumen nuclear sea 12 órdenes de magnitud más pequeño que el volumen atómico, mientras que la densidad nuclear es al menos 12 órdenes de magnitud más grande que la densidad del átomo. Por lo tanto, el átomo es una estructura esencialmente vacía, y los electrones –como partículas cuánticas– están forzados a moverse por todo el volumen atómico. Mientras que a escalas más grandes que la atómica la materia no tiene carga eléctrica (es decir, es neutra), a escalas subatómicas se observa, para un elemento de número atómico Z , un núcleo de carga positiva Z y Z electrones de carga negativa.

A distancias subnucleares, por bajo de los 10-15 m, los núcleos atómicos están compuestos de dos tipos de partículas: los protones, que están cargados positivamente, y los neutrones, que no tienen carga eléctrica. Mientras que la estructura atómica es gobernada por la interacción electromagnética entre partículas cargadas, el empaquetamiento de los protones y los neutrones dentro el pequeño volumen nuclear es causado por la interacción fuerte, de muy corto alcance.

Cualquier partícula sensible a la interacción fuerte recibe el nombre de *hadrón* (el estudio de los hadrones es objeto de la física hadrónica). En la década de 1970 se descubrió que los hadrones, que hay que explorar por debajo de los 10^{-16} m, están formados por quarks. Por lo tanto, los protones y los neutrones están formados por quarks, que están confinados en su interior con un poten-

cial de interacción que crece con la distancia. Las partículas que transmiten la interacción fuerte entre los quarks que forman un protón o un neutrón son los gluones, que equivalen a los fotones de la interacción electromagnética. En el momento actual, en que se ha podido explorar la estructura de la materia por debajo de los 10^{-18} m, se sabe que los quarks y los leptones —partículas que no sienten la interacción fuerte— son los constituyentes elementales de la materia. El conocido electrón forma parte de los leptones.

La rama de la ciencia que estudia los electrones, los quarks y demás partículas elementales que forman la materia es la física de partículas. Para desarrollar sus objetivos requiere «microscopios» cada vez más potentes, capaces de penetrar en el interior de la materia hasta las distancias más pequeñas posibles.

Cuando el énfasis se pone en las instalaciones necesarias para la producción y el análisis de las partículas elementales, este campo de estudio se llama física de altas energías, nomenclatura que hace referencia al hecho de que hay que sondear la materia con partículas de muy alta energía producidas en los aceleradores artificiales de los laboratorios de física de partículas o mediante los fenómenos naturales asociados a los rayos cósmicos.

La necesidad de alta energía para crear nuevas partículas masivas es encuentra sustentada por la ecuación relativista de Einstein: $E=mc^2$, que indica como se puede invertir energía (E) a producir masa (m), y cuál es la contribución de una masa al balance de energía de un proceso determinado. La conexión entre masa y energía la da el cuadrado de la velocidad de la luz (c^2). La partícula elemental más masiva que se ha podido crear hasta ahora al laboratorio es la del quark cima, una partícula elemental con una masa 180 veces más grande que la del protón.

EL LHC Y EL CERN

En la actualidad, el acelerador terrestre más potente en funcionamiento es el Gran Colisionador de Hadrones o LHC (del inglés Large Hadron Collider) del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN). El LHC está

instalado en un túnel de casi 27 km de circunferencia, enterrado a 100 m de profundidad, que pasa por territorio de Francia y Suiza. En estas instalaciones se producen haces de partículas de muy alta energía capaces de penetrar en el interior de la materia y dar información sobre sus constituyentes, sobre nuevas partículas producidas en la colisión de los haces, y en general sobre nuevos fenómenos.

Con energías de unos pocos electrón-voltios (1 eV es la energía adquirida por la carga de un electrón al aplicarle el potencial eléctrico de un voltio) es posible ionizar los átomos, y desligar los electrones de su núcleo atómico. Energías un millón de veces más grandes, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$, son las que intervienen en fenómenos que afectan al núcleo atómico, como los procesos que tienen lugar en los reactores nucleares. Para estudiar las propiedades de partículas elementales se necesitan energías a partir de los gigaelectrón-voltios ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$). La energía actual del acelerador LHC es de 8 TeV, y será de 14 TeV en una segunda fase ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$). Los detectores instalados en el LHC analizan la producción de partículas hasta diez veces más masivas que la del quark cima, y exploran la materia hasta distancias diez veces más pequeñas que las que se han analizado hasta ahora; es decir, hasta los 10^{-19} m. En esta nueva región de altas energías y pequeñas distancias se espera encontrar una nueva física.

El CERN es el centro de física de partículas más importante del mundo. Está situado sobre la frontera entre Francia y Suiza, cerca de Ginebra. Este centro proporciona a los físicos de partículas de todo el mundo las herramientas para penetrar en la estructura de la materia, y así avanzar en el conocimiento de los constituyentes elementales y de las fuerzas responsables de su comportamiento. Aceleradores, detectores y ordenadores son los ingredientes instrumentales que producen haces de partículas de alta energía en colisión, y que observan los productos resultantes de estas colisiones y analizan los datos que permiten dar respuestas a los problemas abiertos de la física fundamental.

El CERN se fundó en 1954 y ha significado la primera gran aventura de una Europa unida en la segunda mitad del siglo XX. A sus 20 países miembros

actuales se añaden miembros asociados y observadores de fuera de Europa. En estos momentos juega el papel de laboratorio mundial que desarrolla la actividad científica de campo y diseña la política científica del futuro. El Consejo del CERN está formado por delegados de los países miembros, y es el responsable no solo de la actividad del laboratorio, sino también de la política científica para la física de altas energías en Europa. El director general del CERN es nombrado por el Consejo.

El CERN da trabajo a casi 3.000 personas, entre físicos, ingenieros, técnicos, administradores y otros trabajadores. Alrededor de 10.000 científicos de Europa y del resto del mundo participan, usando las instalaciones del CERN, en los experimentos de la frontera del conocimiento.

España es miembro del CERN desde 1983. La aportación española es proporcional a su PIB y se sitúa inmediatamente después de Alemania, el Reino Unido, Francia e Italia. Los grupos de investigación españoles participan en los grandes experimentos del LHC renombrados –ATLAS, CMS, LHCb y ALICE– y son financiados por el Programa Nacional de Física de Partículas del Gobierno de España. El IFIC, centro mixto de la Universidad de Valencia y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, participa en ATLAS y en otros experimentos de campo, y es homologable a los centros de investigación de mayor relevancia mundial. Todos los indicadores señalan que España es la quinta potencia europea en excelencia científica en física fundamental, y la novena del mundo.

DESCUBRIR EL MECANISMO DE HIGGS

En las últimas décadas, la teoría estándar de física de partículas ha logrado superar todas las pruebas experimentales a que ha sido sometida para dar cuenta de las interacciones entre los constituyentes elementales de la materia, sondados hasta distancias tan ínfimas como los 10^{-18} metros mediante los aceleradores de partículas. La teoría está basada en principios de simetría de las leyes físicas, que sólo son exactos cuando **las partículas mediante las interac-**

ciones son de masa nula, como el fotón de la fuerza electromagnética. En este proceso, la fuerza débil –responsable de la generación de energía en el Sol y de la desintegración de partículas– y la electromagnética –responsable de la formación del átomo y de la materia macroscópica– han quedado unificadas, al haberse entendido cuáles son las «cargas» responsables de esas interacciones.

Pero los mediadores de la interacción débil son partículas muy masivas, lo que explica por qué esta interacción, a diferencia de la electromagnética, es de muy corto alcance. La pregunta relevante es, pues: ¿cómo es posible obtener partículas masivas mientras retenemos las predicciones de la simetría para las interacciones? En otras palabras: *¿cuál es el origen de la masa?*

La solución propuesta por el *mecanismo de Higgs* está basada en que una ley física simétrica puede dar lugar a soluciones asimétricas. Para especificar una teoría con creación y aniquilación de partículas a partir del *vacío* debemos dar no solo la ley física, sino también cuál es la estructura de ese *vacío*, el estado de más baja energía posible. Si el vacío es asimétrico, mientras que las leyes responsables de las interacciones son simétricas, decimos que hay una rotura «espontánea» de la simetría. Una analogía de la vida cotidiana es la de una mesa redonda de comensales con simetría perfecta, que se rompe en el momento que uno de ellos elige el pan que tiene situado a su izquierda.

Robert Brout, François Englert y Peter Higgs descubrieron que un campo con una interacción del tipo de «sombbrero mexicano» deja de tener un único vacío simétrico (al centro) para disponer de todo un continuo de vacíos posibles (al fondo). La rotura espontánea de la simetría se produce cuando se elige uno de ellos como «el» vacío de la teoría. Es más, todos los vacíos son equivalentes y podemos elegir uno cualquiera de ellos. La elección de otros vacíos no da origen a teorías diferentes.

Si aplicamos este mecanismo de Higgs a la teoría unificada electrodébil, los mediadores de la interacción débil adquieren masa, mientras que el fotón se queda sin masa, y en el proceso aparece un remanente del campo original: el bosón de Higgs.

Entendemos así la importancia de su existencia, porque proporciona la señal de que el origen de la masa tiene lugar, en efecto, mediante la rotura

espontánea de la simetría de la interacción unificada electrodébil, rotura provocada por el mecanismo de Higgs. La búsqueda del bosón de Higgs debe hacerse mediante su producción en aceleradores de alta energía.

Actualmente, el acelerador más potente en funcionamiento es el LHC del CERN. ATLAS y CMS son experimentos diseñados para observar un amplio espectro de partículas y nuevos fenómenos producidos en las colisiones del LHC, como el bosón de Higgs, la supersimetría o las dimensiones extra. Además, están midiendo con alta precisión las propiedades de los quarks, de los leptones y de los bosones ya conocidos, mientras están pendientes de cualquier serendipidad que pueda ocurrir. Cada experimento involucra aproximadamente unos 3.000 físicos de 40 países. Desde España, participan en el experimento ATLAS el Instituto de Física Corpuscular (IFIC) de Valencia, el IFAE de Barcelona y un grupo de la UAM, y en el experimento CMS participan el CIEMAT de Madrid, el Instituto de Física de Cantabria, la Universidad de Oviedo y otro grupo de la UAM. También ha colaborado con Valencia el Instituto IMB-CNM del CSIC. LHC, ATLAS y CMS comenzaron a construirse el año 2000, después de un largo período de investigación y desarrollo, y han necesitado una década para su construcción, instalación y funcionamiento, puesta a punto y en operación.

En el seminario que tuvo lugar en el CERN el 4 de julio de 2012, los experimentos ATLAS y CMS han presentado el estado de la investigación del bosón de Higgs de la teoría estándar, basada en los datos de 2011 a una energía de 7 TeV y en los primeros datos de 2012 a 8 TeV, ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$). La búsqueda se hace en diversos «canales» según los productos de desintegración del bosón de Higgs, los más importantes de los cuales son el de dos fotones y el de dos mediadores de la interacción débil que conduce a cuatro electrones o muones. Cada uno de los dos experimentos ha combinado, entre otros, los resultados de los canales mencionados para los datos de 2011 y 2012.

Los resultados **dan un significado** que, separadamente en cada experimento, permite concluir que se ha observado un nuevo bosón con una masa de cerca de 125-126 GeV en unidades de energía ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$). Las características son compatibles entre los dos experimentos y los dos canales, y con el bosón de Higgs de la teoría estándar. Estamos, por lo tanto, en un momento

histórico en el avance del conocimiento científico, que ha hecho exclamar al director general del CERN: «¡Lo tenemos!»

Estamos en el proceso de entender el origen de la masa, quizá el concepto más importante en la frontera del conocimiento. Pero este acontecimiento es sólo el comienzo: con el objetivo de consolidar la observación presente se requieren más datos hasta finales de año, y, con el LHC operando a 14 TeV a partir de 2014, podremos estudiar con precisión la naturaleza y las propiedades de la nueva partícula.

EL UNIVERSO OBSERVABLE

Si desde las distancias macroscópicas del metro se asciende hasta las más altas escalas del cosmos, se llega a una segunda frontera de distancias, la de los 10^{25} m o más. La rama de la astronomía que estudia el Universo globalmente a estas escalas –sin entrar en los detalles de su estructura en términos de objetos cósmicos, como las estrellas y las galaxias– es la cosmología. La cosmología, por lo tanto, en la escala de distancias se encuentra al otro extremo de la física de partículas o física de altas energías.

La conclusión más remarcable del estudio de las dos fronteras es que están conectadas, y que la exploración del cosmos a las distancias más grandes enlaza con la investigación que se lleva a cabo en los laboratorios de física de partículas.

Hay un principio cosmológico que establece que, a escala global, el Universo es esencialmente uniforme e isótropo, es decir, que es más o menos igual en todos los puntos y en todas las direcciones. Además, actualmente se sabe que el Universo no es estático, sino que se ha expandido con el tiempo desde un gran estallido inicial (*Big Bang*). Dado que las señales que transportan información no pueden viajar a una velocidad más grande que la de la luz, la observación aquí y ahora de señales que vienen de muy lejos proporciona información del Universo en el momento en el que estas señales abandonaron la fuente que los generó, es decir, aporta información sobre el Universo primordial.

El Universo primitivo era extremadamente denso y caliente, y las partículas que lo formaban tenían tanta energía que la materia no existía en forma de agregaciones de átomos tal y como se observa hoy. Lo realmente interesante es que los experimentos que se llevan a cabo en los laboratorios de física de partículas para investigar la composición de la materia a escalas subatómicas recrean las condiciones en que el Universo fue formado por un plasma denso y caliente de partículas altamente energéticas.

Las interacciones gravitatorias tienen un papel esencial en los movimientos próximos a la superficie de la Tierra y en el comportamiento a gran escala del Universo actual. Todas las otras fuerzas fundamentales son **apantalladas**: las interacciones débiles –responsables de la inestabilidad de núcleos y partículas– y las interacciones fuertes –responsables de la estructura de los núcleos y de los hadrones– lo son a causa de su corto alcance, y las interacciones electromagnéticas lo son porque la materia agregada se organiza en términos de componentes atómico-moleculares neutros. En el otro extremo, la interacción gravitatoria es la más débil de todas las interacciones a escala microscópica, y no tiene un papel relevante en la física de partículas elementales, pero presenta la propiedad de ser «coherente» con la materia agregada, porque su acoplamiento efectivo lo da la masa global proporcional al número de constituyentes.

Uno de los grandes éxitos de la mecánica newtoniana, que incluye la ley de la gravitación universal, fue explicar el movimiento de los planetas del Sistema Solar (las leyes de Kepler). La evidencia astrofísica –la observación del movimiento de las estrellas binarias alrededor de su centro de masas, por ejemplo– demuestra que las interacciones gravitatorias también operan en sistemas astronómicos más grandes, como estrellas, galaxias y nebulosas. La mecánica newtoniana incorpora el principio de equivalencia de Galileo –que afirma que todos los cuerpos próximos a la superficie terrestre caen con igual aceleración– a través de la igualdad entre la masa inercial (la inercia con respecto a cualquier cambio de movimiento) y la masa gravitatoria (el acoplamiento con un campo gravitatorio). Este principio de equivalencia es el fundamento de la teoría de la relatividad general de Einstein, según la cual los fenómenos gravitatorios están asociados a una modificación de la geometría del espacio-tiempo. La

relatividad general incluye la teoría newtoniana en el límite en que esta modificación de la geometría es débil, y es la base de la descripción del Universo a gran escala.

EL Universo se define como la totalidad de aquello que existe, incluidos el espacio, el tiempo, la materia, la energía, los planetas, las estrellas, las galaxias, el espacio intergaláctico, etc. Pero no todo aquello que existe en el Universo se puede observar, de manera que se puede hablar de un universo observable y de un universo total, una parte del cual no es posible observar. El primero está constituido por las galaxias, que actualmente se pueden observar gracias a que la luz y otras señales que proceden de ellas han tenido suficiente tiempo para llegar a la Tierra desde el inicio de la expansión cósmica. Dado que, de acuerdo con el principio cosmológico, el Universo es isótropo, los límites del Universo observable dibujan un volumen esférico centrado en el observador, independientemente de cuál sea la forma del universo total. Cada punto del Universo tiene, por lo tanto, su propio Universo observable, que se puede superponer, en menor o mayor grado, al Universo observable centrado en la Tierra.

Como el Universo tiene una edad de 14.000 millones de años (Ma), se podría pensar que el radio del Universo equivale a 14.000 millones de años-luz. Pero en realidad es mucho más grande, ya que durante los 14.000 Ma de historia del Universo, el espacio existente entre los primeros fotones emitidos y los observadores terrestres se ha ido expandiendo. A causa de la expansión del espacio en el tiempo, actualmente se pueden observar objetos que originalmente estaban mucho más a cerca entre ellos. Por lo tanto, el radio del Universo observable no es de 14.000 millones de años-luz, sino de unos 47.000 millones de años-luz. Esta es la distancia que pueden haber recorrido la luz primigenia y otras señales (como los neutrinos y las ondas gravitacionales, que se propagan a la misma velocidad que la luz) desde el objeto que las emitió hasta un observador actual situado en la Tierra. Pero en la práctica sólo es posible ver la luz del Universo primigenio y, en general, otras señales del espectro electromagnético, cuando los fotones de esta luz no fueron inmediatamente reabsorbidos por otras partículas cargadas. **Y el plasma que existía antes de la recombinación de las partículas elementales para formar materia agregada**

neutra. Dado que la transición desde el plasma primigenio a la materia formada por átomos tuvo lugar unos 380 mil años (Ka) después del *Big Bang*, la luz más antigua que podemos ver es de esta época. Eso significa que hay que distinguir entre el Universo «observable» y el Universo «visible». El segundo tiene un radio de unos 46.000 Ma, un 2% más pequeño que el primero. La superficie exterior esférica del Universo visible está formada por el conjunto de puntos emisores de luz, o de otro tipo de radiación, situados a la distancia justa para que los fotones que emitieron en el momento de la recombinación de las partículas elementales en átomos esté llegando a la Tierra en este preciso instante. Los fotones emitidos desde esta superficie son los que se detectan hoy en forma de radiación cósmica de fondo de microondas o CMBR (del inglés Cómico Microwave Background Radiation).

El Universo visible contiene entre 3 y 100 veces 10^{22} estrellas organizados en más de 80.000 millones de galaxias, que, a su vez, forman cúmulos y supercúmulos. Una estrella típica contiene unos 10^{57} átomos. Una galaxia típica tiene 400.000 millones de estrellas, y probablemente en el Universo visible hay 80.000 millones de galaxias, además de gas intergaláctico. En consecuencia, el número de átomos del Universo visible se aproxima a los 10^{80} . Actualmente estos átomos constituyen la materia agregada de los elementos atómicos y moleculares.

EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN. HISTORIA DEL TIEMPO

Hasta el siglo XX se suponía que el Universo era estático; las estrellas se podían mover unas respecto de otras, pero nunca se había pensado que hubiera una expansión o una contracción globales del conjunto del Universo. Esta idea la introdujeron una serie de descubrimientos realizados durante la década de 1920, que representaron el inicio de la cosmología observacional.

El astrónomo norteamericano Edwin Powell Hubble (1889-1953) observó que los espectros de la luz de las galaxias muy distantes mostraban, sistemáticamente, un desplazamiento hacia longitudes de onda más largas, es decir,

un desplazamiento hacia al rojo. Eso quería decir que estaban retrocediendo respecto de la Tierra, pero que también se alejaban las unas de las otras. Los cálculos de Hubble demostraron que la velocidad de retroceso (v) de una galaxia era proporcional a la distancia (d) a la que la galaxia se encontraba de la Tierra, lo que expresó en la ley de Hubble: $v = Hd$, donde H es una constante de proporcionalidad que toma el valor de $2,2 \cdot 10^{-18}/s$.

La ley de Hubble es la única ley que mantiene la misma distribución relativa de las galaxias en tiempos diferentes. No hay ningún punto privilegiado en la distribución lineal, y eso es válido en todas las direcciones del espacio. Por lo tanto, de acuerdo con la ley de Hubble no hay ninguna razón para pensar que la Vía Láctea se encuentra al centro del Universo, ni tan solo si se toma como referencia para las observaciones. De aquí se deduce que el espacio se expande en el tiempo, y que la historia del Universo es la historia del tiempo. Esta idea fundamental constituye el principio cosmológico ya mencionado. Hay fluctuaciones locales de densidad y temperatura, pero globalmente el Universo es homogéneo e isótropo. Por lo tanto, la constante de Hubble es constante en el espacio, y las leyes de la física son las mismas en todos sus puntos.

Pero la ley de Hubble también sugiere que, en algún tiempo del pasado, toda la materia del Universo se encontraba mucho más concentrada y caliente de lo que lo está ahora. Entonces la materia y la energía fueron impulsadas por una explosión inmensa, llamada la Gran Explosión o Big Bang, que proporcionó energía cinética al Universo. De acuerdo con la ley de Hubble, el tiempo necesario para que una señal viaje desde el Big Bang hasta la Tierra es de alrededor de $1/H = 1,4 \cdot 10^{10}$ años. Esta es la edad actual del Universo.

En la teoría de la relatividad general, de Einstein, el incremento de longitud de onda de los espectros de las galaxias se explica por la misma expansión del espacio. Para comprender cómo es posible una expansión sin un centro, se puede imaginar la superficie de una esfera, cuyo radio (R) aumenta con el tiempo cosmológico. Entonces no hay ningún centro en la superficie en expansión y todos los objetos puntuales de la superficie esférica retroceden unos respecto de otros. En este símil, el espacio se muestra infinito, aunque está acotado. La cantidad R es el radio de curvatura en cada punto, así como un

factor de escala que depende del tiempo cosmológico, que cambia con la expansión. Cualquier longitud en el espacio intergaláctico es proporcional a R . De acuerdo con esta visión, el incremento de longitud de onda con el tiempo cosmológico es un desplazamiento cosmológico hacia el rojo, y no está causado por un movimiento relativo de las galaxias. Cuanto más lejos se encuentra un objeto, más le cuesta a la luz llegar al observador, y más grande es el cambio en R y en la longitud de onda. Si en la ley de Hubble la distancia es suficientemente grande, la velocidad de expansión puede ser más grande que la velocidad de la luz. No hay ningún problema con este resultado: indica que la región más distante del Universo queda más allá del horizonte observable y ninguna señal emitida desde allí es capaz de llegar al observador. De ello se concluye que el espacio se expande con el tiempo.

La ley de Hubble relaciona la velocidad de expansión con la distancia espacial. Pero la expansión también depende del tiempo cosmológico. Hasta no hace mucho, la comunidad científica estaba convencida de que había una presión negativa (hacia el interior del Universo) debida a la atracción gravitatoria, que conduciría con el tiempo a una desaceleración de la expansión del Universo. Pero en 1998 la cosmología se tuvo que replantear estas suposiciones al publicarse los hallazgos que en 2011 darían el Premio Nobel de Física a los norteamericanos Saul Perlmutter (n. 1959), Brian P. Schmidt (n. 1967) y Adam Guy Riess (n. 1969). Estos científicos demostraron que la luz que emiten las supernovas de tipo Ia, que corresponden a la explosión de una vieja estrella compacta tan pesada como el Sol y tan pequeña como la Tierra, es más débil de lo esperado, lo que indica que la expansión del Universo se acelera.

La aceleración del Universo requiere la presencia de una energía capaz de proporcionar una presión positiva hacia fuera, contraria a la ejercida por la fuerza de gravedad de la materia. Para referirse a esta energía que acelera el Universo se ha acuñado el nombre de *energía oscura*, pero su naturaleza es un enigma. Juntamente con el origen de la masa, la energía oscura plantea uno de los problemas más importantes de la física actual.

Es posible reconstruir una historia del Universo a partir de algunos hechos cosmológicos observacionales y de acuerdo con la teoría que explica

las interacciones fundamentales entre las partículas elementales, que ha sido comprobada en experimentos de física de altas energías hasta unos cientos de gigaelectron-voltios. A energías más altas y distancias más cortas se debe hablar de «tierra ignota» y, por lo tanto, las descripciones, de momento, son especulaciones no comprobadas en la teoría de la física de partículas.

Esta historia, sin embargo, no se puede remontar más allá del llamado tiempo de Planck, que es de unos 10^{-43} s, porque para tiempos anteriores no se dispone de ninguna teoría consistente de la gravedad cuántica. Entre el instante cero y el tiempo de Planck no existían partículas elementales, y las cuatro fuerzas de interacción que actúan hoy en el Universo (la interacción gravitatoria, la interacción nuclear fuerte, la interacción débil y la interacción electromagnética) estaban unificadas en una única fuerza fundamental. Este primer período de tiempo de la historia del Universo, se llama *era o época de Planck*.

En la era de Planck la temperatura del Universo era de 10^{32} K, y la energía media por partícula era la energía de Planck, de $1,2 \cdot 10^{19}$ GeV. Siguiendo las especulaciones actuales en física de partículas, en el período comprendido entre los 10^{-43} y los 10^{-35} s la interacción nuclear fuerte, la débil y la electromagnética continuaban unificadas, pero la interacción gravitatoria ya se había separado, porque el Universo se expandía y se enfriaba. Lo que había entonces era un plasma de quarks y leptones. A los 10^{-35} s, la temperatura había disminuido a unos 10^{27} K, y la energía media por partícula a 10^{14} GeV. Por debajo de esta energía, la fuerza de interacción fuerte se separa de la interacción unificada electrodébil.

De acuerdo con el modelo inflacionario del Universo, necesario para comprender algunas propiedades del Universo actual, en estos tiempos primitivos se produjo un período de expansión muy rápida. Entonces el Universo era un plasma formado por quarks, leptones y partículas responsables de las interacciones fundamentales: gluones para la interacción nuclear fuerte, fotones para la interacción electromagnética, y bosones W^{\pm} y Z para la interacción débil. Desde el período inflacionario de la expansión rápida hasta los 10^{-12} s, el Universo se continuó expandiendo, por bien que más despacio, y su tem-

peratura continuó disminuyendo hasta que alcanzó los 10^{15} K. Entonces las energías típicas de las partículas eran de unos 100 GeV. En alguna época, entre los 10^{-35} s de la escala de gran unificación de las interacciones fuertes y electrodébil y los 10^{-12} s de la escala electrodébil, ocurrió la bariogénesis. Es un hecho observado que el Universo actual está constituido por materia y no por antimateria. *Bariogénesis* es el término genérico para describir los procesos físicos que produjeron esta asimetría entre la materia y la antimateria en el Universo primitivo. Aunque las condiciones para poder explicar la bariogénesis son conocidas y presentes en la teoría estándar de física de partículas, estamos muy lejos de poder dar una explicación cuantitativa de estos fenómenos. Se necesita una nueva física. Es altamente probable que esta prehistoria del Universo, antes de los 10^{-12} s, deba ser revisada y reescrita en el futuro, cuando la ciencia cosmológica dispondrá de nuevos avances sobre el conocimiento de la física de partículas. De momento, y gracias a las observaciones cosmológicas de los últimos tiempos, se sabe que en el Universo hay más componentes de energía-materia que los que describe el modelo estándar actual de la física de partículas. Por lo tanto, se espera que los resultados de los experimentos que se llevan a cabo con el acelerador de partículas LHC, en funcionamiento y de prestaciones excelentes, aporten nuevos descubrimientos, más allá de explicar el origen de la masa con el bosón de Higgs.

A los 10^{-12} s se entró en el período que podemos llamar *histórico*, ya que se ha podido estudiar la evolución del Universo a partir de entonces y describir la física de partículas elementales gracias al uso de aceleradores. Además, disponemos de algunos «fósiles cosmológicos» de esta época, radiaciones remanentes de aquellos tiempos que se pueden estudiar con mucho detalle. Al pasar a la época histórica, las energías medias de las partículas ya no eran suficientemente altas para mantener en equilibrio el quark más pesado de todos, el quark cim, ni tampoco los bosones mediadores de la interacción débil W^\pm y Z , de manera que estas partículas se desintegraron y desaparecieron.

Un momento particularmente significativo en la evolución del Universo fue el de la transición de los quarks a los hadrones, que tuvo lugar aproximadamente hacia a los 10^{-6} s, cuando la temperatura era de 10^{13} K, y la energía

media por partícula alrededor de 1 GeV. Otro fenómeno importantísimo que tuvo lugar por lo que respecta al tiempo $t = 1 \text{ s}$, fue el desacoplamiento de los neutrinos, unas partículas elementales que pertenecen a la familia de los leptones. En el Universo primordial los neutrinos estaban en equilibrio dinámico a través de su creación y aniquilación en procesos de interacción débil a altas energías, porque la frecuencia de esta interacción era más grande que la de expansión del Universo. Pero a energías por debajo de 1 MeV, las interacciones de los neutrinos son demasiado débiles, y los neutrinos se desacoplan del plasma. Desde entonces los neutrinos estables han constituido una radiación de fondo, ya que el Universo ha continuado enfriándose y no ha afectado a su distribución de energías. La temperatura actual de este fondo de neutrinos es de 1,96 K. Hay que decir, sin embargo, que esta radiación de fondo de neutrinos aún no se ha podido observar, ya que interactúa muy débilmente con la materia.

En el momento en el que se producía el desacoplamiento de los neutrinos, cuando $t = 1 \text{ s}$, solo los nucleones, entre todos los hadrones, eran estables, y hacia los 100 s neutrones y protones existían en la proporción de 1 a 7. Entonces las energías eran las típicas del enlace nuclear, 1 MeV, y comenzó la nucleosíntesis primordial. Los cálculos teóricos de la abundancia de los elementos ligeros producidos en esta nucleosíntesis inicial están totalmente de acuerdo con las abundancias observadas en el Universo, lo que representa un gran triunfo de la teoría cosmológica del Big Bang.

En el período temporal comprendido entre 1 s y 380.000 años, la densidad de energía de la radiación electromagnética era más grande que la de materia, razón por la cual se habla de la era de la radiación. Entonces en el Universo ya había núcleos atómicos ligeros con una carga eléctrica positiva, ya que se habían originado en la nucleosíntesis primordial, y su carga era compensada por una cantidad igual de carga negativa en forma de electrones libres en equilibrio con la radiación electromagnética. Como la densidad de energía de la radiación decrece más rápidamente con la temperatura del Universo que la densidad de energía de la materia, porque los fotones no tienen masa, a unos 380 Ka las dos densidades de energía quedaron igualadas. En aquel momento

la temperatura, de unos 3.000 K, ya no era suficientemente alta para mantener los electrones y los núcleos libres cargados separadamente, de manera que se combinaron unos con otros y formaron átomos estables neutros. Este fenómeno se conoce con el nombre de *recombinación*. Sin electrones libres, la radiación electromagnética ya no puede interactuar de manera importante con la materia, y el Universo queda «transparente» porque la radiación se desacopla de la materia. La longitud de onda de esta radiación crece con la expansión del Universo y es una medida del factor de escala R: lo que era una radiación de cuerpo negro a la temperatura de 3.000 K en el momento en que se desacopló de la materia, ha pasado a ser, a causa de la expansión del Universo, un fondo actual de radiación de microondas de 2,7 K, ya que a esta temperatura los fotones tienen la longitud de onda correspondiente a la radiación de microondas del espectro electromagnético. Esta radiación de fondo del Universo fue descubierta y medida en 1964 por el astrofísico alemán Arno Allan Penzias (n. 1933) y el físico norteamericano Robert Woodrow Wilson (n. 1936), lo que representa otro triunfo grandioso del modelo cosmológico estándar del Big Bang.

A partir de la recombinación que había generado hidrógeno atómico y helio, cuando el Universo tenía una edad de 380.000 años, se entró en la era dominada por la materia, durante la que se forman las estrellas y las galaxias. Las galaxias se agrupan en cúmulos y supercúmulos, de manera que en la estructura a gran escala del Universo quedan grandes regiones sin materia visible. Comprender el proceso de formación de esta estructura a gran escala es uno de los problemas importantes de la Cosmología.

LA SEGUNDA REVOLUCIÓN COPERNICANA. MATERIA Y ENERGÍA OSCURA

En el siglo XVI, el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) revolucionó la astronomía al sustituir a un cosmos finito centrado en el ser humano por un Universo infinito y homogéneo dispuesto alrededor del Sol.

Posteriormente se descubrió que ni siquiera el Sol es el centro del Universo, ya que el Sistema Solar es uno más de los muchos sistemas planetarios ordinarios que residen en los suburbios de la Vía Láctea. Finalmente, el principio cosmológico, según el cual el Universo es homogéneo e isótropo, ha obligado a abandonar definitivamente la idea de que el hombre, o cualquier otro centro, ocupa un lugar especial al Universo.

Si bien el Universo es globalmente homogéneo, se observa que tiene una estructura granular. Se cree que pequeñas fluctuaciones al azar de una densidad de energía originalmente uniforme han generado pequeñas agrupaciones de densidad más elevada, en un proceso muy semejante a la formación de las nubes. Las fluctuaciones de la densidad inicial que hicieron arrancar la granulación tuvieron que empezar en un tiempo no muy tardío de la evolución del Universo. Eso quiere decir que se dispone de los resultados de la estructuración a gran escala del Universo, y que la radiación de fondo a 3 K que se observa hoy, al cabo de 14.000 Ma, debe contener memoria de estas primeras fluctuaciones de la densidad inicial. En efecto, en 1992 el satélite COBE (del inglés Cosmic Background Explorer, «Explorador Cósmico del Espacio Profundo») de la NASA descubrió pequeñas no-uniformidades y anisotropías en la radiación de fondo que eran consistentes con la granulosis observada en la distribución de materia al Universo. Estas anisotropías han sido estudiadas posteriormente con más detalle por otro satélite de la NASA, el WMAP (del inglés Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, «Sonda Wilkinson de Anisotropía de Microondas»), lo que ha hecho posible medir el contenido de materia-energía del Universo actual. Los resultados finales son espectaculares: el Universo contiene un 28% de materia. Como la materia visible directamente es solo de un 5%, eso quiere decir que el 23% restante es materia no convencional u oscura. De hecho, la necesidad de la existencia de una materia oscura con interacción gravitatoria ha estado presente en la cosmología durante unas cuantas décadas (por ejemplo, para poder explicar las curvas de rotación de las galaxias y la estructura a gran escala del Universo). Otro descubrimiento importante es el de una nueva presión repulsiva, que corresponde al 72% de densidad de energía y que completa el balance energético. Esta contribución

positiva al balance de energía, hasta ahora desconocida, es compatible con la energía oscura introducida para explicar la aceleración actual de la expansión del Universo a causa de algún tipo de presión repulsiva. Por lo tanto, la energía oscura es del 72%.

En un futuro próximo, el satélite Planck de la ESA examinará la radiación cósmica de fondo con una sensibilidad, una resolución y un alcance de frecuencias no obtenidas nunca antes, y afinará aún más todos estos resultados. Entonces quizá datos inesperados conducirán a nuevas ideas y conceptos. De momento ya sabemos que no solo no estamos en ningún centro del Universo, sino que la mayor parte del contenido del Universo (el 95%) está formada por algo diferente al material del que estamos hechos los humanos. Este descubrimiento se puede considerar una Segunda Revolución Copernicana.

Los científicos infieren que la materia oscura existe gracias a los efectos gravitatorios que ejerce sobre la materia visible y la radiación cósmica de fondo, pero no es detectable en forma de radiación electromagnética emitida o dispersada. Su existencia se justifica por las discrepancias existentes entre las medidas de la masa de galaxias, cúmulos de galaxias y el Universo entero tomadas a través de efectos dinámicos y de las medidas basadas en la masa de la materia «luminosa» visible que contienen estos objetos: estrellas, gas y polvo del medio interestelar e intergaláctico. De hecho, la materia oscura fue postulada por el astrónomo suizo Fritz Zwicky (1898-1974) en 1934 para explicar la «masa que faltaba» en las velocidades orbitales de las galaxias de los cúmulos. Más adelante, otras observaciones —como las curvas de rotación galácticas, la dispersión de velocidades de las galaxias, las lentas gravitatorias, etc.— han dado también pruebas de la presencia de materia oscura en el Universo.

Desde la década de 1970 se dispone de medidas de alta precisión de las curvas de rotación de los objetos más exteriores de las galaxias espirales, y se ha observado que estas curvas no coinciden con las curvas teóricas que se obtienen aplicando las leyes de Kepler. La mayor parte de los objetos orbitan a la misma velocidad, independientemente de su distancia del disco luminoso central, cosa que confiere una forma plana a la curva de rotación de la galaxia.

Para explicar esta forma plana sería necesario que las galaxias espirales tuvieran una masa mucho más grande que la observada. Y de esta masa extra puede dar cuenta la materia oscura, que está contenida en su halo oscuro. Las curvas de rotación, tanto por baja como por alta luminosidad superficial, indican un perfil de densidad universal, que se puede expresar como la suma de un disco estelar estrecho y un halo de materia oscura esférico de densidad uniforme que llega hasta grandes distancias.

También las galaxias elípticas tienen un contenido en materia oscura relativamente alto, tal y como se deduce de las medidas de dispersión de sus velocidades (la dispersión de velocidades de un grupo de objetos, por ejemplo un cúmulo de estrellas alrededor de una galaxia, es el alcance de las velocidades de estos objetos respecto de la velocidad media).

Una lente gravitatoria se forma cuando la luz de una fuente muy distante y brillante se dobla o se curva al pasar cerca de un objeto masivo, como por ejemplo un cúmulo de galaxias. El efecto de lente gravitatoria de la teoría de la relatividad general de Einstein predice las masas de los cúmulos que curvan la luz, de tal manera que midiendo la geometría distorsionada de la trayectoria de la luz se puede obtener la masa del cúmulo responsable del fenómeno.

En la mayor parte del Universo, la materia oscura y la materia visible están juntas, tal como se espera debido a su atracción gravitatoria mutua. En el cúmulo de la Bala, sin embargo, una colisión entre dos cúmulos de galaxias ha originado una separación de la materia oscura y la materia ordinaria. Las observaciones demuestran que mucha materia ordinaria, en forma de gas o plasma, se concentra al centro del cúmulo. Las interacciones electromagnéticas, que no afectan a la materia oscura pero sí a la ordinaria, frenan las partículas del gas, que permanecen cerca del punto de impacto y son detectadas con telescopios de rayos X. En cambio, las observaciones del mismo cúmulo a través del efecto de lente gravitatoria demuestran que la mayor parte de la masa se encuentra fuera de la región central de gas, lo que indica que los componentes de materia oscura de los dos cúmulos pasaron uno a través del otro, sin frenarse de manera sustancial.

DETECCIÓN Y PRODUCCIÓN DE MATERIA OSCURA FRÍA

Aunque las observaciones demuestran que para explicar la estructura a gran escala del Universo es necesaria una cantidad significativa de materia no ordinaria u oscura, la composición de esta materia no se conoce. Se han propuesto diferentes modelos para explicar de qué podría estar hecha. De acuerdo con un primer modelo, habría una materia oscura caliente formada por partículas elementales ligeras que se desplazan a velocidades relativistas, que podrían ser neutrinos. Otro modelo habla de materia oscura constituida por neutrones y protones, igual que la materia ordinaria pero no visible, como planetas muy masivos o agujeros negros no detectados hasta ahora. Tanto la una como la otra, sin embargo, pueden representar solo una parte muy pequeña del total de materia oscura y con ellas no podemos explicar la formación de estructuras. Por eso es ampliamente aceptado un tercer modelo, el de la materia oscura fría, no ordinaria, compuesta por partículas elementales desconocidas, más allá de la teoría estándar de física de partículas, de las que se mueven a velocidades no relativistas.

Una propiedad importante de la materia oscura es que se comporta como un fluido perfecto, es decir, no tiene ninguna resistencia interna o viscosidad. Eso significa que las partículas de materia oscura no interactúan entre ellas a través de interacciones fuertes o electromagnéticas. Además, para explicar la estructura a gran escala del Universo, se debe invocar la existencia de materia oscura fría. Hacen falta, por lo tanto, las llamadas partículas masivas que interactúan endeblemente o WIMP (del inglés Weakly Interacting Massive Particles). El modelo estándar de física de partículas no prevé partículas de estas características, pero sí que pueden existir en extensiones del modelo estándar, como por ejemplo en muchos de los renombrados modelos supersimétricos. Estos modelos proponen como candidatos a constituir la materia oscura fría estable unas partículas supersimétricas que serían las más ligeras de todas y que reciben el nombre de LSP (del inglés Lightest Supersymmetric Particle). Un neutralino es un ejemplo de LSP hipotética con las propiedades de las WIMP. Alternativamente, según extensiones no supersimétricas del modelo es-

táandar, pueden existir un tipo de neutrinos, diferentes de los descritos por el modelo estándar, que sí que podrían ser candidatos a formar la materia oscura fría. Estos neutrinos no interactúan con la materia mediante interacciones débiles como lo hacen los neutrinos ordinarios, y por este motivo reciben el calificativo de estériles.

Si la materia oscura de la Vía Láctea está hecha de WIMP, un gran número de estas partículas debe pasar a través de la Tierra cada segundo. Varios experimentos que se llevan a cabo actualmente, y otros que se están planificando, intentan detectar de manera directa o indirecta las WIMP que llegan a la Tierra procedentes del cosmos.

Para detectar WIMP directamente hay que reconocer los efectos o señales que estas partículas producen en los núcleos atómicos de la materia ordinaria cuando impactan con ellos y los hacen retroceder: ionización, escintilación o calor. Los experimentos de detección directa de WIMP se realizan en laboratorios subterráneos profundos para reducir el fondo no deseado de partículas que llegan del cosmos. Por ejemplo, el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC), en Huesca, se sitúa bajo una cima montañosa de los Pirineos que le proporciona un escudo contra los rayos cósmicos equivalente al de 2.540 m de agua. Otros laboratorios europeos detectores de WIMP son el del Gran Sasso (Italia), el de Fréjus (Francia) y el de Boulby (Gran Bretaña). Algunos de los experimentos que se realizan allí pueden detectar dos diferentes efectos del impacto de las WIMP sobre los núcleos atómicos, y son capaces de distinguir las partículas dispersadas por los electrones de la materia de las partículas WIMP de materia oscura dispersadas por los núcleos.

Dos experimentos de detección de WIMP, el DAMA/LIBRA, que se lleva a cabo en el laboratorio nacional del Gran Sasso, y el CoGeNT, en el Laboratorio Subterráneo de Soudan (Estados Unidos), han detectado una intrigante modulación anual de las señales (para la materia oscura atrapada en el sistema solar, y a causa del movimiento de la Tierra alrededor del Sol, se espera una modulación anual de la frecuencia de acontecimientos). Si la señal se atribuye verdaderamente a partículas WIMP, estaría indicando que estas partículas tienen una masa baja en la región de 10 GeV. Este detector no dispone de un mé-

todo para identificar el retroceso nuclear, tan solo la modulación anual de la señal. Pero quizá otro experimento como el ANAIS, basado en una tecnología similar, que está en funcionamiento en el laboratorio de Canfranc, podrá comprobar los resultados del DAMA. Hay que tener presente que los experimentos de detección directa que identifican el retroceso nuclear son más sensibles en la región de masa alta de las WIMP, de 100 GeV o más, y no han detectado ninguna señal hasta ahora. Es interesante que puedan extender su sensibilidad a la región de masa baja de las WIMP para comparar sus observaciones con los resultados del DAMA.

La materia oscura existente en el Universo también se puede detectar de manera indirecta buscando los productos de la aniquilación de partículas WIMP. Si, tal como se cree, las WIMP son partículas neutras para todas las cargas, dos WIMP en colisión podrían aniquilarse y producir rayos gama, neutrinos o pares partícula-antipartícula, como electrón-positrón. La señal sería un exceso significativo de rayos gama, positrones o antiprotones en el halo galáctico. Y efectivamente, la misión espacial PAMELA, instalada en un satélite ruso en 2006 y capaz de medir con una gran precisión y sensibilidad la abundancia y el espectro de energía de positrones y antiprotones, ha observado un exceso de positrones. Si bien es verdad que estos positrones podrían ser producidos por la aniquilación de materia oscura, no se puede descartar que provengan de fuentes convencionales, como púlsares. Por otro lado, no se ha observada ningún exceso de antiprotones. Se espera que el detector AMS (del inglés Alpha Magnetic Spectrometer, «Espectrómetro Magnético Alpha»), recientemente instalado en la Estación Espacial Internacional (EEI), ayude a resolver estas dudas.

También es fundamental producir las partículas de materia oscura en el laboratorio y estudiar sus propiedades. El acelerador LHC extenderá la búsqueda de partículas supersimétricas hasta masas muy altas. A partir de estas partículas de gran masa se provocará una cadena de desintegraciones hasta llegar a las LSP, como el neutralino, que se debería manifestar en forma de energía faltante en todo el proceso. Los dos detectores ATLAS y CMS del LHC están actualmente realizando este estudio. EL LHC también tiene la capaci-

dad de producir materia oscura directamente, es decir, de crear partículas WIMP, que el ATLAS y el CMS pueden detectar como energía que falta, independientemente que la supersimetría sea su explicación o no. La limitación más importante para esta producción directa de partículas de materia oscura en el LHC es que las WIMP, tal como dice su nombre, son partículas de interacción débil, de manera que será necesario acumular una alta estadística para obtener resultados concluyentes. Lo que queda claro de todo esto es que el problema de la materia oscura está conectado con la búsqueda de nuevas partículas no descritas por el modelo estándar. De esta manera se conectarán las dos fronteras de la física, la de los niveles o distancias más grandes con la de las distancias más pequeñas.

LA PERSPECTIVA CIENTÍFICA

Se ha insistido una y otra vez, con razón, en que la ciencia es internacional en su desarrollo, además de ser universal en su validez, y el CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, sirve de modelo para todas las áreas científicas. La ciencia orienta el pensamiento del ser humano hacia cuestiones que muchos pueblos comprenden, y en cuya solución pueden participar estudiosos de diferentes lenguas, razas y religiones. Werner Heisenberg, en una conferencia pronunciada para estudiantes de Göttingen en julio de 1946, señala la profunda impresión que le produjo el llamado «Festival de Bohr», la semana de conferencias que, el verano de 1921, pronunció Niels Bohr sobre su teoría atómica. La impresión de Heisenberg fue causada porque, en primer lugar, «me percaté que, para comprender la constitución del átomo, era indiferente ser alemán o danés o inglés, y después aprendí que en la ciencia no se trata de fe, ni de opinión ni de hipótesis».

La validez universal de la ciencia puede conducir —y debe hacerlo—, por una parte, a la formación cultural de la sociedad, formación exenta de opiniones y de prejuicios. La ciencia es cultura, y descubrir o aprender los secretos del comportamiento de la naturaleza es motivo de una satisfacción intelectual que

debe llegar a todo el mundo. Por otro lado, esta misma validez proporciona una base para vislumbrar aplicaciones nuevas del conocimiento adquirido. Tal como decía un erudito: «es impensable producir ciencia aplicada sin disponer de ciencia susceptible de ser aplicada».

El campo de la física de partículas es de investigación básica en ciencia fundamental y no necesitaría responder la típica cuestión que plantean los políticos y otra gente: «¿para qué sirve?», pero la responde. Como Faraday respondió allá por los años 30 del siglo XIX a los miembros del Parlamento británico que le hicieron esta misma pregunta cuando él les explicaba el interés de la investigación que combinaba circuitos eléctricos e imanes. Según consta en las Actas del Parlamento británico, dijo: «No sé si mis investigaciones servirán algún día, pero si lo hacen, ustedes imputarán impuestos a los ciudadanos por los beneficios que comportarán». Las palabras de Faraday fueron proféticas, porque el fenómeno de inducción magnética es un ingrediente fundamental del electromagnetismo unificado, base de la tecnología y de las comunicaciones desarrolladas a lo largo del siglo XX.

Dado que la física de partículas es una ciencia fundamental, los conocimientos adquiridos en sus objetivos, como la propagación de partículas y radiaciones a través de la materia, o bien por los medios necesarios para experimentar en física de altas energías, como la criogenia para los vacíos o la tecnología de imanes superconductores, han generado excelentes aplicaciones que han retornado a la sociedad un valor añadido considerable que multiplica los beneficios económicos y sociales. Además, la atmósfera de libertad intelectual que proporciona un laboratorio como el CERN es estimulante: no es casualidad que un avance tan considerable para la información como la invención de la web, gracias a la cual no es preciso transmitir la información sino acceder a la que haya depositada en los portales, ha tenido lugar en el CERN. Y, en el mismo camino, la física médica es últimamente un capítulo de enorme trascendencia social con las aplicaciones de aceleradores y detectores a la terapia y la imagen médica. Puesto que la física médica es un área de la física de partículas con investigación orientada, en los grandes laboratorios han surgido grupos de investigación básica, se han desarrollado conceptos y dispositivos en

colaboración internacional para la aplicación en medicina. Es el caso del IFIC, centro mixto de la Universidad de Valencia y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, donde, además de participar en ATLAS y en la búsqueda del bosón de Higgs, participa en proyectos europeos, también coordinados por el CERN, de física médica, como PARTNER, de terapia, o ENVISION, de imagen. Y desde el IFIC ha surgido el proyecto IFIMED de física médica, tan ilusionante para la sociedad valenciana y española.

En momentos como los actuales, de incertidumbre para el futuro de la investigación científica en España, quiero proclamar unos cuantos hechos. Ha costado más de 40 años, en este país, llegar a situaciones de excelencia como las obtenidas en los últimos años. Las cosas se han hecho bastante bien en política científica, y ahora la física española ocupa el noveno lugar mundial en todos los indicadores de evaluación. Y la Facultad de Física de la Universidad de Valencia hace años que ya entró, como a única representación española, en el selecto grupo de los 100 mejores centros mundiales de estudios de física, en el ranking internacional preparado por la Universidad de Shanghai, un ranking en el que ocupa aproximadamente la posición 70. Y la apertura de nuevas líneas de investigación dirigidas por los investigadores del Programa Ramón y Cajal ha supuesto un impulso extraordinario a la calidad de los centros españoles, su internacionalización y una mayor visibilidad mundial. Si no se continúa alimentando esa política científica, el equilibrio dinámico necesario para mantener el nivel de excelencia científica de los centros se derrumbará en pocos años. Y dado que es imposible de recuperar –de nuevo necesitaríamos décadas– España volvería a perder, como en tantas otras ocasiones de la historia, el tren de las sociedades científicas avanzadas, hacia las que vamos haciendo camino.

En *La perspectiva científica*, Bertrand Russell escribe:

He visto como la tierra se vuelve roja al atardecer, el rocío destellante del alba y la nieve brillante bajo un sol glacial; he olfateado la lluvia después de la sequía, y he sentido el tempestuoso Atlántico batiendo las costas de granito de Cornualles. La ciencia puede otorgar estas y otras alegrías a más gente de la que de otro modo las hubiera podido disfrutar. Si se utiliza así, será sabiamente utilizada.

Este bellissimo canto de Russell a ese futuro de una sociedad científica avanzada, de la que he hablado antes, puede cerrar mis reflexiones sobre el tema: España no puede quedar al margen, y el poder de la ciencia será transmitido y vivido por la sociedad.

Valencia, septiembre de 2012