



## Espacio, Tiempo, Materia

Francisco J. Ynduráin

### INTRODUCCIÓN

Entre los años 1918 y 1928, Herman Weyl escribió dos de los libros más influyentes en la Física (y las Matemáticas) de la primera mitad del siglo: *Raum, Zeit, Materie* (Berlín, 1918) y *Gruppentheorie und Quantenmechanik* (2ª edición de 1931, Leipzig). Los títulos y contenidos de ambos reflejaban los avances espectaculares de la Física en los primeros veinte años de nuestro siglo, específicamente en comprender el espacio, el tiempo y la materia que forman la trilogía del título del primero de dichos libros: avances que habían hecho posible el desplazar estas tres categorías del nebuloso terreno de la metafísica al de la ciencia positiva. Weyl, que además de un gran matemático y físico era una persona de alto nivel cultural y profundos intereses filosóficos, no era ajeno a este carácter fundamental que tenía la construcción de teorías del espacio-tiempo (la relatividad) y de la dinámica de la materia (la mecánica cuántica). Como escribe en el prólogo de *Raum, Zeit, Materie*, "Mit der Einsteinsche Relativitäts-theorie hat das menlichen Denken über den Kosmos eine neue Stufe erklommen".\* Efectivamente, es difícil exagerar la revolución en el pensamiento humano que la relatividad y la mecánica cuántica implicaban: como botón de muestra mencionaré el siguiente ejemplo.

La filosofía Kantiana, a través de la obra del propio Kant y de sus discípulos (que van desde Fichte y Hegel hasta Marx) fue sin duda la dominante en la Europa del siglo XIX. Piedra angular de dicha filosofía es la noción de categorías, entre las que ocupan un lugar central el espacio y el tiempo. Según Kant, el espacio y el tiempo no tienen realidad objetiva; son estructuras propias de la mente humana ("categorías") que ésta emplea para ordenar el universo material. Por su-

puesto, tal concepción se derrumba cuando la relatividad conlleva una determinación experimental de la estructura del espacio-tiempo; y, en particular, la relatividad general implica que dicha estructura es no-Euclídea, es decir, *distinta* de la que la mente humana considera como natural.

A setenta años de los libros de Weyl tanto la relatividad como la mecánica cuántica han superado todas las pruebas experimentales a las que se les ha sometido. Y esto hasta el punto de que muchos físicos están convencidos de que tales esquemas son realmente descripciones de la estructura última de la naturaleza: a pesar de que no están exentas de problemas, una escuela de pensamiento considera a estas dificultades meramente técnicas —no fundamentales. Aunque algunos de estos problemas los discutiremos más adelante, voy a indicar ya dos de ellos. En primer lugar, mencionamos que no existe aún hoy una formulación de la relatividad *general* compatible con la mecánica cuántica: a pesar de que en los años setenta se completó la descripción de todas las interacciones, excepto la gravitatoria, por teorías consistentes con la relatividad restringida y la mecánica cuántica. Algunas de las modernas especulaciones en física de partículas elementales se deben, precisamente, a un intento de extender esta consistencia de la relatividad *restringida* a la *general* y por ende a la interacción gravitatoria.

La segunda cuestión es tal vez filosófica más bien que física, y es el conocido problema de la medida en mecánica cuántica. Su solución, probablemente, requerirá el abandonar o bien la lógica Aristotélica, o la noción de que nuestro *universo* es único. Sobre ambos problemas volveremos más adelante.

### EL PARADIGMA ACTUAL, Y MÁS ALLÁ. LAS INTERACCIONES FUNDAMENTALES

La relatividad y la mecánica cuántica (espacio, tiempo y materia) describen el *marco* en el que actúan las distintas interacciones que operan en el universo; un problema distinto es el de la naturaleza de dichas interacciones. Para obtener una imagen del universo no basta con saber que cualquier interacción debe ser invariante relativista, y debe obedecer las leyes de la mecánica cuántica: es necesario determinar qué interacciones específicas utiliza la naturaleza, y cómo actúan.

El problema está lejos de ser trivial. La estructura de las fuerzas más familiares, las electromagnéticas, se determinó bastante pronto; ya en 1929 Dirac realizó los primeros cálculos de interacción de la radiación con la materia, y en los años 40-50, gracias a los trabajos de, entre otros, Schwinger y Feynman, se construyó una teoría (electrodinámica cuántica) perfectamente compatible con los principios básicos de la relatividad y la mecánica cuántica y con una capacidad predictiva impresionante. No es este el lugar de presentar una lista de los test de precisión de la electrodinámica cuántica, que la hacen (y de lejos) la teoría más exacta que conocemos; baste decir que el acuerdo entre teoría y experimento llega en muchos casos a las diez o incluso doce cifras decimales significativas.\*\*

Las interacciones débiles y las interacciones fuertes tardaron más tiempo en ser descifradas. Hubo que esperar a los años 71-73 en los que se produjeron la demostración por 't Hooft de la renormalizabilidad del modelo de Glashow-Weinberg-Salam, y el descubrimiento de la propiedad de libertad asintótica (Gross, Wilczek y Politzer), para obtener teorías consistentes con la relatividad y mecánica cuántica de

\* "Con la teoría de la relatividad, el pensamiento humano ha ascendido un nuevo escalón en su comprensión del cosmos".

\*\* Una descripción, a nivel asequible, de los más precisos cálculos teóricos y medidas experimentales en electrodinámica cuántica puede verse en alguno de los artículos publicados con motivo del centenario del descubrimiento del electrón por la revista Arbor, Núm. 622, octubre 1997.

Nota del editor, véase REF, Vol. 12, nº 3, pág. 10 (año 1997).

estas interacciones; teorías que, además, han superado con éxito todas las confrontaciones experimentales realizadas hasta la fecha. Como ilustración de este acuerdo teoría-experiencia mencionaré un ejemplo para cada interacción.

En el caso de las interacciones fuertes, que involucran en particular a quarks, tomamos una situación parecida a la del familiar átomo de hidrógeno. Los quarks de tipo *b* y su antipartícula forman estados ligados, llamados *bottomio*, cuyas energías son de unos diezmil MeV. Como en el caso electromagnético, los detalles de las energías dependen de los espines y momentos angulares. En particular, la diferencia de energía entre los estados con número cuántico principal 2, y momento orbital 1 y cero es de

$\Delta = 123 \text{ MeV}$ ; (experimentalmente);

$\Delta = 162 \pm 38 \text{ MeV}$ ; teóricamente.

Este acuerdo, un efecto del orden de milésimas de la energía total es tal vez, a pesar de ser mucho menos preciso que en el caso electromagnético, más impresionante. En efecto, el cálculo teórico es tan complicado que sólo ha sido completado muy recientemente. El motivo es que al nivel de exactitud requerido por el experimento es obligatorio tener en cuenta no sólo efectos relativistas, y efectos cuánticos de orden elevado, sino incluso la estructura del propio vacío. La medida experimental es también muy difícil y ha sido realizada en los años ochenta.

Con respecto a las interacciones débiles, mencionaré que los espléndidos experimentos de LEP (1990-93) han determinado la anchura  $\Gamma$  (indefinición en energía) de la partícula *Z* con una gran exactitud:

$$\Gamma(\text{exp}) = 2.487 \pm 0.010 \text{ GeV}.$$

Pues bien, esta cantidad se conocía ya con casi la misma precisión a través de cálculos teóricos realizados en la década de los 70: varios años antes de que se *descubriera* la partícula *Z*, predicha con todas sus propiedades por la teoría, y con más de quince años de anticipación a los experimentos de LEP citados.

### El modelo estándar, y sus problemas

Imagino que lo dicho hasta ahora habrá dejado la impresión, correcta, de que contamos con una teoría coherente y extraordinariamente exitosa de las interacciones que operan en el microcósmos. En efecto, el modelo ("mo-

delo estándar") que incorpora las teorías de campos cuánticos de interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles ha superado todas las confrontaciones con la evidencia experimental: desde las energías más pequeñas hasta el TeV largo que se alcanza en el laboratorio Fermilab de Illinois; desde la precisión de las medidas de masas de estados ligados o de momentos magnéticos, a baja energía, hasta las fabulosas del acelerador LEP en el CERN (Ginebra), realizadas a casi 200 GeV. En lo que queda de esta exposición yo consideraré el modelo estándar como establecido experimentalmente, aunque presenta todavía algunos problemas conceptuales, sobre todo en el sector electrodébil. En efecto: la teoría que describe estas interacciones es muy peculiar. Es la única teoría en la que la invariancia gauge está rota, y las partículas intermedias tienen masa. El mecanismo por el que adquieren masa es altamente sospechoso: consiste en suponer que el vacío está lleno (!) de un campo que únicamente interacciona con las partículas con masa. Esto no sólo recuerda al éter, sino que presenta problemas similares a los de éste; en particular una constante cosmológica inaceptable. Por otra parte, la partícula correspondiente a dicho campo es la única que aún no se ha encontrado. Finalmente, las masas de las partículas (de origen electrodébil en el modelo estándar) tienen valores que parecen escogidos al azar, variando en más de cinco órdenes de magnitud.

### Más allá del modelo estándar. Las teorías de cuerdas

A pesar de los problemas que acabamos de mencionar, los éxitos del modelo estándar son tales que pocos físicos competentes dudan de que la solución de sus dificultades involucrará una teoría que *contenga* al modelo estándar. Por ejemplo, algunos de los problemas de éste se solucionan en las llamadas teorías de gran unificación en las que las tres interacciones del modelo resultan ser tres aspectos de una sola interacción unificada.

El problema, o si se prefiere la carencia más importante del modelo estándar, es lo que *no trata*. El modelo estándar describe interacciones de partículas sin dimensiones, que se mueven en el espacio y el tiempo: pero no dice nada acerca de este espacio y este tiempo. Tampoco dice nada de la

*materia* que interacciona: ni por qué es lo que experimentalmente encontramos, ni de dónde viene, ni por qué hay la cantidad que hay. Podemos decir que, con respecto al espacio, el tiempo y la materia, el modelo estándar de las interacciones fundamentales no aporta apenas nada, y la visión que tenemos de las tres "categorías" es casi la misma que en la época en que Weyl escribió sus libros.

Nótese que he dicho *casí*. La razón es que, aunque no hay *teorías físicas* (esto es, modelos autoconsistentes validados por pruebas experimentales) sí que hay *especulaciones*, sugeridas (más que demostradas) por hechos experimentales, en las que el espacio, el tiempo y la materia son deducidos de estructuras más fundamentales. En particular, la más popular de estas especulaciones, las teorías de cuerdas, que discutiré brevemente, tienen implicaciones importantes sobre (entre otras cuestiones) la dimensión del espacio-tiempo. Y aunque yo no soy la persona más idónea para presentar una descripción detallada de las teorías de cuerdas, sí es pertinente indicar algunas de sus ideas básicas.

Las teorías relativistas de campos cuánticos, en las que se basa el modelo estándar, describen las interacciones de partículas puntuales, esto es, sin dimensiones. En las teorías de cuerdas se supone, por el contrario, que los objetos primordiales tienen dimensiones de longitud, y son de hecho como cuerdas vibrantes. La mecánica cuántica indica que las vibraciones de tales objetos están cuantizadas de forma discreta, y la teoría de cuerdas identifica dichas vibraciones como las partículas que conocemos.

Nadie ha demostrado la existencia de teorías de cuerdas autoconsistentes, ni se ha comprobado rigurosamente que contienen al modelo estándar en un límite apropiado. Pero hay, sin embargo, indicaciones (cuán serias depende de a quién se pregunte) de que efectivamente en tales teorías cabe no sólo el modelo estándar: además (y esto es probablemente lo más atractivo de las teorías de cuerdas) las indicaciones apuntan a que éstas contienen a la gravitación.

El siguiente aspecto atractivo de las teorías de cuerdas, y el que más nos va a interesar aquí, es que tales construcciones sólo son compatibles con la relatividad y la mecánica cuántica si el espacio-tiempo tiene una dimensión específica\*. Concretamente,

\* No está claro que esto sea una consecuencia rigurosa de la estructura de cuerdas. En efecto, recientes investigaciones apuntan a que se pueden construir teorías de cuerdas en *cualquiera* dimensión con tal de modificar apropiadamente la acción de partida.

las cuerdas cuántico-relativistas sólo pueden existir en un espacio de 26 dimensiones, si las cuerdas vibran únicamente con modos bosónicos, o en uno de 10 si se admiten modos bosónicos y fermiónicos.

Aparentemente, lo dicho sobre el número de dimensiones del espacio-tiempo, obviamente excesivo, debería ser suficiente para rechazar las teorías de cuerdas: sin embargo, esto no es así. Los físicos que trabajan en estas teorías esperan que en ellas se dé un mecanismo como el descrito por Kaluza y Klein en un modelo sencillo, en el que las dimensiones superfluas se enrollan sobre sí mismas con un radio tan pequeño que es indetectable con los aparatos de que disponemos hoy en día.

Esta meta está, sin embargo, bastante lejos aún: y eso en el caso de que el camino a través de teorías de cuerdas y el mecanismo de Kaluza-Klein fuese el correcto. Por este motivo, y por mi ignorancia al respecto, no voy a dedicar mi esfuerzo aquí a explicar la justificación teórica de las implicaciones de modelos, de cuerdas u otro tipo, sobre la estructura del espacio, del tiempo o de la materia. Más bien, voy a intentar describir algunas de las cosas que *experimentalmente* sabemos con respecto a estas tres categorías. Serán las *preguntas*, más bien que las respuestas, las que estarán inspiradas por las especulaciones teóricas más allá del modelo estándar.

Por supuesto, tampoco los temas y las cuestiones que voy a tratar son los únicos: ni siquiera los más importantes. Los he escogido por la razón obvia de ser con los que estoy más familiarizado, sea por haber trabajado sobre ellos, sea por haberme interesado especialmente.

## ESPACIO

Como ya se ha dicho, en las teorías de cuerdas o, más generalmente, en los modelos de tipo Kaluza-Klein se comienza en un espacio con muchas dimensiones, que posteriormente se reducen a las tres que nos son familiares (voy en esta sección a suponer que el tiempo es único). Una pregunta relevante a este respecto es, precisamente, con cuánta seguridad podemos afirmar que la dimensión del espacio es tres.

Aparentemente, esta pregunta es infantil. No es difícil demostrar matemáticamente que un espacio lineal de dimensión finita tiene que tener una dimensión entera. Cualquier chico que se escapa del jardín del colegio sal-

tando la tapia sabe que hay más de dos dimensiones; y todo el que haya comprobado que de una habitación sólo se sale abriendo la puerta (o una ventana) certifica que no hay cuatro.

Sin embargo las cosas no son tan simples. Una teoría que contenga la gravitación y la mecánica cuántica tiene por fuerza que contemplar fluctuaciones incluso de la estructura del espacio. Hay indicaciones serias de que estas fluctuaciones implican conexiones múltiples en este espacio (los "wormholes" de Wheeler) que adquiriría así una estructura altamente compleja que Hawking ha descrito con el gráfico término de "espuma". El espacio, por tanto, no es lineal sino que se parece más bien a un fractal: y es bien sabido que los fractales tienen en general dimensiones no enteras. El problema que nos debemos plantear es, por tanto, el siguiente: si denotamos por  $3+\epsilon$  a la dimensión (de Hausdorff, si queremos ser matemáticamente precisos) del espacio, ¿qué límites pone el experimento al valor de  $\epsilon$ ?

### Cotas sobre dimensiones extra no-compactas

Un resultado muy preciso puede obtenerse utilizando las desviaciones de la ley de Coulomb, y de la de Newton, que ocurrirían si el espacio tuviese una dimensión no entera. Para dimensión  $n = 3 + \epsilon$ , esperamos que las fuerzas gravitatorias y eléctricas sigan respectivamente las leyes

$$\frac{G_N(\epsilon) m M}{r^{2+\epsilon}} ; \frac{e_1 e_2(\epsilon)}{r^{2+\epsilon}},$$

lo que intuitivamente se comprende bastante bien: el flujo (electromagnético o gravitatorio) se extiende sobre esferas con superficies de  $2+\epsilon$  dimensiones.

La modificación de la ley de Coulomb tiene consecuencias en la modificación del efecto Lamb o del momento magnético del electrón, y proporciona una cota del orden de  $10^{-8}$  para  $\epsilon$  que no vamos a discutir. La modificación de la ley de Newton nos da información sobre grandes distancias, e incluso sobre regiones fuera del sistema solar.

En esencia, la situación es como sigue. Cuando una partícula está sujeta a un potencial, su trayectoria no es en general cerrada. Sólo en el caso de un potencial proporcional a  $1/r$ , o a  $r^2$ , vuelve la partícula exactamente a la situación de partida después de cada revolución. Si la interacción es proporcional a  $1/r^{1+\epsilon}$ , como ocurriría si la dimensión del espacio fuese  $3 + \epsilon$ , la

trayectoria, por ejemplo de un planeta, no sería cerrada y su perihelio efectuaría un movimiento de precesión. Movimiento de precesión que, por supuesto, se añadiría al debido a la perturbación producida por otros planetas y a la causada por efectos de relatividad general. Un sencillo cálculo nos indica que la precesión debida a dimensiones extra es de  $\pi \epsilon$  (en radianes por revolución).

Para comparar con resultados observacionales hay, en primer lugar, que sustraer de éstos las contribuciones extrañas a la alteración dimensional: en segundo lugar, cambiar de las unidades naturales (radianes por revolución) en que se obtiene el resultado mencionado, a las utilizadas por los astrónomos (segundos de arco por siglo). En el sistema solar se conoce muy bien la precesión del perihelio de Mercurio,

$$(142.11 \pm 0.45'' - 43.03'' = 0.92 \pm 0.45'')$$

por siglo y la cantidad sustraída es la contribución de la relatividad general. De aquí se sigue que  $\epsilon$  tiene que ser menor que  $1.7 \times 10^{-9}$ . Resultados similares se obtienen de la precesión de los perihelios de Venus, la Tierra o el asteroide Icaro. Pero más interesante es que este tipo de argumentos nos permiten encontrar resultados lejos del sistema solar. En efecto, el sistema estelar binario PSR 1913+16 se encuentra a unos diezmil años luz de la tierra. En este sistema, formado por un objeto invisible (tal vez un agujero negro o una estrella de neutrones) con un compañero visible se han realizado excelentes medidas de la precesión del periastró. Se obtiene la cota  $\epsilon < 1.5 \times 10^{-9}$

### Dimensiones compactas

Los resultados descritos en lo que precede muestran que la dimensión del espacio es con gran precisión 3, con un error máximo de uno en mil millones. Sin embargo, todos los efectos discutidos tienen lugar a distancias relativamente grandes: millones, o miles de millones de kilómetros en el caso de la precesión del periastró,  $10^{-8}$  cm en el caso del efecto Lamb anómalo o  $10^{-12}$  cm en el caso del momento magnético del electrón: pero no dicen nada de eventuales dimensiones *compactas*. Por ejemplo, en las teorías de cuerdas con el mecanismo de Kaluza-Klein, se espera que las dimensiones extra tengan un tamaño del orden de la longitud de Planck,  $10^{-32}$  cm. Tanto los movimientos de los planetas, como los de los electrones, son indiferentes a la posible existencia de dimensiones tan minúsculas. Las únicas consecuencias relevantes para el

tema que aquí nos interesa de la existencia de estas dimensiones compactas son una modificación del principio de incertidumbre de Heisenberg, y la existencia, para cada partícula, de una serie de estados excitados.

El principio de incertidumbre de Heisenberg dice que

$$(\Delta x) (\Delta p) \geq \hbar,$$

con  $\Delta x$  la incertidumbre de la posición, y  $\Delta p$  la incertidumbre del impulso de una partícula. En una teoría de cuerdas tendríamos, en lugar de esto, la relación

$$(\Delta x) (\Delta p) \geq \hbar + a^2 (\Delta p)^2 / \hbar,$$

donde  $a$  es la longitud de la cuerda. También la masa de los estados excitados dependería de  $a$ : el estado excitado de un electrón (por ejemplo) tendría una masa de  $m(e^*) = \hbar / ac$ .

En las teorías de cuerdas se espera que  $a$  sea del orden de la longitud de Planck, unos  $10^{-32}$  cm. Con esto, la modificación de la relación de incertidumbre es despreciable; y el valor esperado para las masas de los estados excitados resulta unas  $10^{19}$  veces la masa del protón, incomparablemente más grande que las cotas conocidas (unas  $10^3$  veces la masa del protón). Por supuesto, éste es uno de los problemas más graves de la teoría de cuerdas: sus predicciones están muchos órdenes de magnitud más allá de los que podemos medir, tanto ahora como en un futuro previsible.

## TIEMPO

La existencia de dimensiones compactas (además de las  $3 \pm 10^{-9}$  no compactas que nos son familiares) no lleva a consecuencias espectaculares. La existencia de estados excitados de gran masa de las partículas elementales, o una mínima modificación de la relación de incertidumbre no tienen gran importancia práctica: necesitaríamos experimentos extraordinariamente precisos (muchos órdenes de magnitud más que los imaginables en un futuro próximo) para detectarlo. La situación es muy distinta si hubiese varios *tiempos*, aunque sus dimensiones fuesen compactas.

La existencia de varios tiempos no sólo es posible, sino muy probablemente inevitable, en una teoría tipo cuerdas que incorpore a la gravitación. En efecto, si el tensor métrico es

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu},$$

con  $\eta_{\mu\nu}$  el del espacio-tiempo ordinario, y  $h_{\mu\nu}$  representa fluctuaciones cuánticas, es difícil de imaginar qué mecanismo puede utilizarse para evitar que estas fluctuaciones cambien la signatura. No hay ninguna razón a priori que implique que las seis dimensiones extra que son, como mínimo, necesarias para una teoría de cuerdas autoconsistente tengan que ser todas espaciales.

La pregunta que nos vamos a hacer ahora es la siguiente: ¿qué ocurriría si además del tiempo que conocemos existieran otras dimensiones temporales? Para ser precisos, suponemos que existiera una dimensión temporal compacta extra. El tamaño de este "tiempo" compacto (que denotaremos por  $\tau$ ) no lo sabemos, pero esperamos que sea del orden del tiempo de Planck,

$$10^{-32} \text{ cm}/c \sim 10^{-43} \text{ segundos.}$$

A primera vista la existencia o no de un tiempo extra confinado en un intervalo tan pequeño debería ser irrelevante. Lo cierto es que no es así: si existen varias dimensiones de tiempo se producen violaciones de la causalidad. Por decirlo de forma literaria, la existencia de varias dimensiones de tiempo nos permiten escaparnos del presente (por las dimensiones extra) al pasado o al futuro, con las consiguientes y consecuentes paradojas acausales: cualquier lector de ciencia ficción puede imaginar muchas de ellas.\*

Si las dimensiones temporales extra son tan pequeñas como el tiempo de Planck, la probabilidad de que un objeto tan grande como un ser humano se cuele a través de ellas es absolutamente minúscula. Sin embargo, los protones de un núcleo, o dos quarks de un protón, sí pueden hacerlo, y entonces nos encontraríamos con que *todos* los núcleos serían intrínsecamente inestables: uno, o varios de sus protones podrían, de cuando en cuando, desaparecer yéndose a mañana, o a la semana pasada. O también podría aparecer un nuevo protón que viniese del próximo mes. En estos casos, el nuevo núcleo sería, con buena probabilidad, inestable.

Las mejores cotas sobre la inestabilidad de la materia son las establecidas por los experimentos dedicados a intentar detectar doble desintegración beta, o desintegración del protón. La cota obtenida es de unos  $10^{30}$  años para la estabilidad de la materia. Esta cota implica que las dimensiones temporales extra, de existir, deberían tener

una duración de como máximo  $10^{-44}$  segundos —diez veces menos que el intervalo temporal de Planck.

La manera de obtener este resultado es relativamente sencilla. La interacción electromagnética entre dos partículas se debe al intercambio de fotones entre ellas, lo que genera el potencial Coulombiano

$$\frac{e_1 e_2}{r}$$

Si el fotón, en su camino de una partícula a otra, ha podido pasearse por los tiempos extra, el potencial que se obtiene es ligeramente distinto:

$$\frac{e_1 e_2}{r} + \frac{2 e_1 e_2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-in\pi / \tau}.$$

El potencial extra es complejo, y por tanto implica violaciones de causalidad. Por ejemplo, en mecánica cuántica, la cantidad

$$\int d^3r |\Phi(r,t)|^2,$$

representa la probabilidad de encontrar la partícula con función de onda  $\Phi$  en algún lugar del universo en el instante  $t$ . Si la partícula está sujeta a un potencial complejo, dicha cantidad no se conserva con el tiempo: lo que puede interpretarse como indicando desaparición o creación espontánea de materia.

## MATERIA

Según Aristóteles la materia es eterna e indestructible. Lavoisier formuló este principio de forma más científica como la ley de conservación de la materia (de hecho, Lavoisier la enunció realmente como una ley de conservación de los elementos químicos). Desde la formulación de la relatividad de Einstein sabemos que materia y energía son equivalentes, y una puede transformarse en la otra: de manera que cabe plantear el problema de la existencia de la materia, y la energía, que detectamos a nuestro alrededor.

El problema se puede desgranar en varios subproblemas. En primer lugar, la conversión de materia en energía sólo se ha constatado cuando se crean (o se aniquilan) partículas y *anti*-partículas. La aniquilación de un par protón-antiprotón en energía pura, o la creación a partir de ésta de un par protón-antiprotón es algo que se realiza rutinariamente en varios laboratorios del mundo; pero nadie ha visto a un protón desaparecer en energía, o

\* Los problemas derivados de violaciones de la causalidad, en particular en conexión con desplazamientos en el tiempo pueden verse en el ameno —y serio— libro de P. Nahin, *Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, American Institute of Physics, 1993.

que ésta cree una sola partícula, sin su antipartícula correspondiente. ¿Es esto así porque tales procesos son imposibles, o sólo porque son improbables?

Ligado a este problema está el de la simetría partícula-antipartícula. Las leyes que rigen la naturaleza, el modelo estándar que se mencionó al principio de esta exposición, son simétricas bajo el cambio de materia en antimateria. (Para expertos diré que dicho cambio debe incluir el de "derecha" en "izquierda" y una inversión del movimiento.) Sin embargo, en el universo que nos rodea la materia domina de forma aplastante: sólo en algún raro rayo cósmico se encuentran antipartículas. Por supuesto, las partículas y antipartículas se aniquilan al encontrarse, por lo que no es sorprendente que no queden, por ejemplo en nuestro sistema solar, restos de una hipotética antimateria primigenia. Lo que sí es sorprendente es que al parecer no existen otros sistemas solares, ni otras galaxias, hechos de antimateria: la evidencia, en algunos casos aplastante, es que todos están hechos de la misma materia que nosotros, y contienen tan poca antimateria como el sistema solar. Como un ejemplo espectacular mencionaré los neutrinos provenientes de las nubes de Magallanes.

En el año 1987 explotó una supernova en las nubes de Magallanes (que son pequeñas galaxias próximas a la nuestra). Como toda explosión nuclear, esta produjo gran cantidad de neutrinos; los cuales, por viajar a la velocidad de la luz, fueron detectados por varios laboratorios terrestres coincidiendo con el fogonazo óptico. Tales neutrinos eran precisamente del tipo que podía esperarse si la supernova estaba constituida por materia (en lugar de antimateria).

Finalmente tenemos el problema de la propia existencia de la materia, o de la energía primordiales. Aquí somos más ambiciosos y no sólo nos planteamos el por qué hay materia (y no antimateria, o apenas) en nuestro universo, sino que también examinamos la existencia misma de la energía primigenia: ¿hay que postular esta existencia, como una hipótesis externa a la Física, o ésta tiene algo que decir al respecto?

No es posible afirmar nada definitivo con respecto a ninguna de las preguntas que planteamos. Con respecto a las primeras podemos adelantar posibles soluciones, desgraciadamente aún no contrastadas experimentalmente; con respecto a la última tenemos que contentarnos con especulaciones.

## La radiación de fondo, la asimetría materia-antimateria, y la negativa del protón a desintegrarse

Uno de los descubrimientos más fundamentales de nuestro siglo fue el de la llamada "radiación de fondo" (Wilson y Penzias): esto es, que todo el espacio está lleno de una radiación electromagnética, prácticamente isotropa, constituida por fotones de muy poca energía (correspondiente a unos 3 grados Kelvin). La cantidad de estos fotones es inmensa, mil millones de fotones por cada partícula material. El número, y las características de la radiación de fondo son lo esperable si el Universo comenzó con una gran explosión: su extraordinaria densidad sugiere que en tal comienzo el universo pudo ser energía pura, y la materia una mera fluctuación.

Para que esto sea posible es necesario que haya interacciones que conviertan energía en materia, sin necesidad de introducir antimateria: por ejemplo, que convierta dos fotones en un átomo de hidrógeno. Si no existiesen tales interacciones, en el big bang se hubiese producido tanta materia como antimateria, lo que, como ya se contó, es contrario a la evidencia observacional. Si, por el contrario, efectivamente existen estas interacciones, también se podrá desintegrar la materia: más pronto o más tarde, el hidrógeno, y todos los elementos materiales se desintegrarían en radiación. El estado actual del universo sería pues una pequeña asimetría transitoria entre el big bang y el estado final, ambos consistentes en energía (radiación) pura sin presencia de partículas.

A finales de los años setenta y principios de los ochenta parecía que el problema estaba en vías de solución. En efecto, en esa época se encontró que las llamadas teorías de gran unificación (en las que las tres interacciones del modelo estándar se unifican en una sola) predicen, efectivamente, la desintegración de la materia en radiación y por supuesto el proceso inverso; el ritmo con el que esto ocurre,  $10^{29}$  años, estaba dentro de las posibilidades de medida experimental. Aquello lanzó una carrera en la que media docena de laboratorios trataron de encontrar sucesos en los que alguno de los protones de un núcleo de materia se desintegrare; e incluso, en 1982, parecía haber un candidato para tal tipo de procesos.

Desgraciadamente tal candidato no ha sido confirmado; y, del resultado negativo de los experimentos de desintegración del protón, hoy sabemos que el ritmo de estos procesos (si exis-

ten) es mucho más lento que lo predicho por las teorías de gran unificación: como mínimo unos  $10^{33}$  años. De paso, estos resultados asestan un golpe de muerte a dichas teorías, por lo menos en su versión más sencilla.

¿Quiere esto decir que no es posible crear materia a partir de energía sin crear antimateria? En absoluto. Además de los mecanismos que aparecen en los diferentes modelos de gran unificación existen los que se dan en teorías de gran unificación *super-simétrica*. También hay conversión de materia en energía catalizada por monopolos magnéticos o agujeros negros o, sin salir del modelo estándar, por instantones. Desgraciadamente, los correspondientes procesos son muy difíciles de observar experimentalmente.

## Energía

Sea cual sea el mecanismo, es muy probable que sea posible convertir radiación en materia (sin producir antimateria); y es también probable que sea eso exactamente lo que ocurrió al principio del universo: en el big bang, originariamente, tal vez sólo hubiese energía pura.

¿Es posible ir más allá? ¿Existe al menos como posibilidad teórica el que la propia energía se cree espontáneamente? Nótese que no me estoy refiriendo a la creación o aniquilación de energía en materia y antimateria (suceso trivial que ocurre todos los días en varios laboratorios); ni la producción de energía al desaparecer materia, sin la ayuda de antimateria, que hemos discutido en el apartado anterior: queremos considerar la creación de energía, o materia *ex nihilo*.

*Ex nihil nihilo*, dice el aforismo escolástico; la experiencia y el sentido común parecen darle la razón. Curiosamente, sin embargo, lo difícil no es construir teorías con creación espontánea de energía, sino todo lo contrario. Hay que ir con mucho cuidado al formular cualquier teoría que incorpore a la relatividad y a la mecánica cuántica para que no implique, inevitablemente, violaciones de causalidad y no-conservación de probabilidad y, por tanto, aparición y desaparición espontánea de materia. De hecho, el mismo modelo estándar contiene interacciones (el sector electromagnético  $-U(1)$  para los expertos— y el campo de Higgs) que, si nos los tomamos literalmente, nos llevan a, precisamente, los comportamientos mencionados.

Con respecto a este problema hay dos actitudes posibles. Una es considerar que las leyes de conservación de la probabilidad y la causalidad son sacrosantas; y por tanto debemos in-

tentar modificar nuestras teorías, en particular el modelo estándar, para que dichos principios se cumplan. La otra es pensar que lo más que podemos decir, *científicamente*, es que no se han observado experimentalmente (al menos de manera fiable) procesos de aparición y desaparición de materia o energía. Tales procesos podrían sin embargo ocurrir o a ritmos muy lentos, o a energías muy elevadas: y la tarea de un científico es poner límites experimentales a estos ritmos o energías.

Con respecto al *ritmo* a que tales procesos tienen lugar, dentro de los intervalos de energías accesibles en nuestro entorno, la mejor cota la proporcionan, como para tantos otros de los procesos extraños mencionados en lo que antecede, los experimentos dedicados a intentar medir la vida media del protón. De ellos, y como ya se dijo, resulta que cualquier proceso de creación o desaparición espontánea de energía tiene que ocurrir con una lentitud de al menos  $10^{30}$  años.

La precisión experimental que implica tan largo periodo de tiempo es suficiente para proporcionarnos interesante información. Nuestra vieja conocida, la teoría de la electrodinámica cuántica, produciría lo que se llama un "polo de Landau" a energía menor que la de Planck si hubiese demasiadas partículas elementales con carga eléctrica. Tal polo generaría aparición y desaparición espontánea de materia a un nivel *incompatible* con la cota experimental. Para las personas con conocimientos técnicos, indicaremos que una electrodinámica supersimétrica con los cuatro dobletes de Higgs necesarios para implementar el mecanismo de Peccei-Quinn parece excluida por producir excesiva materia *ex nihilo*.

La propia teoría estándar de las interacciones débiles también llevaría a creación de materia más allá de los límites experimentalmente aceptables, y ello a través de la partícula de Higgs, si la masa del quark *t* fuese muy superior a unas 180 veces la del protón. Experimentalmente sabemos que  $m_t$  es, precisamente, unas 180 veces la masa del protón: la teoría parece consistente, pero no por un gran margen.

De todas maneras, el modelo estándar implica creación espontánea de materia, salvo que se le modifique sustancialmente. Esta creación espon-

tánea, si ocurre, lo hace (como ya hemos dicho) a un ritmo indetectable a las energías actualmente accesibles; pero el ritmo crece con la energía y la creación espontánea ocurre copiosamente en el Big Bang. Esta, y otras razones, nos pueden llevar a especulaciones frente a las que las mencionadas hasta ahora palidecen. Aunque yo no soy, ni mucho menos, experto en el tema, voy a concluir este discurso con unas brevísimas palabras de descripción de algunos de los escenarios considerados.

## Universos

El universo en que vivimos es mucho más peculiar de lo que a primera vista parece. En él la interacción gravitatoria es lo suficientemente intensa para que sistemas solares puedan formarse, pero no tanto como para que colapsen. Las interacciones débiles, si fuesen un poco más intensas, harían tan fuerte la radiactividad de muchos elementos que la vida (al menos la vida tal como la conocemos) sería imposible. De hecho, incluso sin incrementar la intensidad de las interacciones débiles, tal generación de radiactividad ocurriría si el quark de tipo *d* fuese un poco más pesado (o el de tipo *u* un poco más ligero) de lo que son en nuestro universo. Las interacciones fuertes también tienen, aparentemente, el valor preciso para que se hayan podido formar por nucleosíntesis (ya sea en el big bang o en supernovas) elementos tales como el oxígeno, el carbono o algunos metales esenciales para la vida; un pequeño incremento, o disminución de su intensidad impedirían la existencia de seres vivos como los que existen en la tierra, al menos los más organizados. El *tamaño* y la *densidad* del universo no se pueden variar en exceso sin obtener un universo que vuelve a contraerse (si la densidad es excesiva) antes de dar tiempo a la evolución, o cuyos componentes se separan sin llegar a formar estructuras materiales extensas (estrellas), si la densidad del universo fuese muy pequeña.

Estas casualidades no son nada comparadas con lo que ocurre si uno acepta el modelo estándar. Como M. Veltman ha mostrado, el llamado campo de Higgs genera una interacción,

conocida como "constante cosmológica", que no se ha observado experimentalmente. Para resolver este problema hay que postular una constante primordial, es decir, no generada por el campo de Higgs, que cancela exactamente a aquella. Tal cancelación ha de ser fantásticamente precisa: hasta *cincuenta* cifras decimales.

El cúmulo de coincidencias citado parece excesivo. Por supuesto, es muy posible que lo que, en el estado actual de nuestro conocimiento sea de difícil explicación, resulte obvio cuando hayamos construido una teoría coherente que englobe al modelo estándar y a la gravitación (por ejemplo). Otra posibilidad, sin embargo, es que tales coincidencias sean reales, esto es, que efectivamente vivamos en un universo altamente improbable: algo que se hace más fácil de tragar si el universo no es único. Podemos imaginarnos que, igual que hay muchos planetas y satélites en nuestro sistema solar, pero sólo uno habitable, podría haber muchos universos (probablemente infinitos) de los cuales, por supuesto, sólo en los habitables habría seres vivos capaces de preguntarse sobre el cúmulo de improbabilidades que hacen al entorno apto para su existencia. Este es el llamado principio antrópico.\* No es (al menos a priori) absurdo suponer que en un super-big-bang se crease no uno, sino muchos universos (indudablemente infinitos de ellos), cada uno con interacciones y constantes físicas distintas; incluidas algunas poco probables. Por añadidura, resulta que la existencia de muchos universos podría, tal vez, resolver algunos de los problemas epistemológicos de la mecánica cuántica.

*El presente texto es una adaptación, con ligeras modificaciones, del discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias del autor. Originalmente escrito en 1993, el discurso fue leído en 1996.*

**Francisco J. Ynduráin**

*está en el Departamento  
de Física Teórica,  
Universidad Autónoma de Madrid*

\* Algunas especulaciones relacionadas con el principio antrópico, en especial en conexión con el problema de la aparición de la vida; y la posibilidad de inteligencias extraterrestres, pueden verse en el libro del autor, *¿Quién Anda Ahí?*, publicado por Editorial Debate, 1997. Podría pensarse que este principio está más allá de la ciencia, en el dominio de la fantasía pura, o la especulación teológica, si no hubiese las indicaciones mencionadas en lo que antecede, de que sea posible la creación espontánea, *ex nihilo*, a grandes energías.