

TEORIAS CUANTICAS DE LA GRAVITACION

(Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo)

Alfonso Martínez de Lizardui*

1. Introducción

El impresionante campo de observación que abarca hoy día la ciencia mediante las tecnologías de punta, tanto en radioastronomía como en aceleradores de partículas ha hecho que, en el breve lapso de unas décadas, el análisis de la materia en los límites macroscópico y microscópico abarque dos escalas tan impresionantemente distantes que han tenido que ser revisados y puestos al día los propios fundamentos de la física.

Sin embargo, desde los $2 \cdot 10^5$ años luz (dimensiones características de las grandes galaxias) hasta los 10^{-33} cm (longitud de Planck), la física moderna ha sido capaz de elevar un edificio teórico que hace comprensibles estos fenómenos de escalas tan astronómicamente diferentes de tal forma que, hoy en día, cualquier fenómeno de la naturaleza puede ser descrito en función de cuatro fuerzas fundamentales: las fuerzas nucleares fuerte, débil, electromagnética y gravitatoria.¹

* Departamento de Lógica y Teoría de la Ciencia de la Universidad del País Vasco, San Sebastián.

¹ Estando este artículo en espera de ser publicado, se ha producido un importante hallazgo: la quinta fuerza elemental. Esta quinta fuerza tendría un carácter básicamente gravitatorio. En espera de información más amplia y detallada, consideraremos el desarrollo del trabajo actual sobre la base de cuatro fuerzas fundamentales. En caso de confirmarse el hallazgo de la quinta fuerza, la tesis fundamental aquí desarrollada sólo se vería modificada cuantitativamente, no así cualitativamente.



Las fuerzas nucleares fuerte y débil son de corto alcance y disminuyen rápidamente con la distancia. Son las fuerzas que gobiernan el mundo de los núcleos atómicos y de las partículas elementales. A distancias superiores al diámetro de un núcleo, dichas fuerzas desaparecen prácticamente. El mundo en que actúan este tipo de fuerzas es tan pequeño, que para su descripción se hace necesaria la física cuántica. Es un mundo gobernado por las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, un mundo totalmente alejado de la experiencia cotidiana.

El campo que controla la fuerza electromagnética es una zona de transición. En esta zona se dan una gama variada de fenómenos, dentro de los cuales las reacciones químicas adquieren estatuto relevante. Más aún, la fuerza electromagnética parece ser la única capaz de producir cuerpos compuestos suficientemente complejos como para que surja la vida tal como la conocemos en nuestra experiencia cotidiana. Por ello se ha llegado a definir la vida como energía electromagnética organizada. La importancia crucial que adquiere esta fuerza para la comprensión de la naturaleza que nos rodea comienza a perder relevancia a medida que aumentamos la escala espacial y nos dirigimos a las distancias interestelares a intergalácticas.

A escala macroscópica, la única fuerza que se mantiene en todo su esplendor es la fuerza gravitatoria; ella es la que gobierna la estructura del universo astronómico, la formación de los planetas, estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias. . . Los fenómenos a esta escala están regidos por las leyes relativistas y, más concretamente, por la relatividad general.

En la mecánica newtoniana se postula que los cuerpos materiales actúan entre sí dentro de un marco preestablecido sobre el cual no pueden ejercer ninguna acción causal. Es decir, el recipiente es inde-

pendiente del contenido. Este recipiente se define para Newton por medio de un espacio y un tiempo absolutos, sin los cuales no puede existir ninguna medida, ni, por tanto, la propia física.

Einstein, en la teoría de la relatividad, eleva ambos conceptos (espacio y tiempo) a la categoría de interdependientes y, posteriormente, concede a dicho sistema de referencia espacio-temporal el estatuto de única realidad física existente; y esta nueva realidad deja de ser un marco inerte, para convertirse en actor de la interpretación relativista de la naturaleza. Así, el continuo espacio-tiempo se define mediante una métrica correspondiente a una variedad riemanniana de cuarto orden (V_4), estando en todo momento definido cualquier punto (suceso) de ella mediante las coordenadas (x, y, z, ict) .

En la relatividad especial (válida en ausencia de campos gravitacionales), la expresión

$$s^2 = (t_1 - t_2)^2 - \{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\} / c^2 \quad [1]$$

donde

$$(x_1, y_1, z_1, ict_1) \text{ y } (x_2, y_2, z_2, ict_2)$$

son coordenadas de dos sucesos determinados por un mismo observador inercial, es independiente del observador.

Si los acontecimientos son suficientemente próximos, la expresión anterior se podrá expresar mediante

$$ds^2 = dt^2 - \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{c^2} \quad [2]$$

Este esquema puede ser ampliado observando que, en ausencia de campos gravitatorios, sería posible para un observador animado de un movimiento arbitrario escoger cualquier coordenadas generales $(x^0, x^1,$

$x^2, x^3)$ relacionadas con (t, x, y, z) .

El intervalo en este caso sería

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad [3]$$

en donde $g_{\mu\nu}$ son diez funciones de las cuatro coordenadas.

La relatividad general afirma que [3] es siempre válida; y que no es posible encontrar coordenadas (t, x, y, z) que reduzcan [3] a [2] para todos los pares de acontecimientos cercanos. Sin embargo, es posible encontrar una pequeña región del espacio-tiempo en que dicha reducción sea posible.

La geometría basada en [3] es la geometría riemanniana citada con anterioridad. En ella, la forma funcional $g_{\mu\nu}$ contiene información sobre la presencia y distribución de los campos gravitatorios, pero también contiene información sobre el sistema de coordenadas elegido.

La relatividad general incorpora pues el axioma de la equivalencia de los sistemas inerciales, pero lo amplía hasta el grado de que cualquier observador (sea cual fuere su estado de movimiento) puede utilizarlo para establecer coordenadas. Por tanto, [2] queda modificado en [3], sin embargo, [1] es inaceptable ya que, se sabe, la geometría euclidiana no es válida para grandes regiones. La expresión [3] nos conduce al concepto de geodésica como la mínima distancia entre dos puntos. Las partículas en ausencia de campos electromagnéticos pero en presencia de campos gravitatorios conformarán la geodésica $ds^2 > 0$ y los rayos luminosos la geodésica $ds = 0$.

El problema de la restricción de g en el espacio fue un motivo de preocupación para Einstein, encontrando que dentro de la geometría riemanniana la expresión más sencilla que podía aparecer en las ecuaciones para el campo gravitacional era el llamado tensor de

Ricci: $R_{\mu\nu}$. En consecuencia, Einstein eligió como ley de la gravitación en el espacio vacío a

$$R_{\mu\nu} = 0 \quad [4]$$

La ley de la gravitación para el espacio lleno de materia en el que sería necesario una ecuación análoga a la de Poisson se consigue con las célebres ecuaciones de campo:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = -x T_{\mu\nu} \quad [5]$$

En este conjunto de diez ecuaciones, el lado izquierdo lo conforma el tensor geométrico. En el lado derecho, el tensor contiene la densidad, cantidad de movimiento, energía y presión de la materia siendo

$$x = \frac{8\pi G}{c^2}$$

En este sentido, la materia sigue siendo parte activa en la teoría de la relatividad generalizada, pero junto al espacio-tiempo, que ha adquirido el mismo estatus ontológico como puede observarse en las ecuaciones de campo einsteinianas.

Según ellas, la energía y cantidad de movimiento de la materia queda determinada por la variedad, de tal manera que estas propiedades aparecerán descritas como irregularidades locales del continuo espacio-temporal. La materia vendrá definida por zonas de gran curvatura del continuo no-euclidiano.

Si consideramos el cosmos con una curvatura media en un momento dado, a escala planetaria (es decir, en una porción muy limitada de dicho continuo) dicha curvatura podrá despreciarse, pudiendo prescindirse de ella; con más razón aún, si trabajamos a escala atómica o subatómica.

Sin embargo, si la materia según la relatividad general está asociada a la deformación espacio-temporal del continuo V_4 , la geometría espacio-temporal a nivel atómico tiene también que estar deformada y, por tanto, no puede ser euclídea.

Esta contradicción ha perseguido desde su nacimiento a la teoría de la relatividad y la única solución posible es la de extender la geometrización relativista del macrocosmos al microcosmos. De este punto parten los intentos de construir una teoría de campo unificado desde Einstein hasta Kaluza, pasando por Weyl, Eddington o Schrodinger. Aunque en la época de Einstein la unificación abarcaba sólo los campos electromagnético y gravitatorio, hoy en día, cualquier perspectiva de unificación habrá de tener en cuenta las cuatro fuerzas elementales.

Desde las escalas de longitudes más pequeñas a las más grandes en que hoy trabaja la física experimental, existe una graduación de fuerzas y distancias que inciden fundamentalmente en dichas escalas. La jerarquización de magnitudes proporciona un esquema como el que a continuación se adjunta.

La relatividad especial, la relatividad general y la mecánica cuántica son tres teorías caracterizadas por sendas constantes fundamentales: la velocidad de la luz (c), la constante de la gravitación (G) y la constante de Planck (h). Existe una única manera de construir una longitud y un tiempo mediante estas tres constantes:

$$\begin{aligned} \text{longitud: } \left(\frac{G \cdot h}{c^3}\right)^{1/2} &\approx 2 \times 10^{-33} \text{ cm,} \\ \text{tiempo: } \left(\frac{G \cdot h}{c^5}\right)^{1/2} &\approx 9 \times 10^{-42} \text{ seg.} \end{aligned}$$

Estas magnitudes son las más pequeñas que con significado físico se utilizan en el mundo científico. Son los cuantos de espacio y de tiempo, denominados longitud y tiempo de Planck.

La física experimental hoy día no puede alcanzar dichas escalas. La longitud de Planck es 100 trillones de veces menor que la del radio del neutrón. Para sondear experimentalmente estas magnitudes, necesitaríamos generadores de partículas de altísimas energías.

Sin embargo, adonde no llega la física experimental, llega la física teórica y es por este camino por donde hoy día se conducen la mayor parte de los esfuerzos en la búsqueda de la teoría del campo unificado.

Existen fuertes intuiciones de que los fenómenos a distancias muy pequeñas por debajo del diámetro del núcleo atómico, estén gobernados por la gravitación. Y el intento de analizar la gravitación a esta escala de Planck nos lleva a tener que utilizar la mecánica cuántica, surgiendo con ello una nueva y potente rama de la física: la gravitación cuántica.

2. La teoría cuántica de campos

De las cuatro fuerzas fundamentales que en la actualidad el físico acepta como origen de todas las interrelaciones y fenómenos que se dan en la naturaleza, la primera en surgir históricamente fue la gra-

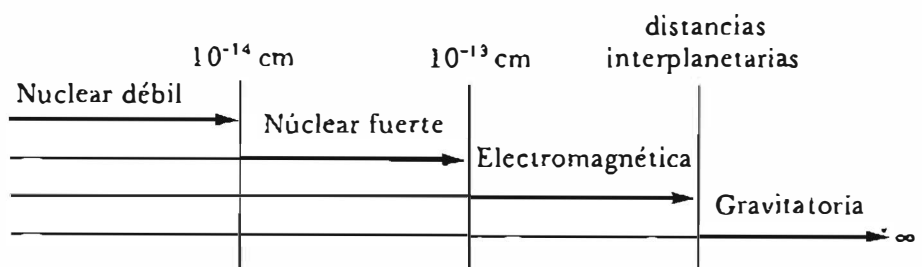


Figura 1: Alcances de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Denominamos alcance a la distancia más allá de la cual la interacción pierde su eficacia operativa.

vitación, de manos de Newton. Esta era la fuerza que regulaba la relación entre partículas materiales. La materia (el corpúsculo material) sería la única realidad existente en un marco espacial y temporal preestablecidos.

En la década de 1850, Maxwell, matematicizando el trabajo de Faraday, dará lugar a una teoría física independiente de la gravitatoria, en la cual electricidad y magnetismo aparecerán como dos aspectos diferentes de un único fenómeno, el campo electromagnético. Si la

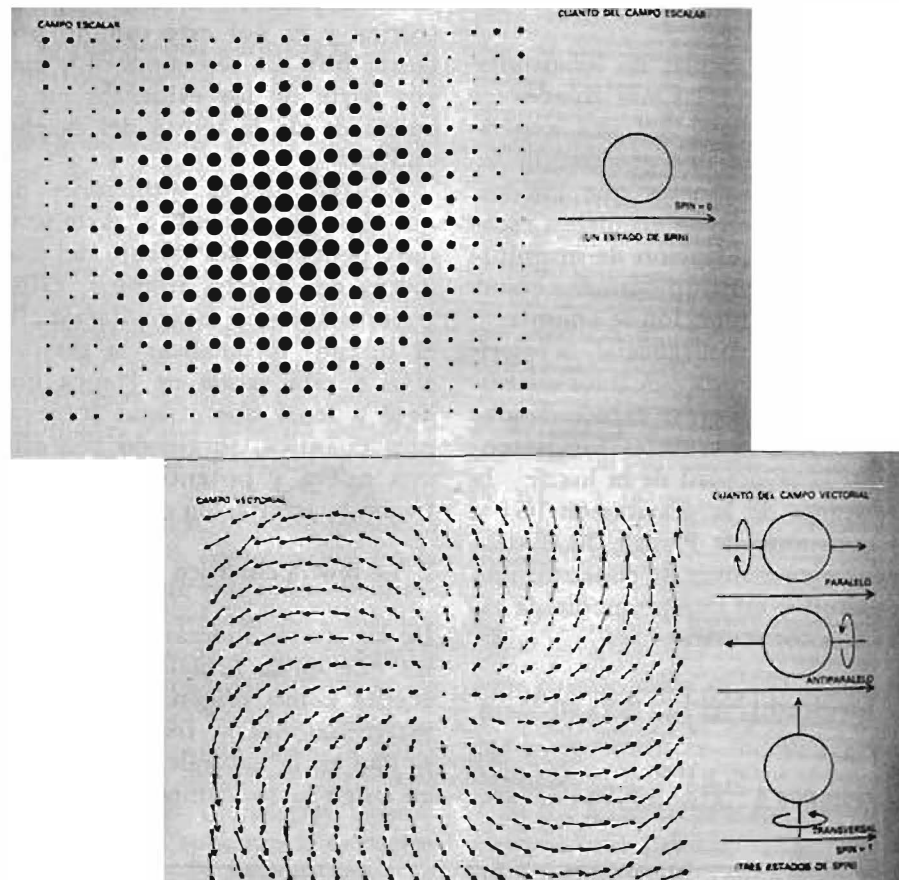
metafísica newtoniana introduce la partícula material en el marco espacio-temporal, la matematización maxwelliana la enriquece con el concepto de campo. A partir de este momento, toda la ciencia se verá inmersa en una dualidad corpuscular-ondulatoria que alcanzará hasta nuestros días y cuyo profundo carácter nos será revelado por la mecánica cuántica.

Einstein pretenderá superar la *contradicción* corpuscular-ondulatoria en que se debate la nueva visión científica de la naturaleza y

acometerá con ímprobo esfuerzo la teoría de unificación de ambos campos. Será derrotado. Realmente, parece como si la naturaleza en su elementalidad fuera dual y no monista. Sin embargo, la fascinación que sobre los científicos (físicos y matemáticos fundamentalmente) ha ejercido la idea de poder explicar el universo en base a una única fuerza, ha impulsado a nuestra sociedad a los mayores gastos y esfuerzos (plurinacionales inclusive) que jamás haya conocido la historia de la ciencia. Los gigantes aceleradores de partículas son fieles testigos de esta singular empresa.²

El camino realizado en este sentido es realmente muy importante y el primer paso trascendental se dio a finales de los años cuarenta. Por aquellas fechas, la física se apuntó un tanto de vital importancia al aplicar la mecánica cuántica a los campos electromagnéticos. De este matrimonio, surgió la electrodinámica cuántica que, si en algo ha destacado es en su tremenda exactitud así como detallado poder de predicción.

Animados por este éxito, se emprendió con apasionado interés la cuantización de las otras tres fuerzas de la naturaleza. Sin embargo, enseguida cundió el desánimo. Las fuerzas nuclear fuerte y nuclear débil no eran aún correctamente entendidas, la teoría de los quark (cromodinámica cuántica) aún no estaba establecida y la gravitación una vez más se rebeló obstinadamente a la cuantización. Hace 15



El concepto de campo, una cantidad definida en cada punto de una cierta región del espacio y del tiempo, es importante en la construcción de las teorías gauge. Un campo escalar tiene una sola magnitud en cada punto. En este ejemplo la magnitud viene dada por el área de los puntos. Un campo vectorial posee magnitud y dirección; se ilustra dibujando una flecha en cada punto. Un campo escalar representa cantidades como la temperatura o la densidad de un fluido, en tanto que un campo vectorial representa su velocidad. En teorías cuánticas de campos, el influjo de un campo puede incorporarse mediante una partícula virtual. El número de componentes de un campo viene reflejado en el número de orientaciones distintas de la partícula, que a su vez depende de su momento angular de *spin*. Un campo escalar tiene una sola componente (su valor se puede dar con un solo número) y se representa por una partícula de *spin* cero con un único estado de *spin*. Un campo vectorial en el espacio tridimensional tiene tres componentes. (Tomado de la revista *Investigación y Ciencia* núm. 47).

² Entre los aceleradores de partículas más potentes, tenemos actualmente el Fermilab, acelerador de protones que puede llegar a una energía de 1000 GeV. El UNK de la URSS que entrará en funcionamiento hacia 1990 y que puede alcanzar la tremenda energía de 3000 GeV. En estas fechas aproximadamente, se pondrá en marcha el nuevo Fermilab de 5000 GeV. Y, a nivel de diseño, existe el VBA (Very Big Accelerator) acelerador de protones de 20 000 GeV, que exigirá el concurso plurinacional y no tiene fecha fijada para su entrada en funcionamiento; su tamaño será tan descomunal que habrá que construirlo en pleno desierto.

años, pues, la situación era la siguiente: existían 4 teorías diferentes para explicar cada una de las cuatro fuerzas fundamentales actuantes en la naturaleza, y de dichas cuatro teorías, una sólo (la electrodinámica cuántica) funcionaba bien desde el punto de vista del método científico.

En la mente de los investigadores rondaba persistentemente una pregunta: ¿cuáles eran las características estructurales de la teoría del campo electromagnético carentes en los otros tres campos, que permitían que aquél se ajustase con tanta precisión a su descripción cuántica? En caso de poder deslindar estos factores estructurales, podrían ser (debidamente modificados) integrados en los otros tres campos, logrando de esta forma una teoría de campo unificado.

3. Las simetrías gauge

Desde los albores de la civilización, la influencia que sobre el pensamiento y la religión han tenido las formas simétricas es un hecho de sobra conocido. Sin embargo, el concepto de simetría es mucho más profundo, ya que no todo son simetrías formales. Existe un campo apasionante y sin explorar que es el de las simetrías abstractas. Este ha sido el filón de la física moderna, hasta el punto tal, que los físicos creen hoy en día que las fuerzas (las cuatro fuerzas) fundamentales sólo existen en la naturaleza para que ésta pueda mantener un conjunto de simetrías abstractas que serían inherentes a la estructura más íntima de ella.

Esta íntima conexión entre simetría geométrica y física, ya era conocida a través de las leyes de conservación. Recordemos que las leyes de conservación nos indican que algo (un valor, una relación, etc.) permanece invariante en el tiempo. Las simetrías más conocidas tales como las rotaciones y reflexiones son de interés y fáciles de visualizar; sin embargo, en ellas

no se agotan las variedades de simetrías que presenta la naturaleza.

A veces, es posible descubrir nuevos tipos de simetrías al analizar las descripciones matemáticas de un sistema físico. Un caso del mayor interés fue el de las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético. Maxwell observó cómo, en sus ecuaciones del campo, los componentes eléctricos y magnéticos no eran del todo simétricos. Influido por una profunda intuición estética, incluyó un nuevo término con objeto de lograr la simetría deseada. Este nuevo término resultó ser la generación de un campo magnético por un campo eléctrico variable, efecto que pudo ser detectado experimentalmente.

Sin embargo, se necesitaron más de 50 años para poder apreciar todas las implicaciones subyacentes a las simetrías de las ecuaciones de Maxwell. Tras un análisis detallado de éstas por parte de Lorentz y Poincaré, descubrieron con sorpresa que dichas ecuaciones eran simétricas bajo una operación de unión del espacio y el tiempo. Si a las tres dimensiones espaciales les unimos la temporal, formando un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, la simetría de Lorentz-Poincaré es una rotación en el espacio-tiempo. Es decir, existe una profunda interrelación entre el electromagnetismo y el espacio-tiempo; dependiendo del movimiento del observador los valores medidos de distancias o tiempos. Elevando este fenómeno, tan opuesto a la experiencia cotidiana, a la categoría de real, Einstein inauguró una nueva era, la era relativista.

Esta pequeña excursión a través de la historia de la ciencia nos permite observar la importancia capital de las simetrías matemáticas cara al descubrimiento de potentes principios de la naturaleza.

Uno de los problemas de mayor calibre con el que se han enfrentado los físicos en sus investigacio-

nes, es el de los valores infinitos que adoptan algunas magnitudes de la física y que aparecen inevitablemente en el desarrollo de sus ecuaciones en la teoría cuántica de campos. Ante esta situación, los teóricos deben elegir entre abandonar el modelo utilizado (lo que equivaldría a comenzar de nuevo de la nada), o encontrar una salida con objeto de superar el obstáculo. El físico, con objeto de poder seguir calculando, lo que hace es "renormalizar" el punto cero de la escala utilizada para medir la cantidad infinita. Mediante este truco matemático, la teoría se libra de los valores infinitos que amenazan con reducir cualquier teoría al absurdo.

La electrodinámica cuántica es una teoría renormalizable. Sin embargo, una vez más, al intentar la renormalización de las otras tres fuerzas de la naturaleza, se observó con extrañeza que éstas no poseían dicha propiedad. Era pues necesario investigar el origen de los éxitos de la electrodinámica cuántica y entresacar de su estructura a todas las demás.

Pronto se comenzó a investigar el problema de la simetría, convencidos de que ése era el terreno en que se debatía la estabilidad o inestabilidad de las teorías. Más concretamente, se comenzó a trabajar con unas simetrías que podrían ser las responsables de las cuatro fuerzas fundamentales: las simetrías "gauge".

Las simetrías de gauge están íntimamente relacionadas con el fenómeno de la renormalización. Las transformaciones de gauge corresponden a "rotaciones" en espacios internos (isoespín, color, etc.). Un sistema o una teoría poseerán una simetría gauge si la naturaleza física del sistema es invariante bajo una transformación de este tipo.

Es posible efectuar una misma transformación en toda la región bajo análisis. En dicho caso, estamos ante lo que se llama una trans-

formación global gauge. Si la transformación varía de un lugar a otro, nos encontramos ante transformaciones locales gauge.

Examinemos de nuevo la naturaleza y analicemos ese fenómeno misterioso y controvertido que es la gravitación. La física dentro de un laboratorio que se mueve en línea recta por el espacio sin la acción de fuerzas exteriores es diferente de la física en ese mismo laboratorio moviéndose a través del espacio en una trayectoria curva (acelerada por tanto). Sin embargo, es posible pasar del segundo caso al primero mediante la acción de un campo exterior, más concretamente de un campo gravitatorio. La trayectoria de una nave espacial a lo largo de la órbita de un planeta es igual que la de un laboratorio moviéndose en línea recta a través del espacio vacío, y la razón es simple, los objetos que la trayectoria curva produce sobre la nave son contrarrestados por la gravedad. La gravedad es pues "un

campo compensador" que resta-blece la desviación de un sistema respecto de la línea recta.

En este sentido, con la introducción de un campo gravitatorio suficientemente complejo, sería posible conseguir leyes físicas simétricas incluso para transformaciones locales de estimación. El campo gravitatorio sería pues el modo en que la naturaleza se conduce para mantener una simetría de gauge local, simetría que, en este caso, consistiría en la invariabilidad de las leyes físicas bajo cambios arbitrarios de la trayectoria de un movimiento.

Si analizamos la gravedad desde este punto de vista, podríamos definirla como una *manifestación de una simetría abstracta subyacente en la naturaleza*.

Desde este punto de vista, por tanto, las cuatro fuerzas que rigen los destinos del universo no serían más que el resultado de los campos que se ve obligada a introducir la

naturaleza, con objeto de compensar unas simetrías gauge locales, que se situarían en la estructura más íntima de ésta. Los campos de fuerza serían el modo que tiene la naturaleza de imponer simetrías de gauge locales en el universo.

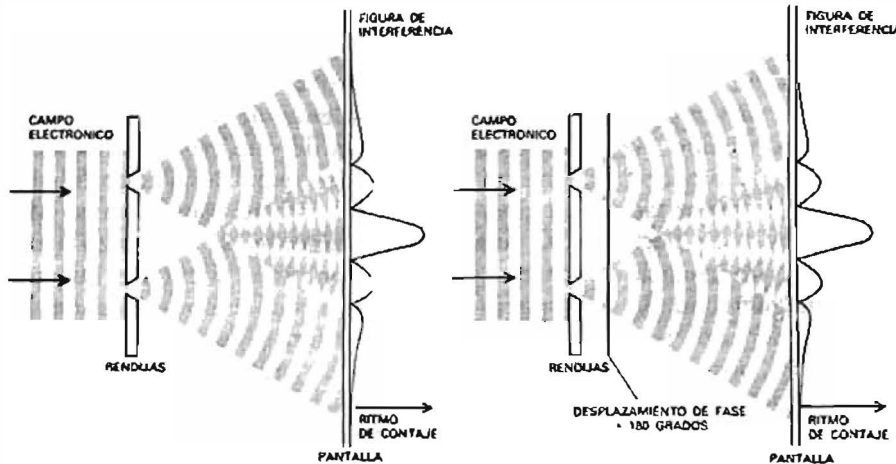
Reexaminando, así, las construcciones físicas más generales, vemos que el campo electromagnético no es más que la manifestación de la simetría gauge más simple acorde con los principios de la relatividad especial. La transformación de gauge en este caso corresponde a cambios en la fase de las funciones de onda de las partículas.

Un problema de gran alcance es el de la constatación de que el problema de la renormalización y el de las simetrías gauges están profundamente interconectados. El aparentemente milagroso funcionamiento de la electrodinámica cuántica y su capacidad de renormalización en definitiva, no se basa más que en la extrema simplicidad de la simetría estructural del campo electromagnético.

4. El descubrimiento de la fuerza electrodébil

Basados en esta línea de investigación, Weinberg y Salam en la década de los 70 se sumergieron en el análisis de dos fuerzas de la naturaleza: la electromagnética y la nuclear débil. El problema se centraba en descubrir una simetría gauge suficientemente compleja para que generara un campo electrodébil (anterior al electromagnético y al débil), demostrando de esta forma que estas dos fuerzas no son de hecho más que aspectos de una única fuerza más elemental.

Para ello, se planteó en primer lugar la descripción de la fuerza débil en términos de un campo gauge. Considerando al electrón y su neutrino, los cuales pertenecen a la familia de los leptones y son sensibles a la fuerza débil, Weinberg y Salam introdujeron la "simetría isotópica del spin" en el



Simetría gauge del electromagnetismo. Se trata de una invariancia con relación a los desplazamientos de fase del campo de materia que representa el electrón. La fase en sí no puede medirse, pero deja sentir su destacada influencia sobre cantidades observables tales como la figura de interferencia que se forma cuando las ondas de un campo electrónico atraviesan un par de rendijas. Los picos de esta figura se encuentran siempre que las ondas están en fase, y los nodos surgen cuando están en oposición de fase. Un desplazamiento de la fase altera totalmente la configuración del campo, pero sin cambiar la figura de interferencia observable. La simetría es exacta, por lo que el desplazamiento de fase no puede detectarse. De ahí que sea pura cuestión convencional la elección de la fase en cualquier descripción teórica del campo. En ausencia de fuerzas (o interacciones) que actúen sobre electrones, sin embargo, la simetría será global: la figura observada será invariante sólo si el mismo desplazamiento de fase se realiza por doquier. (Tomado de la revista *Investigación y Ciencia* núm. 47).

reino de la interacción débil. Con esta simetría de mezcla de identidades, imaginamos la conversión de electrones en neutrinos y viceversa mediante el giro de un mando ficticio. Esta simetría es una simetría global, que, al traspasarla a local, nos hace necesario generar unos campos de fuerza necesarios para compensar el cambio de escala puntuales. Estos campos serían los que nos describen la fuerza débil. El número de campos necesarios para mantenerla es de tres, lo cual nos indicaba ya que la simetría subyacente al campo (débil) es mucho más compleja que el de la electromagnética. Al describir cuánticamente estos tres campos necesitamos asociarles tres tipos de partículas mensajeras (responsables de las interacciones) una para cada campo. Estas partículas teóricas recibieron los nombres de W^+ , W^- y Z .

Sin embargo, existe un problema intrigante. Los campos gauge son de largo alcance, lo que implica que sus partículas asociadas han de carecer de masa (caso del fotón para el campo electromagnético). Sin embargo, la teoría asigna a las partículas W y Z del campo débil unas masas grandes, desvaneciendo pues la simetría gauge.

La superación de esta dificultad ha sido posible gracias al mecanismo llamado "interrupción espontánea de la simetría". Supongamos, con objeto de representarlo más gráficamente, una superficie en forma de sombrero mexicano y una bola en la copa de dicho sombrero. En esta situación, la configuración del sistema es simétrica, pero inestable (sometida a fuerzas gravitacionales). La bola a la más mínima desviación de su posición de equilibrio resbala y se desliza por la pendiente hasta estabilizar su posición en el ala del sombrero. En esta situación, la simetría se ha transformado en estabilidad. En esta configuración estable, la simetría rotacional subyacente de la fuerza gravitacional sigue existien-

do, pero está oculta, y el estado real del sistema no refleja la simetría de las fuerzas que la controlan.

En el caso de la fuerza débil, la simetría gauge subyace a los campos, pero éstos no pueden existir en un estado que refleje esa simetría, ya que dicho estado es inestable. Es por ello que el campo se hunde en un estado estable que destruye la simetría dotando de masa a las partículas asociadas.

Después de simetrizar el campo débil, el siguiente paso a dar es el de combinar el electromagnetismo y la fuerza débil en una sola teoría: la fuerza electrodébil. Para ello, es necesario una simetría gauge más compleja, que incorpore las dos simetrías inherentes a los campos electromagnético y débil.

Desde este punto de vista, por tanto, en la fuerza electrodébil existirán cuatro campos, el electromagnético y los tres asociados a la fuerza débil. La estructura subyacente a ambas fuerzas es en realidad muy parecida. Ambas son campos gauge. Y las diferencias físicas observadas entre ellas son debidas al efecto de interrupción de simetría. En este sentido, se puede afirmar que la simetría de la fuerza débil no la observamos ya que está oculta tras la interrupción de la simetría.

El análisis de esta teoría unificada fue refrendado con el más clamoroso éxito en dos pasos sucesivos. En 1971, tras un análisis riguroso y exhaustivo mediante ordenador, se examinaron todos los diagramas de interacciones posibles dentro del marco de la teoría y se vio cómo todos los infinitos propios en este tipo de teorías desaparecían. La teoría era pues *renormalizable* igual que la exitosa electrodinámica cuántica y, sin lugar a dudas, el hecho de tamaño éxito hay que buscarlo en el elevado grado de simetría de la teoría. La segunda prueba incontestable llegó en 1983, con la detección experimental de las partículas W y Z en el acelerador de partículas

subatómicas de Ginebra.³ Desde este momento histórico para la ciencia, el número de fuerzas elementales en la naturaleza fue reducido a tres.

5. En busca de la gran unificación: las GTU

Los brillantes resultados dados por las simetrías gauge cara a la unificación de dos fuerzas elementales empuja definitivamente a la física actual a tratar de unificar la fuerza fuerte con la electrodébil en base a la obtención de una potente simetría subyacente a ambos campos. Para ello, se dan dos pasos. El primero de ellos es el de asociar a la fuerza fuerte una estructura de campo gauge. Para esto, se parte de que los hadrones (partículas interactuantes con los campos fuertes) están formados por unidades elementales llamadas quark.

Cada quark posee un equivalente de carga eléctrica que actúa como la fuente del campo. A dicha carga se le da el nombre de "color". El campo electromagnético se genera solamente por una carga, pero el campo del gluón (partícula mensajera que viaja entre los quark) es más complejo y requiere tres cargas de distinto color. Cada quark en definitiva puede presentarse en tres colores arbitrariamente elegidos: rojo, verde y azul.

La simetría gauge local asociada al campo fuerte, sería la invariabilidad del sistema bajo variaciones independientes de color de cada punto del espacio. Al aparecer tres colores, la simetría es más compleja, y esta complejidad se reflejará en el mayor número de campos de fuerza necesarios para mantener la simetría local. Concretamente, se

³ Un equipo internacional del CERN, dirigido por Carlo Rubbia, diseñó los experimentos que en 1983 detectaron los bosones W y la partícula Z . Por su participación en los experimentos, diseño y construcción del colisionador protón-antiprotón, así como del detector, Carlo Rubbia y Simon Van der Meer recibieron el premio Nobel de Física de 1984.

necesitarán 8 nuevos campos de fuerza con sus respectivas partículas asociadas (ocho gluones). Compararemos estas ocho partículas necesarias con las tres (W^+ , W^- , Z) del campo electrodébil o la única (fotón) del campo electromagnético.

En un protón (hadrón) por ejemplo, sus tres quark internos intercambian entre sí continuamente gluones, cambiando por ello sus colores, pero siempre la suma de los tres colores debe ser rojo+azul+verde. Dicho en una forma más gráfica, podríamos decir que la acción de los campos de gluones compensa los cambios internos de color de los quark con objeto de mantener el color blanco (verde+azul+rojo) del hadrón.

Sobre esta base de simetría gauge se ha edificado una importante rama de la física: la *crمودینámica cuántica* (CDC). Desde el punto de vista de la CDC, la fuerza fuerte no es más que la insistencia de la naturaleza por mantener una simetría abstracta.

Con el afianzamiento de la CDC, tanto las fuerzas electromagnética, nuclear débil como nuclear fuerte, poseen una descripción en términos de campo gauge. Más aún, dos de ellas (la electromagnética y la débil) están unificadas mediante una simetría gauge más potente que implica la existencia de 1+3 campos. ¿Es posible en esta situación encontrar una simetría lo suficientemente compleja como para definir en función de ella dichas tres fuerzas?

El problema de encontrar esta gran teoría unificada (GTU) es un problema fundamentalmente matemático, y este problema no es de solución única, de ahí la aparición de un buen número de teorías rivales. En todas ellas, de cualquier forma, intervienen simetrías que implican la mezcla de identidades de un número importante de partículas (5). En la simetría GTU se dan procesos que estaban fuera del alcance de las teorías anteriores.

Para poder llevar a cabo esta unificación, se necesitan *veintidos* (22) *campos unificados* de fuerzas, de los cuales doce son ya conocidos y cuyos cuantos correspondientes son (1 fotón; partículas W^+ , W^- , Z ; 8 gluones) y los nuevos campos con sus correspondientes cuantos, llamados partículas X .

En las teorías GTU se da una conclusión de la mayor importancia y es la de postular la desintegración del protón. El protón ha sido siempre considerado en todas las teorías físicas como una partícula estable y permanente. Las teorías de gran unificación predicen la muerte (desintegración) del protón con lo que indirectamente admiten que toda la materia del cosmos acabará desapareciendo, al basarse la estructura de éste en un elemento inestable. Esta predicción teórica de las GTU si pudiera observarse experimentalmente sería la más importante prueba de la simetría común subyacente a las tres fuerzas. Sin embargo, los problemas tecnológicos que se plantean a la hora de poder investigar predicciones de este tipo son fabulosos. Examinemos la situación con más detenimiento.

A través del principio de incertidumbre de Heisenberg, se pueden relacionar la energía (o su equivalente en masa) y la distancia. Desde este punto de vista, la física de las pequeñas distancias nos obliga a la utilización de fabulosas energías. Más concretamente, a la escala de masa (energía) de las partículas X , tenemos una distancia asociada de 10^{-29} cm; ésta sería el radio de acción de las partículas X en cuya interacción con los quark ocurriría la desintegración del protón.

El mundo de las GTU es millones de millones de veces más pequeño que el mundo de los quark. Los quark han podido ser sondeados con aceleradores de partículas de 3 km de longitud tales como el acelerador lineal de Standford. Para sondear el mundo de las GTU, sería necesario un acelerador mu-

chísimo más potente. Y este límite si para el filósofo no tiene mayor trascendencia, para el físico es de capital importancia, ya que la elaboración de un edificio teórico (por muy lógico que éste sea) sin la correspondiente observación, sería hacer metafísica y no la física que desde los tiempos de Newton se ha caracterizado por la hábil penetración entre el modelo teórico y la práctica experimental.

La observación de la desintegración del protón a través de un ensayo de laboratorio, no es viable hoy día (ni probablemente lo sea nunca); sin embargo, en la naturaleza tenemos el mayor laboratorio concebible en el que los fenómenos vedados a nosotros por limitaciones tecnológicas en él se dan por doquier. Así, si tenemos en cuenta que la vida media del protón prevista por la GTU más simple es de 10^{31} años (es decir que de 10^{31} protones es de esperar que uno de ellos se desintegre en un año), sería posible esta detección si introdujéramos en un lugar fuera de efectos enmascaradores extraños (rayos cósmicos, neutrinos) una gran masa de materia y observáramos con unos detectores adecuados el efecto Cerenkov consecuencia de la desintegración. Estos experimentos se están realizando en minas y cuevas profundas, a salvo de la lluvia de rayos cósmicos. Los resultados obtenidos hasta ahora son nulos, sin embargo, esto nos anularía sólo las GTU más simples, ya que en otras la vida del protón es mucho más larga. Los experimentos que puedan detectar la desintegración del protón así como los monopolos magnéticos están en el límite del análisis de la física actual. Las limitaciones experimentales son muy fuertes y de alguna forma parecen llevarnos a un túnel cada vez más estrecho del que quizás la física ya no pueda salir. Esta es la razón por la que, a la espera de resultados experimentales más trascendentes, en estos

últimos años ha surgido arrolladora la física teórica, y es en esa línea en la que se esperan los más relevantes avances.

6. La gravedad cuántica: teorías supergravitatorias

Un problema que para nadie ha pasado desapercibido es el de que las GTU pueden llegar a unificar tres campos de la física, pero no los cuatro, ya que la gravedad de nuevo (recordemos los intentos einstenianos cara a su teoría de campo unificado) se resiste a ser reducida.

Dos son los problemas que se presentan. Por un lado, el desconocimiento de la simetría que pueda unificar las cuatro fuerzas y, por otro, la no existencia aún de una teoría de la gravedad que sea compatible con la mecánica cuántica. En todos los intentos de descripción de la gravedad en términos de intercambio de gravitones (cuantos del campo gravitatorio), surgen los problemas asociados con los infinitos que invalidan la utilidad de la teoría.

Sin embargo, sabemos que la renormalización puede surgir de una simetría más potente que cualquier

otra conocida hasta el momento. La investigación teórica en esta línea se abrió en 1970, cuando los físicos teóricos anunciaron las teorías supergravitatorias. El hecho de que estas teorías de unificación total estén basadas en la simetría más general capaz de involucrar a todas las fuerzas de la naturaleza ha hecho que se las denomine con el adjetivo de *supersimétricas*.

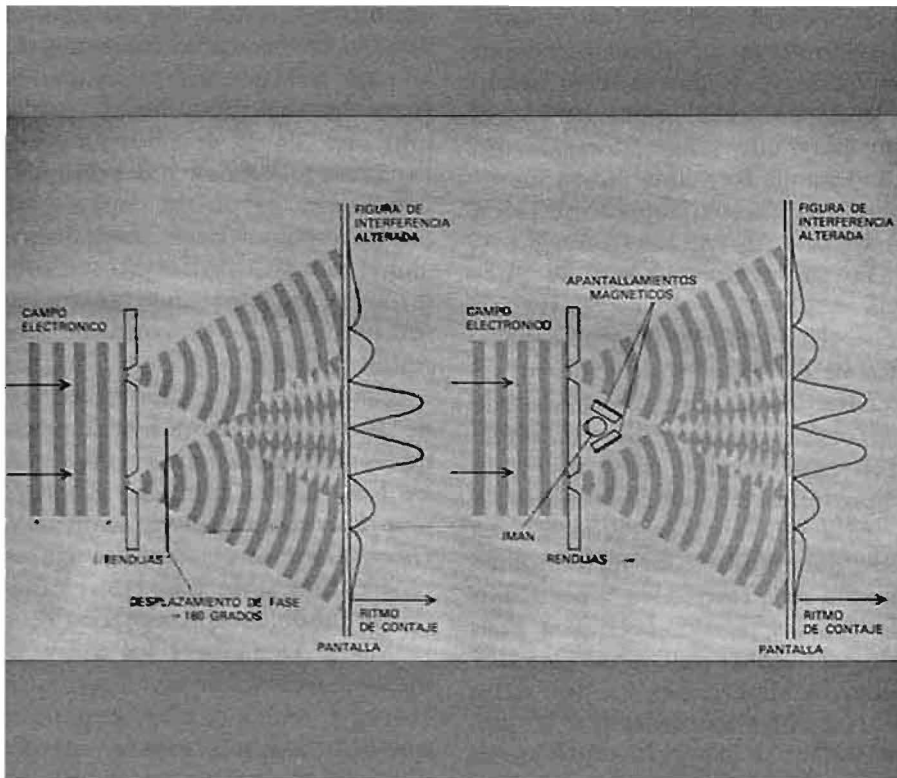
La supergravedad es una generalización de la relatividad general einsteniana; sin embargo, la diferencia esencial que hay entre ellas es que en la supergravedad se da una descripción a nivel cuántico de los fenómenos gravitatorios.

La supergravedad es una formulación supersimétrica de la gravitación. La supersimetría formulada a principios de los años 70 en investigaciones independientes llevadas a cabo en Europa, EU, y la Unión Soviética, permite la construcción de una nueva teoría de la gravitación (supergravedad) que unificaría la totalidad de los campos de fuerza existentes en la naturaleza.

Todas las partículas pueden dividirse en dos grupos por lo que a su *spin* se refiere: bosones y fermiones. Los bosones son partículas sin *spin* o con *spin* entero, mientras que los fermiones poseen unidades fraccionarias de *spin* a pesar de lo brutal que para nuestra imaginación pueda suponer el considerar partículas con doble rotación.

El comportamiento comparativo de ambos grupos de partículas es verdaderamente llamativo. Los fermiones rehuyen el contacto con partículas de su propia familia. Este comportamiento fue explicitado mediante el principio de exclusión de Pauli que prohíbe el que dos fermiones compartan el mismo número cuántico.

En contraste con este comportamiento asocial de los fermiones, se encuentra el de los bosones, los cuales no interponen ninguna barrera para la colaboración mutua,



Simetría de gauge local del campo de materia del electrón restablecida al tener en cuenta los campos magnéticos. Si se desplaza la fase de uno de los haces de electrones difractados, pero no la del otro, se altera la figura de interferencia (diagrama de la izquierda). Sin embargo, puede obtenerse el mismo efecto al introducir un pequeño campo magnético perpendicular al haz del electrón y entre las rendijas (diagrama de la derecha). Nótese que el campo magnético induce un desplazamiento de fase aun cuando se coloquen apantallamientos de suerte que el campo no logre penetrar en la región donde las ondas del electrón se propagan e interfieren. Un experimentador que examine las figuras de interferencia no podrá distinguir entre los efectos de un desplazamiento de fase impuesto arbitrariamente sobre el haz del electrón y los efectos de un campo magnético introducido entre las rendijas. Cualquier desplazamiento local en la fase del campo material del electrón puede reproducirse por campos eléctricos y magnéticos; la fase del campo del electrón será arbitraria. La electrodinámica relaciona los campos del electrón con los eléctricos y magnéticos. (Tomado de la revista *Investigación y Ciencia* núm. 47).

pudiendo agruparse en conjuntos tan numerosos que pueden llegar a producir efectos macroscópicos detectables por nuestros aparatos de medición.

Este radical comportamiento de ambas familias de partículas hace que los bosones tiendan a asociarse con las fuerzas y los fermiones con la materia.

El hecho de que la supergravidad tratase sobre la unificación de fermiones y bosones en una única teoría supersimétrica desconcertó en principio a los científicos que trabajaban sobre este asunto y que consideraban a los dos grupos ya mencionados como mundos excluyentes.

Matemáticamente, una operación de supersimetría es algo similar a la extracción de la raíz cuadrada de la simetría de Lorentz-Poincaré. Y físicamente, corresponde a la transformación de un fermión en bosón o viceversa.

La teoría supersimétrica incorpora elementos numéricos que no tienen la propiedad conmutativa; la necesidad de estos números anticonmutantes está relacionada con el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe la ocupación de un mismo punto por dos fermiones diferentes.

El origen de la supergravidad se basa en una propiedad sorprendente de la supersimetría, a saber: si aplicamos repetidamente una transformación fermión-bosón, hacemos que una partícula se mueva de un punto a otro del espacio-tiempo. Este desplazamiento de una partícula por medio de una transformación de supersimetría sugiere una relación íntima entre dicha supersimetría y la estructura del espacio-tiempo. Así, si la repetición de una transformación de supersimetría es una transformación de Poincaré y si tenemos en cuenta que la invariancia local de Poincaré es la simetría que origina la relatividad general, podemos esperar que exista asimismo una estrecha conexión entre la supersi-

metría y la gravitación. Esta es la razón que ha impulsado a los físicos teóricos a elaborar teorías supersimétricas.

La construcción de una teoría gauge de supersimetría se basa en que el producto de dos rotaciones supersimétricas es un desplazamiento en el espacio-tiempo. Esto lo podemos traducir físicamente de la siguiente manera: la repetición de una transformación de supersimetría da lugar a la traslación física de una partícula. Para la obtención de una teoría supersimétrica local, habrá que introducir un campo gauge por cada una de las simetrías (rotaciones), mientras que el desplazamiento en el espacio-tiempo es una transformación de Poincaré. Según la transformación de Poincaré, el gravitón sería una partícula gauge adecuada. De esta sencilla forma, la teoría supersimétrica se nos transformaría en una teoría supergravitatoria.

La supergravidad nos da pues una descripción de la relatividad general en lenguaje de teoría cuántica de campos. Esta teoría supergravitatoria implica la aparición de partículas con *spin* 3/2. Su detección experimental daría una gran importancia a la supergravidad.

Esta teoría supergravitatoria ha sido generalizada en un conjunto mucho más restrictivo y unificado de teorías, agrupadas todas ellas bajo el nombre de teorías generalizadas de supergravidad. Son ocho teorías entre las cuales $n = 1^4$ pertenece a la supergravidad en su forma original y $n = 8$ parece aceptarse como la teoría más potente. En este modelo $n = 8$ interviene una familia tremendamente numerosa de partículas (70) que comprendería a todas las partículas conocidas y por conocer, proporcionando un marco para la unificación total de la física, marco en el que la naturaleza se encontraría bajo el control de un único ente.

⁴ Los valores de n en las teorías supergravitatorias indican el número de gravitinos de *spin* 3/2 que se incluyen en la teoría.

En este marco tendríamos por primera vez en la historia de la ciencia una descripción unificada de la materia y de la fuerza.

El mayor logro de este conjunto de teorías es el de su elevado grado de simetría. Al combinar supersimetría y simetría interna, queda unificado todo el grupo de partículas cuya partícula generadora es el gravitón. Este hecho junto al de la cancelación de infinitos hacen de las teorías de la supergravidad generalizada marcos de interés preferente, ya que es precisamente en este tipo de teorías en las únicas en que todas las partículas pueden transformarse en gravitones. En definitiva, todos los diagramas pueden traducirse al diagrama elemental del gravitón, cuya suma (para los cálculos de las probabilidades de interacción) es finita. Estos infinitos se cancelan merced a una propiedad especial del marco espacio-tiempo tetradimensional. Estos infinitos no se cancelarían si nuestro universo tuviese un número de dimensiones diferente.

La confianza en los resultados de las investigaciones es tan alta que prestigiosos físicos consideran ya a esta teoría supergravitatoria $n = 8$ como la culminación de la física teórica. Hasta hoy día las teorías físicas se han considerado como modelos aproximados de la realidad. Al mejorar los modelos, mejoraba también el encaje entre teoría y realidad. Hay científicos que opinan que la teoría supergravitatoria $n = 8$ no es un modelo sino la realidad misma, ya que modelo y realidad en este caso se encuentran en perfecto acuerdo matemático.

7. La cuantización del espacio-tiempo

Una de las partes más oscuras e impresionantes de la gravedad cuántica es la de los efectos que la cuantización supondría sobre el marco espacio-temporal.

Como se citó anteriormente, toda teoría unificada ha de compatibilizar la mecánica cuántica y la gravitación, es decir, ha de cuantizar el propio campo gravitatorio. Pero, como sabemos por la relatividad general, dicho campo gravitatorio no es más que el producto de una deformación espacio-temporal. En este momento, hemos llegado al nudo de la cuestión: la cuantización de la gravedad exige que el propio marco de los acontecimientos (el continuo espacio-temporal) se transforme en un objeto cuántico. Esto supone que, así como en la teoría cuántica de campos ordinaria, el espacio-tiempo era un fondo estable, en la gravedad cuántica, el fondo espacio-temporal no sólo se verá afectado por las fluctuaciones cuánticas que en él se dan, sino que él mismo será fluctuante.

De esta forma, si estudiamos el comportamiento del marco espacio-temporal a nivel microscópico, podríamos distinguir tres niveles.

En un primer nivel, caracterizado por una distancia de 10^{-12} cm (longitud muy superior a la longitud de Planck) correspondiente a la escala del núcleo atómico, las fluctuaciones cuánticas del campo gravitatorio cuantizado son pequeñas, y podemos considerar a la geometría de fondo como uniforme.

Para un nivel de distancias de 10^{-30} cm (longitudes de onda próximas a la de Planck), entraríamos de lleno en el reino de las GUT (los quark y los leptones pierden su identidad unificándose, y las fuerzas electromagnética, débil y fuerte se identifican); en este nivel aparecen fluctuaciones importantes en la geometría de fondo, ofreciendo ésta una rugosidad apreciable.

A un nivel de 10^{-33} cm (longitud de Planck), la curvatura y la tipología del propio espacio-tiempo sufren violentas fluctuaciones asemejando a un mar embravecido. Este espacio-tiempo cuantizado posee una estructura causal fluctuante e incierta.

En este dominio de las dimensiones de Planck, la distinción real entre pasado y futuro se vuelve incierta. Es de esperar que a estas distancias como la de Planck surjan procesos no permitidos en la relatividad no cuántica, más concretamente, velocidades superiores a la de la luz.

En este contexto, surge la noción de topología fluctuante sugerida por Wheeler, según la cual si extrapolamos los campos débiles a los dominios de Planck, llegaríamos a la conclusión de que las fluctuaciones de la geometría serían tan violentas que se podrían producir agujeros negros en el propio espacio-tiempo, cambiando de esta forma radicalmente su topología. En este marco, se observaría un estado de violencia y de perpetuo desorden con estructuras muy complejas en permanente formación y aniquilamiento.

Según Wheeler, las excitaciones de este turbulento mar se nos harían perceptibles en forma de partículas elementales. Y lo que nos permitiría distinguir unas de otras no sería más que la topología asociada a la excitación. Según Wheeler, para comprender los fenómenos de las partículas elementales, hay que comprender la naturaleza del estado fundamental de la gravitación cuántica. La fenomenología de las partículas elementales quedaría reducida entonces a una química de la geometría.

¿Cuál es el modelo matemático que nos puede representar este caos cuántico? ¿Cómo explicar las transiciones topológicas que en él se dan? A pesar de que existen algunos modelos,⁵ algunos proponen considerar a la geometría espacio-tiempo como una realidad secundaria que sólo tiene utilidad para distancias mucho menores

⁵ Recientemente se ha propuesto un modelo matemático para representar la espuma del espacio-tiempo (S.W. Hawking) y hasta el año de 1984 no ha sido factible un cálculo aproximado de las transiciones de aquél (A. Strominger; *Phys. Rev. Lett.*, 52, 1733 (1984)).

que la longitud de Planck. Ante esta última postura, surge una nueva pregunta: ¿de qué naturaleza es la realidad que debería reemplazar el continuo espacio-temporal en la gravitación cuántica?

La respuesta a este nuevo interrogante se perfila desde dos frentes. Por un lado, tenemos la supergravedad que, postulando potentes simetrías, pretende llegar a la unificación total de los campos, como ya hemos mencionado anteriormente. Por otro, se ha reavivado el interés en torno a los modelos ya clásicos de Kaluza (1921) y Klein (1926), que han sido reinterpretados desde la perspectiva cuántica.

8. Las teorías de Kaluza-Klein

El viejo sueño de Einstein (la unificación de los campos electromagnético y gravitatorio en base a una descripción geométrica de la naturaleza), fue recogido por el físico polaco Theodor Kaluza, el cual, allá por el año 1921, intuyó la imposibilidad de acomodar la teoría de Maxwell dentro de los moldes de la geometría. Por ello, se propuso la inmensa tarea de ampliar la geometría hasta unos límites tales que encajara el electromagnetismo en ella.

Siguiendo esta vía, Kaluza postuló una dimensión adicional para el espacio, de tal forma que el continuo geométrico subyacente a la naturaleza aparecería constituido por cuatro dimensiones espaciales y una temporal. En este universo pentadimensional, la gravitación se comporta como la suma de la gravedad normal más el campo electromagnético maxwelliano, cuando es observado desde nuestro restringido mundo de cuatro dimensiones. Si pudiéramos ampliar nuestra percepción a cinco dimensiones, observaríamos un único campo de fuerza: el gravitatorio. Para esta teoría, la onda electromagnética no sería más que una ondulación de la quinta dimensión.

Sin embargo, el éxito matemático de Kaluza quedó empañado por una sencilla pero contundente pregunta. Si el universo espacial es tetradimensional, ¿por qué no es posible captar físicamente la cuarta dimensión? ¿No será la tetradimensionalidad del espacio un mero artificio matemático sin sentido físico?

En 1926, el físico sueco Oscar Klein intentó comprobar si la estructura pentadimensional del modelo de Kaluza era compatible con la mecánica cuántica. Para ello, formuló una nueva versión de la ecuación de Schrodinger en función de cinco variables. Para Klein, la cuarta dimensión espacial tiene existencia real. Supongamos para ello una línea en la que cada uno de sus puntos está asociado a un pequeño círculo; esta asociación de línea unidimensional con círculo unidimensional nos engendra un cilindro bidimensional. De la misma forma, si suponemos un plano en el que todos sus puntos estén asociados a un círculo, verificaremos que la asociación del plano bidimensional con el círculo unidimensional nos genera un continuo tridimensional.

Siguiendo este mismo razonamiento, podemos considerar que en todo punto del espacio tridimensional existe un pequeño círculo asociado, estando este pequeño círculo enrollado en el espacio propiamente dicho, ya que no está dentro de él; estos bucles lo que hacen en realidad es extender el espacio.

Klein emprendió el cálculo de la circunferencia de estos círculos que, asociados a nuestro universo espacio-temporal, nos generan el mundo de cinco dimensiones. Para ello, partió de los valores de la carga del electrón y de otras partículas, así como de los valores de las fuerzas gravitatorias entre ellas, y llegó a la conclusión de que la longitud de estos círculos sería del orden de 10^{-30} cm.

Esta cifra nos explica claramente

te por qué no se observa la quinta dimensión. Es una cifra tan tremendamente pequeña, que sería imposible que, no ya un organismo humano, sino ni tan siquiera un simple átomo pudiera moverse en ella.

Hemos de pensar en esta dimensión como algo que se halla confinado dentro del propio átomo. Para detectar una estructura tan sutil deberíamos disponer de un acelerador de partículas con una potencia mucho mayor que la disponible en los aceleradores actuales.

9. La ampliación de las teorías de Kaluza-Klein: el universo de once dimensiones

El modelo clásico de Kaluza-Klein reposó durante años en el cajón de los recuerdos hasta que, de nuevo, suscitó un apasionado interés, pero esta vez dentro de un nuevo y radical contexto: el contexto de las unificaciones GTU y de las teorías supergravitatorias.

La teoría clásica de Kaluza-Klein es reincorporada a la física teórica en el sentido de suponer que la simetría de los campos de fuerza es debida a una estructura geométrica subyacente a la propia naturaleza. Más aún, las simetrías gauge son en realidad simetrías geométricas asociadas a nuevas dimensiones espaciales.

Los fenómenos que tendría que cubrir una teoría Kaluza-Klein revisada comprenderían tres aspectos. Habría de incluir un campo fermiónico que dé cuenta de los fermiones de nuestro universo. Habría de poseer también, al menos un campo bosónico y, por supuesto, el campo gravitacional que sería el causante de la compactación o arrollamiento de las dimensiones ocultas. Una versión de la supergravedad de 11 dimensiones cumpliría todas estas condiciones.

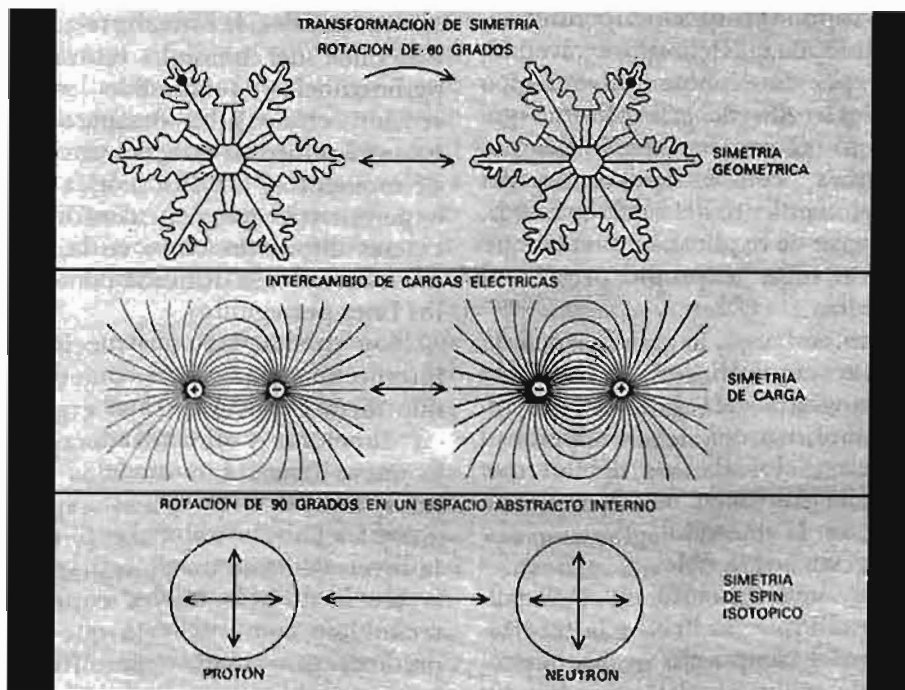
La versión moderna de la teoría Kaluza-Klein postula pues un universo de 11 dimensiones, siete de las cuales estarían enrolladas hasta

tomar unas dimensiones inalcanzables a la observación directa.

Los tipos de topología que pueden corresponder a estas dimensiones compactadas son numerosísimos. Para desarrollar una teoría Kaluza-Klein basada en la supergravedad de 11 dimensiones, deberíamos en primer lugar resolver las ecuaciones de la supergravedad. De entre ellas, muchas corresponderían a un espacio-tiempo tetradimensional asociado a una forma topológica cerrada de siete dimensiones. Después, analizaríamos el grupo de simetría de cada superficie que corresponde a la solución de las ecuaciones. El grupo de simetría determina la teoría gauge no-abeliana que debe unificarse con la gravedad. Las distintas superficies cerradas poseen distintos tipos de simetrías, y cada una de ellas determina una teoría de gran unificación diferente, para las fuerzas distintas de la gravedad. Posteriormente se analizan las estructuras de ondas estacionarias permitidas por las superficies cerradas, estructuras que determinarán las propiedades de las partículas predichas por la teoría en el espacio-tiempo tetradimensional ordinario.

De entre todas estas topologías, hay una que desde hace muchos años ha recabado el interés de los matemáticos, debido a sus especiales características: la heptaesfera, el análogo heptadimensional de la esfera. Mediante este modelo, es posible explicar todos los campos y fuerzas que percibimos en el mundo ordinario, quedando de esta forma descritos desde el átomo más elemental hasta la galaxia más compleja.

Esta esfera heptadimensional si se deforma o achata es capaz de explicarnos el ocultamiento e interrupción de las simetrías; es por ello que este modelo resulta ser la tipología óptima por lo que respecta a las dimensiones comprimidas invisibles. Por otro lado, correspondería a la configuración



Simetrías de la naturaleza determinantes de las propiedades de las fuerzas en las teorías gauge. Reconocemos la simetría de un copo de nieve cuando observamos que la figura no cambia al dar un giro de 60 grados; se dice entonces que el copo de nieve es invariante bajo tales rotaciones. En física se introducen simetrías no geométricas. La simetría de carga, por ejemplo, es la invariancia de las fuerzas que actúan entre un conjunto de partículas cargadas cuando se invierten las polaridades de todas las cargas. En simetría de *spin* isotópico se basa en la observación de que apenas se registrarían cambios en las interacciones fuertes de la materia si se intercambiaban todos los protones y neutrones. Por tanto el protón y el neutrón son sólo estados alternativos de una única partícula, el nucleón, y las transiciones entre los estados pueden realizarse (o imaginarse) ajustando la orientación de un indicador en un espacio interno. Esta clase de simetrías donde la transformación consiste en una rotación interna o en un desplazamiento de fase, se denominan simetrías gauge. Desde Galileo y Newton, las simetrías y las simetrías aparentes de las leyes de la naturaleza han intervenido en la construcción de las teorías físicas. (Tomado de la revista *Investigación y Ciencia* núm. 47).

más estable (interrupción de la simetría) y por ello también a la de menor energía del espacio-tiempo.

¿Es posible sondear esta heptaesfera? Los cálculos recientes dan para la circunferencia de esta heptaesfera enrollada un valor de 10^{-32} cm. Esta dimensión es muy próxima a la menor distancia que con sentido físico conocemos: la distancia de Planck.

Según el principio de incertidumbre de Heisenberg, la energía equivalente que necesitaríamos para poder penetrar en la heptaesfera de Kaluza-Klein sería de 10^{19} veces la masa del protón. A esta energía podríamos estudiar la estructura

espacio-temporal de once dimensiones, pero para ello necesitaríamos un acelerador de partículas con una potencia enorme.

De cualquier forma, las investigaciones que en estos últimos años se han concentrado en torno a estos modelos, han hecho surgir problemas difícilmente compatibles con el análisis que de la realidad hacemos en el mundo tetradimensional. Concretamente, en todos los mundos de once dimensiones estudiados, se predice la existencia de neutrinos dextrógiros y levógiros por partes iguales. Esto contrasta con la observación, ya que, en ella, todos aparecen como levógiros. Por otro lado,

la extremada pequeñez de las dimensiones compactadas proporciona una enorme curvatura a las dimensiones restantes espacio-temporales, entrando en contradicción con las observaciones astronómicas que dan una curvatura media al universo a gran escala, casi nula. Por otra parte, tenemos el eterno problema de los infinitos que surgen en la teoría cuántica de la gravedad. Los avances más recientes a lo largo de 1985 nos hablan de un universo de 10 dimensiones en el contexto de la teoría de supercuerdas.

Llegados a este punto, convendría recordar que se tardó más de 10 años para la correcta aplicación de las teorías gauge no-abelianas a la unificación de las fuerzas elementales. Esto nos sugiere que, si queremos obtener resultados palpables acerca de la interrelación de la supergravedad con las teorías de Kaluza-Klein, habremos de cultivar la paciencia y esperar a una mayor madurez de los trabajos teóricos, así como de la propia matemática inherente a ellos. El binomio matemática-física teórica se nos hace cada vez más inseparable, y así como la teoría de los números anticonmutantes potenció a la supergravedad al estatus que hoy ocupa, es más que probable que la gravedad cuántica exija de la matemática un nuevo desarrollo que aún está por florecer.

10. Algunas reflexiones en los límites de la física

El nuevo planteamiento de las teorías de Kaluza-Klein en el contexto de la supergravedad son origen de profundos interrogantes acerca del conocimiento, realidad y existencia del propio universo.

En la teoría de Kaluza-Klein las partículas son excitaciones en una geometría de once dimensiones, siendo dicha geometría el origen de lo que hemos dado en llamar realidad. Más aún, la unificación de Kaluza-Klein con la supergra-

vedad, en caso de coronarse con éxito, daría lugar a una superfuerza que sería la llave no sólo de la comprensión, sino también de la manipulación de dicha realidad. Esta superfuerza sería el origen de la existencia. Mediante ella, podríamos manipular la estructura del espacio y del tiempo, podríamos controlar, producir y ordenar a la materia misma, pudiendo llegar incluso a la creación de formas desconocidas de ella. Podríamos quizá llegar a manipular la propia dimensionalidad del espacio-tiempo, creando mundos artificiales de características totalmente nuevas.

La llave de acceso a estas jerarquías de la realidad aún inexploradas es la energía. Como citábamos anteriormente, el principio de indeterminación de Heisenberg nos obliga a tener que disponer de energías cada vez más fabulosas con objeto de poder sondear distancias cada vez menores. Los aceleradores de partículas más potentes hoy en funcionamiento son el Fermilab y el SPS del CERN, que pueden alcanzar energías equivalentes a 500 veces la masa del protón. Existe un proyecto en fase de diseño (el VBA) que podría alcanzar una energía de 20 000 veces la masa del protón. De cualquier forma, la distancia que media entre 10^2 y 10^{14} masas del protón (es decir entre la unificación electrodébil y las GTU) es de tal magnitud que se espera razonablemente que jamás pueda sortearla la raza humana. Y este es un punto de la mayor trascendencia, ya que la validez de teorías no sujetas a experimentación caen fuera del campo de la física introduciéndonos en el de la metafísica.

Parece sin embargo que la física teórica ha encontrado una salida en este otro gran laboratorio que es la naturaleza, la cual comenzó su existencia hace unos 18 000 millones de años en una inimaginable explosión cósmica llamada *big-bang*.

Hoy en día, la teoría de campo

que supone el modelo superunificado de Kaluza-Klein-supragravedad, es capaz de explicar a nivel lógico el desarrollo de la explosión que generó el propio espacio-tiempo. Además, con la aportación del funcionamiento del vacío cuántico, es capaz de explicar las fuerzas que dieron lugar al propio origen del universo.

Sin embargo, la grandiosidad de esta teoría unificada del Todo y la cosmogonía científica de ella resultante, no nos deben impedir el constatar los flancos débiles que en ella subyacen. Un ejemplo de ello es la metodología utilizada para esta nueva física.

La investigación de Faraday-Maxwell que les llevó a la teorización del campo electromagnético, no debemos olvidarlo, poseía un nexo claro de unión entre los hechos físicos y la teorización. Concretamente, Faraday y Maxwell pudieron experimentar en sus laboratorios efectos que les impulsaron a la búsqueda de un campo unificado que los abaricara.

La situación epistemológica de Einstein ya no es la misma cuando intenta unificar el campo electromagnético con el gravitatorio. Einstein no está en posesión de ninguna manifestación empírica que entremezcle los efectos gravitatorios con los electromagnéticos. Einstein está impulsado por otro motor, el motor de la simplicidad, el motor de la estética. No debemos olvidar la amarga lección que nos da la historia de la ciencia a este respecto. Einstein fracasó en el intento. No se puede forzar a la lógica ni a la matemática en el sentido de arropar nuestros presupuestos (estéticos, ontológicos o de cualquier otro tipo) sin que, a la larga, seamos derrotados a pesar de nuestra obstinación.

Desde este punto de vista epistemológico-histórico, convendría (pienso que cada vez con mayor urgencia) analizar cuidadosamente los principios metodológicos de la nueva física. En las investiga-

ciones actuales, la estrecha relación dialéctica del binomio teoría-experimentación (entendido en el sentido clásico) ha desaparecido hasta el punto en que, en cantidad de momentos, la física teórica y la experimental parecen conformar cincias diferentes tanto en la propia metodología utilizada como en los fines perseguidos.

Hoy en día, las construcciones interpretativas (audaces conjeturas que diría Popper), se han erigido en directoras y dinamizadoras de la nueva física. Los modelos teóricos indican qué líneas experimentales han de trabajarse (y no a la inversa), hasta un punto tal que la teoría no sólo espera a que la tecnología compruebe lo que ella predice, sino que se permite el lujo de edificar construcciones teóricas que jamás podrán ser confirmadas empíricamente (recordemos las GTU o los modelos supergravitatorios). Unos argumentarán que la capacidad de la matemática y de la lógica han abierto unos horizontes, impensables hace escasos años, para el desarrollo y conocimientos científicos. Esto es cierto. Sin embargo, también es cierto que la teoría pura nos ha conducido a un grado de abstracción y alejamiento de la realidad (de la confirmación empírica) tal que no sería extraño que, no muy lejos en el tiempo, la ciencia sufriera una de esas tremendas crisis que han jalonado históricamente su desarrollo.

¿Por qué la naturaleza en su más profunda estructura ha de ser monista y no dual o múltiple? ¿Por qué es estéticamente preferible la interpretación monista? ¿Hasta qué punto la estética puede condicionar y hacerse dominante entre los elementos metafísicos de las construcciones interpretativas?

Por un lado, el alejamiento de la experimentación y, por otro, el carácter fundamental que se da a la simetría en la naturaleza como sujeto activo que, ante cualquier agresión desestabilizadora, respon-

de generando fuerzas elementales, adornan a la física contemporánea con fuertes tintes idealistas. En este sentido, quisiera citar un pasaje escrito recientemente por Paul Davies, profesor de física teórica en Cambridge, pasaje que me parece suficientemente expresivo de lo anteriormente comentado:

... Es intrigante pensar que un físico teórico que no supiera nada de electromagnetismo pero que creyera juiciosamente que la naturaleza está basada en la simetría, podría deducir su existencia (la del electromagnetismo) enteramente de las condiciones de la más simple de las simetrías locales gauge y de la llamada simetría de Lorentz-Poincaré de la relatividad especial. Utilizando solamente las matemáticas y guiado por esas dos poderosas simetrías, el teórico podría ser capaz de reconstruir las ecuaciones de Maxwell *sin haber realizado nunca ningún experimento* con la electricidad o el magnetismo y sin sospechar siquiera su existencia. . . con este razonamiento puramente abstracto, nuestro teórico se vería abocado a esperar que el electromagnetismo existiera en el mundo real. Podría llegar incluso a elaborar todas las leyes del electromagnetismo, la existencia de las ondas de radio, la posibilidad de la dinamo, etc., que en realidad fueron descubiertas utilizando experimentos prácticos. . .⁶

No quisiera terminar sin citar otro gran problema que surge en los modelos de universo en 11 dimensiones como los anteriormente estudiados. Este problema es el de que, cualquier modelo que unifique

la gravedad tiene que ser un modelo cuantizado. Ello implica que cualquier modelo del universo postulado estará sujeto a toda la problemática epistemológica inherente a la mecánica cuántica: interpretación filosófica de las observables latentes, reducción del paquete de ondas, superposición de estados y universos potenciales, variables ocultas no locales, etc., en definitiva, interpretación de la realidad. Desde este punto de vista es cuando menos inquietante el observar las diversas corrientes que se dan en la interpretación filosófica de la mecánica cuántica. Así, Hugh Everett y Bryce De Witt defenderán la realidad de la onda, considerándola como una descripción auténtica del mundo, y postularán la existencia de mundos coexistentes como secciones de un superespacio en el cual las realidades potenciales se

han truncado en reales, tan reales como nuestra propia existencia. En otra línea, tenemos lo que recientemente se ha dado en llamar 'principio antrópico', que defiende la participación activa del ser pensante en la selección del universo que nos ha tocado vivir y, por tanto, investigar, o la afirmación de Wheeler que, adoptando una versión extrema de dicho principio antrópico, aseverará que el elemento básico que ha de poseer un universo para ser real es el de que se haya dado en él un proceso evolutivo tal que puedan llegar a existir observadores.

Esto no sería más que una pequeña muestra del pronunciado desliz que se está produciendo en ciertos campos de la epistemología de la física, haciendo de ésta una ciencia difícilmente reconocible para una mentalidad científica de principios de siglo.

Bibliografía

1. Ashtekar, Abhay: "La gravitación cuántica", *La Recherche*, enero 1985.
2. Bunge, Mario: *Controversias en física*, Edit. Tecnos, Madrid 1983.
3. Davies, Paul: *Superforce*, Simon and Schuster, N. Y. 1984. *Otros mundos*, Antoni Boch, Barcelona 1983. *The edge of infinity*, J. M. Dent and Sons Ltd., London 1985.
4. D'Espagnat, Bernard: *En busca de lo real*, Alianza Univers, Madrid 1983.
5. De Wit Bryce, S.: "Gravedad cuántica", *Scientific American*, febrero 1984.
6. Duff, M. J.: *In quantum gravity*, Oxford University Press, 1981. Duff, M. J. y Usham, C. J.: *Quantum structure of space and time*, University Press, Cambridge, 1982.
7. Ferrara, A. y Fayet, P.: "Supersymmetry", *Physics Reports*, (1981).
8. Freedman, D. y Van Nieuwenhuizen, P.: "Las dimensiones ocultas del espacio-tiempo", *Scientific American* 1985; "Supergravedad y unificación de las leyes de la física", *Scientific American*, mayo 1985.
9. Gale, G.: "El principio antrópico", *Scientific American*, febrero 1982.
10. Georgi, H.: "Teoría unificada de las partículas elementales de las fuerzas", *Scientific American*, junio 1981.
11. Hawking, S.W.: *In general relativity: An Einstein centenary survey*, Cambridge Univ. Press, 1979.
12. Hilger, A.: *Quantum Theory of gravitation: Essays in honor of B. S. De Witt*, 1984.
13. Hooft, G.: "Teorías gauge de las fuerzas entre partículas elementales", *Scientific American*, agosto 1980.
14. Indurain, Francisco José: "Teorías unificadas de las interacciones fundamentales", *Scientific American*, marzo 1978.
15. Jauch, J. M.: *Sobre la realidad de los cuantos*, Alianza Universidad, Madrid 1985.
16. Langacker, P.: "Grand unified theories and proton decay", *Physics Reports*, 1981.
17. Lee Glashow, S.: "Quarks con color y sabor", *Scientific American*, octubre 1985.
18. Margenau, H.: *La naturaleza de la realidad física. Estructura y Fisión*, Tecnos, Madrid 1970.
19. Nambu Yoichiro: "El confinamiento de los quarks", *Scientific American*, enero 1977.
20. Penrose, R.: *Larger scale of space-time*, Cambridge Univ. Press, 1973.
21. Popper, Karl R.: *Teoría cuántica y el clima en física*, Tecnos, Madrid 1985.
22. Weinberg, S.: "Teorías unificadas de las interacciones entre partículas elementales", *Scientific American*, julio 1974. "La desintegración del protón", *Scientific American*, agosto 1981. *The first three minutes (A modern view of the University)*, Basic Books, Inc. Publishers, New York, 1977.
23. Wilson Kenneth, G.: "Problemas físicos con muchas escalas de longitud", *Scientific American*, octubre 1979.

⁶ Paul Davies: *Superforce*, Simon and Schuster; N.Y. 1984.