

CONFERENCIAS CÉLEBRES

Continuamos esta sección de la revista, dedicada a **Conferencias célebres** impartidas en la Universidad Autónoma de Madrid a lo largo de su historia, bien como Lecciones inaugurales de curso académico, o bien impartidas en su investidura por Doctores Honoris Causa nombrados por esta universidad. Se trata por tanto de conferencias con importantes contenidos relacionados con la ciencia y el progreso del conocimiento, e impartidas por personalidades ilustres del mundo académico, científico o social.

En esta ocasión publicamos la **Lección inaugural** de la Universidad Autónoma de Madrid en el Curso académico 1994-95, pronunciada por **D. Cayetano López**, Catedrático de Física Teórica y Ex-Rector de la UAM.

EN BUSCA DE LA UNIFICACION DE LAS FUERZAS

Cayetano López Martínez
Catedrático de Física Teórica. Ex-Rector de la UAM

Algunos científicos, como León Lederman, premio Nobel de Física por sus hallazgos experimentales, han interpretado la historia de la Física como una búsqueda permanente de la última partícula elemental. Entendida ésta como el componente más simple y fundamental de la materia, el átomo en el sentido de los griegos, es decir lo que ya no tiene más estructura interna, y no en el sentido técnico actual de elemento químico simple. El descubrimiento de los átomos en este segundo sentido no es más que una de las etapas en esa búsqueda.

Desde luego esa interpretación es correcta y responde a la realidad. En esta lección yo insistiré más en otro aspecto de esa historia interminable, relacionado y complementario con el anterior pero, a mi juicio, más general: la búsqueda de la unificación, o, si se quiere, de la unidad conceptual subyacente a todos los fenómenos físicos y, por lo tanto, a interacciones y partículas. La hipotética existencia de una o unas pocas partículas simples cuyos distintos aspectos y propiedades den lugar a la variedad empíricamente existente en el mundo físico, sería una parte importante de ese logro.

No se trata, como intentaré demostrar en lo que sigue, de una especie de generalización metafísica o de fundamentalismo ideológico o científico; se trata del resultado natural, y casi forzado, de la sucesión de avances teóricos y experimentales en la comprensión de las interacciones y componentes fundamentales de la materia, especialmente a lo largo del último siglo.

Los principios de simetría, simplicidad y hasta "naturalidad" y "elegancia", pueden encontrarse ya en esa especie de milagro intelectual que supuso el pensamiento griego clásico, pero lo importante, en este contexto, es que la aplicación de esos principios nos ha llevado al entendimiento cada vez más profundo del mundo físico; y que ha sido revalidada, una y otra vez, por el experimento. Cada vez que la experiencia ha ido confirmando teorías y esquemas conceptuales basados en una gran unidad y

simetría de componentes e interacciones, nos ha ido sugiriendo que era posible ampliar el marco de nuestra comprensión sobre la base de esquemas todavía más simétricos y unificados. Es, pues, la combinación de experimento y especulación teórica lo que ha ido conduciéndonos a una visión unificada de gran ambición conceptual, independientemente, o complementariamente, del atractivo intelectual, y hasta estético, que tales concepciones tienen para los físicos.

En toda explicación científica de una serie de fenómenos siempre hay un grado de unificación en sentido amplio. En efecto, en palabras de Feynman, uno de los más grandes físicos que han existido, entender un fenómeno físico concreto es poder considerarlo como un caso particular de la aplicación de una ley que gobierna el comportamiento de toda una clase de fenómenos. Estos pueden ser operativamente y empíricamente muy diversos, e inconexos en apariencia; sin embargo, su descripción resulta de la aplicación de una misma ley, o de la acción de una misma fuerza, a condiciones iniciales distintas y a distintos sistemas físicos. Lo que varía de un fenómeno a otro son las propiedades que caracterizan cada caso particular, mientras que la dinámica, las interacciones que rigen su comportamiento, es la misma.

En ese sentido amplio, el hallazgo de una ley física, o el conjunto de leyes que constituyen una teoría física, permite la comprensión unificada de fenómenos muy diversos. La ley de la Gravitación Universal de Newton explica en base a los mismos principios, al mismo tipo de interacción, cosas tan dispares como el movimiento de un péndulo en uno de los laboratorios de esta Universidad, las mareas o las órbitas de los planetas. Sin la existencia de esa ley nadie hubiera sospechado que eran manifestaciones, simples, por cierto, de una misma fuerza; de hecho, ningún filósofo o científico de la Antigüedad, que entonces no había esas distinciones, llegó a sospecharlo. Y sin embargo en lo único que difieren fenómenos tan dispares como los mencionados es en los sistemas en juego, mientras que las interacciones entre ellos se derivan de una única fuerza.

Una comprobación importante en favor de la interpretación newtoniana de esos fenómenos es la siguiente: en la formulación de la ley de la Gravitación aparece una constante desconocida y solo una, la llamada constante de Newton G_N , que es una de las constantes universales existentes en la naturaleza. Su valor puede ser medido a partir del movimiento de péndulos, por ejemplo, o a partir de las órbitas de los planetas. Y con toda la precisión a la que se ha podido llegar, que es mucha, ambas estimaciones independientes dan el mismo resultado. Dicho valor, que es una medida de la intensidad de la interacción gravitatoria, en un cierto sistema de unidades que utilizaré consistentemente a lo largo de la lección, es el siguiente:

$$G_N = 5,90 \times 10^{-39} M_P^{-2}$$

(donde M_P es la energía contenida en la masa de un protón).

Una interpretación algo más estricta de lo que hoy entendemos por unificación va más allá de lo dicho hasta ahora. Se habla de unificación cuando fuerzas distintas, incluso teorías distintas que explican vastos ámbitos de la realidad física, pueden ser entendidas como aspectos distintos de una única fuerza, o una única dinámica. El primer ejemplo de esa unificación en sentido más estricto, y un verdadero logro intelectual, fué el Electromagnetismo clásico. El soberbio trabajo experimental de científicos como Faraday, y la síntesis teórica lograda por Maxwell en la segunda mitad del siglo pasado condujeron a una comprensión completa y conceptualmente única de todos los fenómenos relacionados con la electricidad y el magnetismo conocidos hasta entonces.

Las propiedades magnéticas y eléctricas de los sistemas físicos, como la misma Tierra, dotada de campo magnético, o los imanes naturales, eran conocidas de antiguo, pero sus manifestaciones empíricas no podían ser más dispares. La teoría unificada, resumida en las famosas ecuaciones de Maxwell, permite entender que ambas clases de fenómenos, eléctricos y magnéticos, son el resultado de la existencia de una misma y única propiedad de la materia llamada carga eléctrica. Cuando las cargas están en reposo respecto del sistema sobre el que interactúan, sus efectos son únicamente

eléctricos, mientras que cuando se encuentran en movimiento relativo aparecen los fenómenos que se han venido a llamar magnéticos. Así, el magnetismo natural y las propiedades de los imanes son el resultado del movimiento, en el interior de los átomos, de las partículas cargadas que los componen.

Una teoría completa de las interacciones asociadas a la propiedad carga eléctrica debe, por tanto, comprender los aspectos eléctrico y magnético, que se nos aparecen, en ese contexto, como manifestaciones distintas de una misma interacción, dependiendo de la cinemática del sistema estudiado. La teoría explica como pasar de un sistema puramente electrostático a uno en que se den fenómenos de magnetismo y las relaciones entre ambos tipos de fenómeno. El Electromagnetismo clásico es, pues, un ejemplo paradigmático de teoría unificada. Resultado de la curiosidad y del trabajo de un conjunto de científicos interesados en conocer mejor las leyes y la naturaleza del mundo físico, es decir de lo que habitualmente se califica como investigación básica, ha proporcionado, de paso, los conocimientos sobre los que se ha desarrollado toda la industria eléctrica. Desde el AVE hasta una batidora eléctrica están basados en esa relación entre electricidad y magnetismo.

No hay, pues, más que una única interacción, la electromagnética, cuyas manifestaciones experimentales son diferentes según la situación relativa de los sistemas interactuantes. Como una es también la propiedad dinámica responsable de la interacción en cuestión, la carga eléctrica.

La teoría contiene toda una serie de cualidades que la dotan de una belleza especial, como por ejemplo la indicación de que las propiedades de invariancia del espacio-tiempo no son las que se derivan de nuestra experiencia cotidiana, propias de la Mecánica de Newton y Galileo, sino otras que se encuentran en la base de la formulación de la Mecánica de Einstein, la Relatividad Especial.

Además del Electromagnetismo, la única otra interacción fundamental presente en el mundo físico macroscópico, es decir operativa a distancias del orden o superiores al tamaño de un átomo, es la Gravitación. No es extraño, pues, que Einstein, dotado más que nadie de ese sentido de la simetría y de la visión unificada de los fenómenos, buscara una teoría unificada del Electromagnetismo y la Gravitación; y que en la década de los veinte se produjeran algunos intentos de unificación que no culminaron. El empeño era y es mucho más difícil de lo que nadie podía imaginar en la época, hasta el punto de que una tal teoría no existe todavía y no es probable que exista en un futuro cercano.

Desde luego, desde Maxwell se ha avanzado mucho en la comprensión unificada de las fuerzas, pero por derroteros, y en cierto modo rodeos, que se alejan de la idea tan intensamente perseguida por Einstein. Pero antes de llegar a ningún avance significativo, hubo que proceder a una unificación de otro tipo. Se trata de la integración, dentro de una misma teoría, en lo que se llama Teoría Cuántica de Campos, de la Física Cuántica, que es el marco en que tienen lugar los fenómenos físicos a escala microscópica, es decir atómica o menor, con la Relatividad Especial, que no es otra cosa que la formalización de la cinemática real del espacio-tiempo.

En efecto, a finales del siglo pasado se creyó haber llegado a una especie de síntesis grandiosa formada por la Mecánica de Newton que describía la interacción gravitatoria y, en general, proporcionaba un marco para la comprensión de las interacciones entre partículas, y el Electromagnetismo. La radiación y las partículas eran objetos físicos diferenciados con propiedades completamente distintas. Desgraciada o afortunadamente, lo que ocurre en el interior de los átomos y entre los átomos no puede ser descrito por ese marco clásico y requiere de la introducción de uno nuevo, el cuántico, extraño a nuestra intuición macroscópica, no del todo entendido en sus últimas consecuencias, pero de un poder predictivo inigualado.

No me detendré en demasiados detalles al respecto; el caso es que así se desarrolló lo que ha venido en denominarse Electrodinámica Cuántica, la primera teoría que integra los principios de la Mecánica Cuántica con los de la Relatividad Especial contenidos en las ecuaciones de Maxwell. Dicha teoría, desarrollada muy especialmente a lo largo de los años cuarenta, ha producido algunas de las

predicciones más ajustadas que se conocen y ha permitido comprender fenómenos de enorme sutileza en el mundo de las interacciones de la radiación electromagnética con la materia, por ejemplo, con núcleos y electrones. Por ejemplo, una cierta propiedad de los electrones, su momento magnético, que, en primera aproximación es igual a 1, puede calcularse con una gran precisión en el marco del Electromagnetismo Cuántico con el siguiente resultado:

Cálculo Teórico: $\mu_e = 1,001\ 159\ 652\ 460$ (200)

Medición Experimental: $\mu_e = 1,001\ 159\ 652\ 193$ (010)

Una propiedad de esta teoría, que luego se revelará esencial, es una simetría abstracta en virtud de la cual una determinada transformación del campo electromagnético y de los campos que definen las partículas en interacción, dejan a ésta inalterada, lo que implica la propiedad de conservación global de la carga eléctrica para un sistema físico cualquiera.

Otra de las consecuencias de esa descripción más completa es la naturaleza corpuscular de la radiación electromagnética, cuyos portadores, los cuantos, de la radiación, son los fotones. Desde ese punto de vista, la radiación y la materia, entendidas del modo excluyente anterior al advenimiento de la Mecánica Cuántica, son la manifestación de un mismo tipo de sistemas físicos, partículas dotadas de propiedades especiales, cuánticas, que incorporan a las que eran definitivamente propias de los corpúsculos clásicos y de la radiación. De todas formas, ambas clases de partículas tienen una propiedad intrínseca, llamada el spin, cuyos valores son distintos y sus propiedades colectivas son, en consecuencia, dispares. Esa diferencia será objeto más tarde de una nueva tentativa de unificación.

La intensidad de la interacción electromagnética, a fin de compararla con la gravitatoria, viene fijada por un cierto parámetro cuyo valor es:

$$\alpha_{EM} = 1/137 = 0,00730$$

Pero una de las consecuencias más extraordinarias del tratamiento cuántico de la fuerza en cuestión es que su intensidad depende de la distancia a la que actúe. Ello se debe a las propiedades del vacío cuántico que no son tan sencillas como podría imaginarse ya que, cuánticamente, es posible la aparición en ese vacío de pares de partículas virtuales, que se mantienen como tales durante períodos de tiempo muy pequeño antes de volver a aniquilarse, pudiendo apantallar así la carga que actúa como fuente de la interacción.

De hecho, el valor especificado más arriba es el que corresponde a distancias del orden o superiores al tamaño de un núcleo, unas cien mil veces menor al de un átomo, cuyo diámetro, como se sabe, es del orden de una cienmillonésima de centímetro; es decir, a todos los efectos prácticos es constante. Cuando la distancia disminuye, dicho valor aumenta lentamente. Ahora bien, existe una relación entre la distancia a la que se prueba una determinada carga y la energía a que se produce la interacción. Para penetrar a distancias menores es preciso poner en juego energías superiores; la intensidad de la interacción electromagnética aumenta, pues, con la energía a que se produce la interacción.

También desde principios de siglo se sabe que, además de las dos interacciones mencionadas hasta el momento, existen otras dos clases de fuerzas elementales, no accesibles directamente a la experiencia macroscópica, aunque algunos de sus efectos, por ejemplo, la radiactividad natural, sí que lo son. El motivo de que no sean directamente observables es que su rango de acción es del orden o menor que el tamaño del núcleo atómico. Sólo a estas distancias infinitesimales actúan estas dos nuevas interacciones, llamadas nuclear fuerte y nuclear débil, o fuerte y débil, sencillamente.

La interacción fuerte es, en particular, la responsable de que existan los núcleos atómicos al mantener establemente ligados neutrones y protones, contrarrestando la repulsión electrostática entre

estos últimos. La interacción débil, por su parte, es residual en la mayoría de los casos, aunque para algunas importantísimas partículas como son los neutrinos, es la dominante. El hecho de que ambas nuevas interacciones tengan un alcance microscópico hizo que su formulación se hiciera, desde el principio en un marco cuántico. Fueron desarrollándose así, de un modo zigzagueante, con avances y retrocesos y caminos sin salida que hubo que abandonar, teorías cuánticas de campos para ambas.

La interacción fuerte resultó tener una estructura similar al Electromagnetismo, sólo que los sistemas sensibles directamente a esa interacción son los quarks, componentes más simples en el interior de protones, neutrones y centenares de partículas creídas anteriormente ser elementales. Los quarks son, respecto de la interacción fuerte, como las partículas cargadas, los electrones, por ejemplo, para la interacción electromagnética.

Con algunas diferencias: la propiedad básica a la que se acopla la fuerza fuerte no es la carga eléctrica, sino una nueva carga, sólo presente en los quarks, que se ha venido a llamar color, aunque nada tenga que ver con el color en sentido ordinario; la teoría que la describe se llama, por ese motivo, Cromodinámica Cuántica. La simetría abstracta de la Electrodinámica Cuántica sigue existiendo en este caso, aunque en una formulación ligeramente más compleja, por lo que no hay una sola clase de portadores de la interacción, como el fotón, sino ocho clases de portadores distintos (de colores distintos) llamados gluones, que son las partículas que median la interacción entre quarks.

Como consecuencia de estas diferencias, la interacción entre quarks se hace más intensa a medida que la distancia entre ellos aumenta (lo contrario de lo que ocurre entre dos cargas eléctricas, como vimos antes), por lo que los quarks no pueden alejarse a distancias superiores al tamaño de los núcleos atómicos y permanecen ligados formando sistemas "incolores" como el protón, el neutrón y el resto de partículas similares.

Así, la fuerza nuclear fuerte directamente observable entre protones y neutrones, por ejemplo, en el interior de un núcleo, se entiende hoy como la consecuencia de las complejas interacciones entre los quarks que los componen, del mismo modo que se entienden las interacciones entre átomos y moléculas como el resultado de las que tienen lugar entre los electrones y núcleos que las componen. Conviene recordar que la intensidad de la interacción fuerte disminuye al disminuir la distancia, es decir al aumentar la energía de interacción entre quarks, mientras que la intensidad de la interacción electromagnética aumenta. El parámetro equivalente a α varía desde un valor próximo a las distancias del orden de los núcleos atómicos hasta un valor del orden de 0,1 a distancias mil veces menores, que son las más pequeñas accesibles por el momento a la experiencia.

Permítanme una pequeña digresión sobre los quarks. En principio con dos clases de quarks, llamados u y d, es suficiente para explicar la existencia de protones, neutrones y algunos cientos más de partículas. Esas dos partículas forman lo que se llama una familia si les añadimos el electrón, presente en la corteza de los átomos, y el neutrino, que es una partícula verdaderamente escurridiza y difícilmente detectable, pero fundamental y omnipresente en el Universo como demuestra el hecho de que en esta habitación existe un flujo de neutrinos procedentes del Sol del orden de unos mil millones por segundo y por centímetro cuadrado. El electrón y el neutrino no son sensibles a la interacción fuerte (no tienen carga de color) y se llaman genéricamente leptones. Esas cuatro partículas bastarían para construir la totalidad del mundo físico, en toda su complejidad. Así, la verdadera tabla de componentes elementales de la materia no tendría más que cuatro casillas (Tabla 1).

Tabla 1
«SISTEMA PERIODICO» DE PARTICULAS ELEMENTALES

Carga	QUARKS
+ 2/3	u (up)
- 1/3	d (down)

Carga	LEPTONES
- 1	e (electrón)
0	ν_e (neutrino)

Por razones no comprendidas todavía, existen dos familias de partículas más. Cada una de ellas es una especie de fotocopia de la primera, sólo que, con más masa, por lo que las partículas que contienen alguno de esos nuevos quarks son inestables y se desintegran rápidamente. No juegan papel alguno en el mundo físico actual, ya que sólo son producidas raramente en fenómenos cósmicos o astronómicos o en los aceleradores de partículas elementales, para desintegrarse a continuación rápidamente. Sin embargo, debieron jugar un papel importante, tan importante como el de la primera familia, en los episodios que jalonaron la historia del Universo primitivo. En cualquier caso, ignoramos absolutamente la razón de tan extraño capricho de la naturaleza, aunque sabemos de cierto, empíricamente, que no hay más que tres familias (Tabla 2).

Tabla 2
«SISTEMA PERIODICO» DE PARTICULAS ELEMENTALES

Carga	QUARKS		
+ 2/3	u (up)	c (charm)	t (top)
- 1/3	d (down)	s (strange)	b (bottom)

Carga	LEPTONES		
- 1	e (electrón)	μ (muón)	τ (tau)
0	ν_e (neutrino)	ν_μ (neutrino)	ν_τ (neutrino)

El neutrino tiene sus correspondientes copias en las otras dos familias, mientras que el electrón posee parientes que son exactamente iguales, pero en más pesado e inestables, llamados μ y τ . Las copias del quark u son el c (de charm) y el t (de top), recientemente encontrado; las del quark d son el s (de strange) y el b (de bottom). Cada una de esas seis variedades constituye lo que se llama un *sabor*. Pues bien, la Cromodinámica Cuántica implica que la interacción fuerte entre quarks y gluones es indiferente al *sabor* de los quarks y es sólo sensible al *color*. En ese sentido, verificado experimentalmente con gran precisión, los gluones son insensibles al *sabor* y sólo distinguen el *color* de un quark, del mismo modo que los fotones sólo ven la carga eléctrica de las partículas independientemente de sus otras propiedades.

En cuanto a la interacción débil, puede construirse también una teoría de campos, similar a la Electrodinámica y a la Cromodinámica, en la que la propiedad fundamental, responsable de la existencia de dicha interacción es la posición que ocupa la partícula considerada en cada una de las tres familias de componentes fundamentales. También se pueden identificar los portadores de esa interacción, que son cuatro en este caso, similares al fotón y a los gluones. Tan similares que, de hecho, uno de los cuatro acabará siendo el fotón. Es decir, al intentar comprender la interacción débil y formularla de un modo consistente, lo que se encuentra es algo que reúne las propiedades de la interacción débil y de la interacción electromagnética. Es el segundo caso de teoría unificada.

En realidad, la cosa no es tan fácil. Lo que se encuentra es un único tipo de interacción, con los cuatro portadores teniendo propiedades semejantes, mientras lo que se observa en la naturaleza es la existencia de dos interacciones de intensidades y propiedades radicalmente distintas. En concreto los portadores de la interacción débil, que en la versión que acabo de mencionar tienen, como el fotón, masa en reposo igual a cero, en la realidad son tres partículas extremadamente masivas, unas cien veces más pesadas que el protón, las famosas W^+ , W^- y Z^0 . Desde luego, en su forma primera, si no ocurre nada más, una tal teoría unificada, tan sumamente simétrica, no responde a lo observado experimentalmente.

Lo que ocurre es que las soluciones simétricas de una tal teoría, con un grado de unificación considerable, ya que engloba indistinguiblemente el Electromagnetismo y la interacción débil, no son estables más que a temperaturas gigantescas. Por debajo de esas temperaturas, las soluciones más estables, de menor energía, son asimétricas y en esa ruptura de la simetría, que se llama espontánea, se precipita la diferenciación entre lo que queda como genuina mente electromagnético y lo que es propio de la interacción débil.

Las rupturas espontáneas de ciertas simetrías en la naturaleza, como función de la temperatura, ocurren con frecuencia. Así, la interacción entre las moléculas de un líquido es normalmente simétrica desde el punto de vista espacial: no hay direcciones particulares del espacio a lo largo de las cuales exista una diferencia en la intensidad de las fuerzas en presencia. Así, en un líquido, a la temperatura a la que son estables, esa simetría se manifiesta directamente en el hecho de que, desde un punto en su interior, las propiedades del mismo son idénticas a lo largo de cualquier dirección que escojamos. Pero, sin embargo, al bajar la temperatura por debajo de un cierto valor, el cero centígrado en el caso del agua, hay un brusco cambio de propiedades y el líquido solidifica convirtiéndose en un sistema en el que los átomos o las moléculas se encuentran ordenados en una red cristalina y, por tanto, alineándose a lo largo de direcciones determinadas. Ahora, desde el interior del sólido las propiedades sí que varían según la dirección de observación.

Se produce así una ruptura espontánea de la isotropía inicial y el sistema, cuyas interacciones elementales son simétricas, ha escogido una determinada configuración no simétrica. La simetría sigue implícita en el hecho de que cualquier dirección de cristalización puede ser escogida, de modo que, considerando todas las posibles orientaciones, equivalentes desde el punto de vista físico, se recupera la isotropía inicial. Pero el hecho es que, por debajo de esa temperatura, el líquido, previamente isótropo, se convierte en un sistema con direcciones definidas a lo largo de las cuales las propiedades

del mismo ya no son idénticas; en un sistema en el que ya no es visible la simetría presente en la interacción inicial.

Del mismo modo, para que la unificación existente en la Teoría Electrodébil se manifieste en estados físicos concretos, es preciso que la temperatura, es decir la energía de interacción promedio entre partículas, sea superior a un cierto valor. En este caso mil millones de millones de grados. Por debajo de esa temperatura, se produce la ruptura espontánea y una diferenciación práctica de ambos tipos de fuerza. El mecanismo más consistente que se conoce para inducir esa ruptura es a través de la existencia de una nueva partícula, la famosa partícula de Higgs, cuyas interacciones desestabilizan la simetría, que sigue presente a nivel de la formulación básica de la dinámica en juego, pero se rompe a nivel de las soluciones concretas en que viene a manifestarse esa dinámica.

Es, pues, por el intermedio de esa partícula que tres de los cuatro portadores mencionados adquieren la masa que resultan tener experimentalmente, dando lugar a la interacción débil observable, con todas sus propiedades de corto alcance e intensidad minúscula, ambas cosas relacionadas con la enorme masa que adquieren tres de los portadores, los W^+ , W^- y Z^0 , mientras que el cuarto, el fotón, permanece sin masa y da lugar al electromagnetismo ordinario. Conviene, de todas formas, advertir, que el mecanismo de Higgs no ha sido todavía establecido definitivamente y que mientras no exista apoyatura experimental no deja de ser una hipótesis.

Técnicamente la Teoría Electrodébil está caracterizada por dos constantes que miden la intensidad de la interacción en cuestión, aunque dado que su valor es parecido, podemos considerar que se trata de una sola. Lo que ocurre es que, tras la ruptura, la intensidad de la interacción Electromagnética resulta ser del mismo orden, mientras que la intensidad de la interacción mediada por las partículas W^+ , W^- y Z^0 resulta ser esa misma dividida por el cuadrado de la masa de dichas partículas. Dado que las masas en cuestión son enormes, el resultado neto es que la intensidad de la interacción débil es mucho menor que la del Electromagnetismo. El parámetro que mide dicha intensidad desde el punto de vista experimental se conoce como constante de Fermi G_F resultando:

$$G_F = \alpha_{EM} / M_w^2 = 1,03 \times 10^{-5} M_p^{-2}$$

El paso del alcance infinito, implícito en la Teoría Electrodébil antes de la ruptura, al alcance microscópico de la interacción débil, se deriva igualmente del hecho de que sus tres portadores han adquirido una masa considerable.

Se ha conseguido así una genuina unificación entre dos interacciones que, desde el punto de vista experimental, no pueden ser más diferentes. Y se ha conseguido de un modo muy diferente al intentado por Einstein. Para empezar, ha tenido lugar entre una interacción de alcance microscópico y otra de alcance macroscópico, únicamente en la versión cuántica y no clásica de las teorías en cuestión, y de un modo dinámico, no geométrico, en el sentido de que la bifurcación tiene lugar a través de un tipo de interacción que, por debajo de una cierta temperatura, o energía, da lugar a soluciones que rompen la simetría presente de origen.

Esa temperatura crítica es gigantesca, especialmente si la comparamos con la temperatura actual del Universo, unos 3° en la escala absoluta, es decir unos 270° centígrados bajo cero, o incluso si la comparamos con la temperatura en el núcleo de las estrellas, de unos cientos de millones de grados, como mucho. Pero está al alcance de lo que se puede conseguir en los más modernos aceleradores de partículas. En efecto, en el momento de la colisión a energías inimaginablemente grandes, de, por ejemplo, un electrón contra un antielectrón se llega, en una microscópica región del espacio-tiempo, a esas temperaturas. Y por eso es posible intentar verificar la corrección de una tal teoría, no sólo observando las muchas consecuencias indirectas que tiene a energías más bajas, y que se han ido estudiando a lo largo de un par de décadas, sino también directamente, produciendo físicamente los portadores en cuestión y comparando sus propiedades con las predichas por la teoría.

El esquema en el que se ha conseguido esa primera unificación a nivel de teoría cuántica de campos es dinámico y hasta intuitivo. Responde a esa idea de entender una serie de fenómenos como la manifestación en un caso concreto, para unas condiciones particulares, de una dinámica común, de una interacción que es, desde el punto de vista elemental, única. Utilizando, una metáfora de Alan Guth, el creador del esquema de Universo inflacionario, la situación sería comparable a la que se presentaría en un mundo con estructura de sólido, es decir, con direcciones bien definidas, debido a que se encuentra a bajas temperaturas, mientras que su estructura sería isotropa, como en un fluido, si estuviera a altas temperaturas.

Si unos científicos midieran, por ejemplo, la velocidad de la luz en ese Universo encontraría que tiene valores diferentes según la dirección en que se propague, que es lo que ocurre exactamente en los sólidos cristalinos. Pues bien, si no tuvieran energía suficiente para calentar, aunque sea una ínfima región de su espacio, hasta la temperatura de fusión, harían tablas con la velocidad de la luz en función de la dirección e intentarían comprenderlas como fenómenos diferentes; pensarían que la estructura básica de su espacio es anisótropa. Sin embargo, saber que, a partir de un único valor de la velocidad de la luz en la fase fluida, pueden obtenerse los diversos valores observados experimentalmente, por debajo de una cierta temperatura, la de solidificación, de acuerdo con las propiedades del medio a lo largo de las distintas direcciones de cristalización, es un grado superior de comprensión. Son las condiciones concretas en que se realiza la dinámica las que pueden producir su desdoblamiento de modo que se nos aparezca como dinámicas básicamente distintas.

La Teoría Electro débil es exactamente eso: nos permite entenderla como el resultado de una misma fuerza cuya realización depende de la temperatura. En un Universo extremadamente caliente, ese grado de unificación sería directamente observable, mientras que en un Universo frío se produce la ruptura y la bifurcación. Las soluciones físicamente realizables no presentan, en su apariencia, el grado de simetría subyacente. La teoría permite, además, predecir cuales son las propiedades de las interacciones tal y como se nos aparecen físicamente a partir del esquema unificado subyacente.

Más interesante todavía resulta combinar este punto de vista con la evidencia de que el Universo en un momento muy lejano de su historia estuvo a temperaturas más altas de lo que está hoy. Tan altas como queramos con tal de retroceder a un momento lo suficientemente cercano a esa singularidad que llamamos Big Bang. La temperatura a la que tiene lugar la ruptura electro débil tuvo realidad física en un instante situado unas cien mil millonésimas de segundo después del Big Bang. Para tiempos anteriores, el Universo primitivo exhibía directamente las propiedades de unificación ahora ocultas.

De paso conviene decir que la relación existente entre temperatura del Universo y tiempo hace de los aceleradores de partículas, en los que se consiguen esas enormes temperaturas, máquinas para explorar el Universo en épocas inimaginablemente lejanas cuando tenía propiedades en nada similares a las del Universo actual.

La Teoría Electro débil no sólo es un ejemplo paradigmático de teoría unificada; es también una fuente inagotable de predicciones precisas que han sido confirmadas una y otra vez por el experimento, con toda la precisión a la que se ha podido llegar y sin una sola excepción. Existe, en particular, una constante desconocida, del tipo de la constante de Newton, llamada el ángulo de Weinberg, que puede ser determinada en base a medidas experimentales independientes en procesos completamente diferentes. Su valor debe ser el mismo en todas esas mediciones de fenómenos empíricamente inconexos si la teoría es correcta. Para tres grupos de medidas los resultados son:

$$S_z^2 = 0,2319 (0,0007)$$

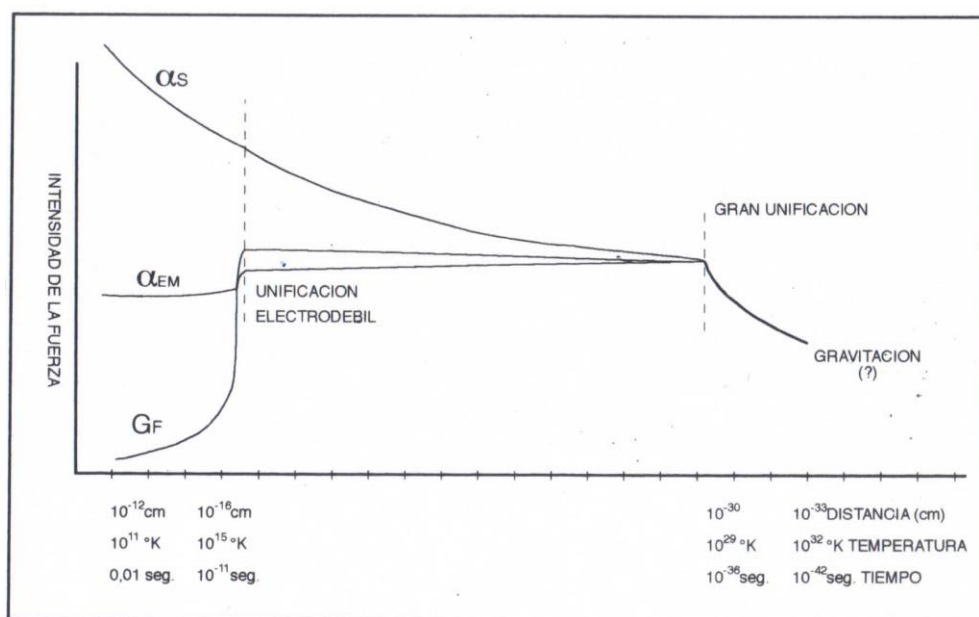
$$S_z^2 = 0,2322 (0,0008)$$

$$S_z^2 = 0,2318 (0,0007)$$

Resulta hasta fatigoso seguir verificando una y otra vez las predicciones sin que haya una clara señal que nos permita avanzar más allá y englobar esa teoría en otra más general. Y sin embargo debe haber algo más allá. Para empezar, la interacción fuerte, la Cromodinámica Cuántica, que forma parte junto con la Teoría Electrodébil de lo que se llama Teoría Standard, no ha sido aún incorporada con éxito a un mismo esquema de unificación, aun cuando la empresa no parece muy lejana. Su estructura es también la de una teoría cuántica de campos y parece verosímil que las temperaturas todavía más altas, éstas ya difícilmente describibles con palabras, la intensidad de ambas interacciones pueda haber sido similar, de modo que sea posible entenderlas, de nuevo, como el resultado de una bifurcación, a temperaturas mucho más elevadas, y, por tanto, mucho antes en el tiempo, de una teoría más unificada todavía.

Esa hipotética teoría recibe el nombre de Teoría Gran Unificada y el punto en el que tiene lugar la ruptura de la simetría superior que subyace a la interacción en cuestión se llama la energía, o la temperatura, de la Gran Unificación en sentido estricto. De nuevo no se trata de una especie de capricho estético, aunque, de nuevo, la elegancia de una aproximación de este tipo es evidente. La Gran Unificación surge de modo natural cuando se consideran, entre otras, las siguientes cuestiones:

La intensidad de la interacción fuerte y de la electrodébil parecen converger a temperaturas muy elevadas, encontrándose en algún punto en el que ambas serían indistinguibles (Fig. 1).



Sería deseable entender por qué la carga del protón es exactamente igual a la del electrón cambiada de signo, y, más en general, que las cargas de todas las partículas sean múltiplos enteros de la carga del electrón sin que haya razón aparente (este hecho es conocido de antiguo, pero, justamente, intentar comprender las cosas que parecen más obvias y más familiares lleva con frecuencia a formular las preguntas más difíciles y profundas). Teniendo en cuenta la estructura de todas las partículas hechas de quarks, la pregunta se refiere al hecho de que los quarks tengan cargas eléctricas que sean exactamente iguales a $1/3$ y $-2/3$ la del electrón.

Es posible comprender de un modo relativamente natural, dentro de un esquema de Gran Unificación, por qué el Universo está hecho, según parece, únicamente de materia y no de materia y antimateria en cantidades equivalentes. No resulta aceptable, en base al principio de *naturalidad* que se trate de una condición inicial ad hoc por la que en el Universo primitivo había un ligero exceso de materia sobre antimateria, de modo que a lo largo de su historia se haya ido produciendo una aniquilación progresiva de materia y antimateria hasta quedar como remanente ese pequeño exceso.

Esas razones, entre otras, sugieren que las interacciones fuerte y electrodébil son, de nuevo, la manifestación asimétrica a bajas temperaturas, de una única interacción. Respecto de esta última, quarks y leptones no serían mundos separados, sino que estarían conectados como aspectos diferentes de una misma partícula, de modo que la relación entre cargas es una consecuencia inmediata de esa unidad. También en ese marco serían posibles procesos que contribuyeran a crear dinámicamente, a partir de un Universo en el que las cantidades de materia y de antimateria fueran, de principio, exactamente iguales, ese pequeño exceso que compone toda la materia presente hoy en el mismo.

No hay todavía un esquema definido y comprobado, como en el caso de la Teoría Electrodébil, que sea aceptable, tanto desde el punto de vista experimental como de su consistencia interna; pero no hay duda de que en algún momento se llegará a una formulación conveniente. En una de las más sencillas formulaciones tentativas de la teoría, por ejemplo, el hecho de poder considerar al sector de quarks y al de leptones como componentes de un único sistema, aspectos diferentes de una misma partícula, implica una relación entre las cargas del quark d y del electrón que es exactamente la observada y, por tanto, explica por qué la carga del protón es igual a la del electrón cambiada de signo:

$$Q_u = Q_d + 1 \text{ (ya en la Teoría Electrodébil)}$$
$$Q_d = (1/3) \times Q_e \text{ (en la Teoría Unificada)}$$

En este contexto, el Universo habría pasado, en épocas todavía más remotas, por una fase de Gran Unificación para, tras enfriarse por debajo de una cierta temperatura gigantesca, precipitar una ruptura previa a la de la interacción electrodébil. Habría así varios momentos de sucesivas inestabilidades en el Universo en los que se iría reduciendo el grado de unificación primigenia. En concreto el momento en que tuvo lugar la ruptura de la Gran Unificación debió ser del orden de 10^{-36} segundos después del Big Bang. Ese momento podría haber sido crucial por otras razones también relacionadas con esa ruptura, como la fase inflacionaria y la aparición de un exceso de materia sobre antimateria, del orden de una partícula suplementaria por, aproximadamente, cada diez mil millones de partículas (y antipartículas) presentes. Ese suplemento es el que queda hoy en forma de toda la materia existente en el Universo; el resto se aniquiló con sus correspondientes antipartículas.

Se trata este de un campo de investigación abierto a nuevas ideas y desarrollos tentativos, en plena ebullición, pero sin llegar a una formulación admitida generalmente, libre de problemas de consistencia interna o que haya sido verificado experimentalmente. Algunas de las dificultades presentes en cualquier formulación de una Teoría Gran Unificada, han estado en el origen de un desarrollo que parece prometedor, pero no ha sido todavía firmemente establecido. Se trata de una nueva simetría más potente y generalizadora, llamada Supersimetría, que conectaría los sectores, hasta ahora inconexos, de partículas en sentido estricto y de portadores de las interacciones, ya que permitiría englobar en un mismo sistema partículas con spin diferente.

Ese nuevo desarrollo, en el que podría reformularse cualquier teoría unificada reduce el número de parámetros libres presentes al proporcionar nuevas relaciones entre ellos, da un sentido más natural al fenómeno de la ruptura espontánea de la simetría electrodébil, y puede permitir comprender la razón de que existan escalas de energía, en las que ocurren fenómenos de ruptura espontánea, tan sumamente distantes; es decir, que existan temperaturas críticas diferentes y muy separadas entre sí. Predice, en particular, que para cada partícula conocida existe un compañero llamado supersimétrico, con propiedades similares respecto a la interacción unificada, excepto que tiene un spin diferente y una masa mayor que la de las partículas conocidas hasta ahora. Ninguno de esos compañeros supersimétricos ha sido encontrado hasta el momento, por lo que se trata de algo tentativo por ahora.

En todo caso, al relacionar la ruptura de la unificación con la Supersimetría, existe una indicación de cuál es el orden de magnitud en el que cabe pensar para las masas de estas nuevas partículas, encontrándose al alcance de lo que pueden conseguir la próxima generación de aceleradores; hay en

concreto predicciones, bien es verdad que no demasiado precisas, de cual pueda ser la masa de la partícula de Higgs en este contexto. Desde luego, si esa nueva generación de aceleradores no descubre el Higgs y algún indicio inequívoco de la existencia de partículas supersimétricas, la idea puede resultar atractiva desde el punto de vista teórico, pero perdería crédito en cuanto a su efectiva realización en la naturaleza.

Lo que ya no está, en modo alguno, claro es si se logrará incorporar a un esquema de unificación como el descrito hasta el momento a la única fuerza que ha quedado fuera, la Gravitación. Es paradójico que la interacción aparentemente más inocua y mejor conocida de antiguo sea la que presenta dificultades de lejos superiores a las del resto de las teorías mencionadas. El camino recorrido hasta el momento sugiere que es preciso lograr, como paso previo, una versión cuántica de la Relatividad General que no se ha logrado todavía. Hay razones profundas para esa dificultad que tienen que ver con el distinto papel que juega el espacio-tiempo en la Relatividad General y en las teorías cuánticas de campos mencionadas.

Justamente, el esquema supersimétrico mencionado en el párrafo precedente parece ser más adecuado para conseguir esa formulación cuántica de la Gravitación, que no parece fácil de obtener a corto plazo. En todo caso existe una temperatura todavía mayor que la asociada a la Gran Unificación en la que la intensidad de la Gravitación es comparable a la de las otras interacciones y a la que los efectos cuánticos resultan relevantes, por lo que a partir de ese punto la versión clásica de la Gravitación resulta insuficiente. Teniendo en cuenta la relación entre temperatura y tiempo de vida del Universo, eso implica que desde el instante en que se dieron esas temperaturas hacia atrás cualquier especulación basada en las teorías actualmente disponibles resulta inconsistente.

La temperatura (o el tiempo) a la que la Gravitación se unificaría con el resto de las interacciones es mayor (más remoto) que la correspondiente a la Gran Unificación, pero no demasiado distante, teniendo en cuenta las incertidumbres de todo el esquema (Fig. 1). Esa cercanía relativa ha llevado a muchos científicos a suponer que sólo será posible un esquema satisfactorio de Gran Unificación si se incorpora, al tiempo, la Gravitación. Supersimetría, Gran Unificación y Gravitación Cuántica parecen, de este modo, íntimamente relacionados en el sentido de que no es posible construir un marco coherente sin incorporar todos los ingredientes a la vez. La incorporación de la Gravitación, por otra parte, tendría sin duda importantes consecuencias desde el punto de vista cosmológico, dada la imposibilidad teórica de retroceder más allá del instante en el que los efectos cuánticos invalidan una descripción clásica de la Gravitación; y podría reportar nuevas ideas acerca de la verdadera naturaleza del espacio-tiempo.

En conclusión, se ha hecho un largo camino hacia un entendimiento unificado de fuerzas y partículas con un esquema, la Teoría Standard, que parece refrendado por el experimento y consistente desde el punto de vista teórico. Dicho esquema no sólo nos revela las identidades profundas entre las distintas fuerzas conocidas, sino también el mecanismo por el que se nos aparecen como distintas. Igualmente nos revela la identidad entre diferentes partículas elementales y nos ayuda a ir comprendiéndolas como aspectos diferentes de una o unas pocas entidades realmente distintas. La diferenciación en las interacciones está así ligada a la manifestación de sus distintos aspectos como partículas concretas diferentes. Por último, ese esquema tiene una aplicación cosmológica, en principio inesperada, ya que relaciona las condiciones en que tienen lugar unificación y ruptura de la unificación con condiciones que existieron en momentos muy lejanos de la historia del Universo, pero determinantes de las propiedades del que hoy podemos observar y en el que vivimos.

Pero queda todavía un largo camino por recorrer. Ese esquema está muy lejos de ser completo. Incluso en sus desarrollos más aceptados falta evidencia empírica suficiente, como en el caso de la partícula de Higgs. Es todavía un esquema parcial, relativamente poco unificado y con demasiados cabos sueltos. No hay, pues, miedo a que se haya llegado al fin de la Física como a veces sensacionalistamente se dice. Queda mucho por descubrir, y para los que no vayamos a ser los autores

de esos descubrimientos, queda mucho por disfrutar y apasionarse por los avances que la comunidad científica vaya realizando.