

Teorías unificadas de las interacciones fundamentales

Los recientes descubrimientos experimentales en física de partículas elementales sugieren y confirman teorías unificadas de sus interacciones y de la estructura última de la materia

Francisco José Ynduráin

Los últimos cuatro o cinco años han sido testigos de un fantástico florecimiento de trabajos, tanto experimentales como (sobre todo) teóricos, sobre los esquemas unificados de las interacciones fundamentales. Literalmente, miles de artículos han aparecido en revistas científicas sobre consideraciones teóricas y verificaciones experimentales de modelos en los que dos o más de las fuerzas básicas que actúan sobre los últimos constituyentes de la materia (las partículas elementales) se tratan no como entes distintos, sino como manifestaciones de un principio más fundamental que los subyace.

Como todo desarrollo científico, también éste tiene un origen doble: la aparición de esquemas teóricos coherentes, de los que se pueden extraer consecuencias verificables experimentalmente, y, sobre todo, la constatación de que los experimentos realizados confirman las predicciones teóricas. En nuestro caso, los hallazgos que están en la base de todo el movimiento son la detección, por un grupo de científicos del CERN, de la existencia de corrientes neutras a principios de 1973, y el descubrimiento por los grupos dirigidos por Richter y Ting de las partículas J o ψ , y, posteriormente, de toda una serie de las llamadas "partículas encantadas". Estos descubrimientos experimentales, predichos por teorías unificadas, son los que hacen posible que la búsqueda de dichos esquemas sea una tarea científica, y no mera especulación filosófica, por primera vez desde hace muchos años; y aunque no haya, hoy por hoy, un esquema teórico único, todos los modelos aceptados tienen en común la característica de la unificación.

Estas características de fluidez y eferescencia son las que me han llevado a escoger el enfoque que utilizo en este artículo: en vez de presentar una

discusión detallada de las teorías y resultados experimentales actuales, he preferido ofrecer una visión más histórica, encuadrando las ideas actuales como un episodio más de la busca permanente de unas estructuras elementales que "unifique" la aparente diversidad del mundo fenomenológico.

Perspectiva histórica

Como reconoce B. Russell en su libro *History of Western Philosophy* (Historia de la filosofía occidental), "Casi todas las hipótesis que han dominado la filosofía (que en el contexto incluye a la filosofía natural, i.e., la ciencia) moderna fueron imaginados por los griegos; su inventiva e imaginación en temas científicos apenas pueden exagerarse". Aunque sin caer en el error de pretender encontrar en la filosofía antigua más de lo que realmente contiene, no cabe duda de que vale la pena comenzar cualquier exposición histórica de un tema científico por las opiniones al respecto de los filósofos presocráticos; aunque sólo sea por darse cuenta de la cantidad de tiempo que la humanidad pensante lleva intentando dar respuesta a unos pocos problemas básicos, entre los que se cuenta el que nos ocupa.


Toda teoría unificada —toda unificación— tiene dos vertientes complementarias. En primer lugar, hay que reducir substancias que aparecen con propiedades diversas a agregados o diferentes estados de una materia primordial; y, en segundo lugar, es necesario explicar cómo las distintas fuerzas que actúan en la naturaleza son tan sólo distintas manifestaciones de una única fuerza (interacción, con la terminología moderna) básica. La manera de pensar, más geométrica que dinámica, de los griegos hace que sus disquisiciones se refieran,

sobre todo, a la primera vertiente. Así, el primer filósofo griego del que tenemos noticia (Thales de Mileto, *circa* 585 a. de C.) aparte de sus importantes contribuciones a la geometría, ya propuso la hipótesis de que, en última instancia, "todo está hecho de agua". Aunque obviamente falsa, esta hipótesis no es tan descabellada como pueda parecer a simple vista. En efecto, el agua es el único elemento al que, con la primitiva tecnología de la época, podría hacerse adoptar los tres estados de sólido, líquido y gas. Una tal teoría, por otra parte, no era difícil que se le ocurriera a un habitante de la Magna Grecia, conjunto de islas, penínsulas y puertos desparramados por el Mediterráneo; lo que ilustra bien la interdependencia de las condiciones sociales y geográficas y las hipótesis científicas.

El punto de vista de Thales puede contrastarse con el de Anaximandro (540 a. de C.), que mantuvo que la substancia primera no es ninguno de los elementos conocidos, sino que es una substancia que se encuentra oculta en todos ellos (compárese esta aserción con la moderna teoría de quarks). Esta interesante vía fue, sin embargo, abandonada por los filósofos posteriores que, con la excepción de los atomistas, consideraron que la substancia primera era una de las conocidas; y así, a través de Anaximenes, Jenófanes y Heráclito, que propusieron el aire, la tierra y el fuego, respectivamente, llegamos a Empédocles que sintetizó todas estas hipótesis, postulando el cuarteto clásico: aire, agua, tierra y fuego. Este cuarteto fue aceptado por Aristóteles y, debido en parte a su autoridad, perduró por largos siglos (en particular a través de los alquimistas) hasta la aparición de la química en la edad moderna. A pesar del éxito de esta hipótesis, no es ésta lo más interesante de

DE LA PHYSICA GENERAL
DIALOGO PRIMERO
PROEMIAL
DE LA HISTORIA
DE LA
PHILOSOPHIA.

Aristotelico. Cartesiano. Gasendista. Sceptico.

Aristot.  A parece, que V. mds. se han olvidado de su antiguo Amigo.

Sceptic. Mas parece, que vos os aveis olvidado de los vuestros, pues tanto tiempo nos aveis hecho carecer de vuestra amable compañía.

Aristot. La precisión de seguir las Escuelas, me sacó de mi Patria; y lo que fue más sensible, me divorció de vuestras dulces, y eruditas conversaciones.

Scept. Y en qué aveis empleado el tiempo?

Aristot. En las materias Philosophicas, que acabo de estudiar por vno de los Authores Aristotelicos; si bien no sé qué rumores he oido, de que en el siglo pasado se movió sedición en el Imperio de las Letras, atropellando el respeto, y turbando el pacífico dominio, que sobre ellas, por muchos años, avia obtenido Aristoteles.

Scept. Es verdad; pues reparando algunos más generosos ingenios, que la Physica de vuestro Aristoteles no tra-

A mas,

INDICE

DE LOS DIALOGOS.

DIALOG. I. De la Historia Philosophica.	pag. 1.		
DIALOG. II. De la Materia Prima.	pag. 17.		
DIALOG. III. De la Forma.	pag. 32.		
DIALOG. IV. De la esencia, y existencia del Cuerpo natural.	pag. 53.		
DIALOG. V. De las causas, ò principios, llamados Elementos.	pag. 67.		
Del Fuego.	pag. 72.	De la Tierra.	pag. 101.
Del Ayre.	pag. 88.	De los Elementos Chímicos.	pag. 102.
De la Agua.	pag. 95.		
DIALOG. VI. De las generales afecciones de el Cuerpo natural.	pag. 111.		
De la figura, y sitio.	pag. 120.	Del movimiento, y la quietud.	pag. 140.
Del Tiempo.	pag. 125.	De la gravedad, y levedad.	pag. 159.
Del lugar, y el vacío.	pag. 128.		
DIALOG. VII. De las qualidades particulares.	pag. 170.		
De la qualidad en común.	p. 171.	De la Humedad.	pag. 210.
De la Luz, y el Color.	pag. 178.	De la Sequedad.	pag. 214.
Del Sonido.	pag. 192.	De la raridad, densidad, &c.	pag. 216.
Del Olor.	pag. 197.	De las qualidades ocultas.	pag. 221.
Del Sabor.	pag. 198.	De la virtud magnetica.	p. 224.
Del Calor.	pag. 201.		
Del Frio.	pag. 207.	DIALOG. VIII. Del Mundo, y del Cielo.	pag. 227.
DIALOG. IX. De los Cuerpos Celestes, y Meteoros.	p. 245.		
De las Estrellas fixas.	p. 245.	Del Viento.	pag. 258.
Del Sol.	pag. 249.	De las nubes, y lluvia.	p. 259.
De la Luna.	pag. 250.	Del rocío, y nieve.	pag. 260.
De los demás Planetas.	p. 253.	Del granizo, trueno, rayo, &c.	pag. 261.
De los Cometas.	pag. 255.		
DIALOG. X. Si los Brutos tienen Alma sensitiva?	p. 265.		
DIALOG. XI. Apologia Sceptica, contra la Apologia Scolastica.	pag. 296.		

E I N.

HASTA EL SIGLO XIX no se dispuso de modelos científicos que explicaran los agregados constitutivos de la materia y las distintas fuerzas que actúan en la naturaleza. Desde Empédocles, quien redujo la substancia primera, *arjé*, a los cuatro elementos (agua, aire, tierra y fuego),

la física de Empédocles, sino el reconocer que no basta con identificar unas substancias primordiales, sino que hay que atender a lo que hemos llamado la segunda vertiente de la unificación: es decir, hay que explicar por qué estas substancias se combinan como lo hacen. Empédocles introdujo el rudimento del moderno concepto de fuerza o interacción, que él, de forma antropomórfica, identificó con "amor" y "odio": conceptos que básicamente están en el origen de la idea moderna de fuerzas "atractivas" y "repulsivas". El esquema de Empédocles es, por lo menos en la filosofía occidental, el primer esquema unificado coherente en el que cuatro elementos, y dos interacciones básicas, pretenden explicar la variedad del universo.

En realidad, todos estos modelos, por ingeniosos que resulten, son acientíficos: ni se basan en la experiencia ni se indi-

can modos experimentales de verificar sus predicciones; para llegar a modelos científicos hay que esperar hasta el siglo XIX. A principios de este siglo se había conseguido formular la hipótesis atómica de forma científica, con Dalton (1808), aunque la confirmación experimental definitiva no fue obtenida sino mucho más tarde (J.J. Thomson 1897). Se conocían ya las leyes de enlace químico, quedando reducida la materia a los 92 elementos químicos fundamentales y las interacciones entre ellos a cuatro fuerzas básicas: eléctrica, magnética, gravitatoria y "de cohesión". (La fuerza nuclear fue descubierta mucho más tarde, esencialmente por Rutherford a principios del actual siglo). Estas cuatro fuerzas fueron objeto de unas unificaciones parciales durante el siglo XIX: unificaciones que contienen aspectos que perviven hasta en los modelos actuales.

La primera unificación es la de las

se vinieron repitiendo los mismos principios y ejemplos, como se aprecia en la primera página e índice de la obra de Martín Martínez, publicada en 1730: *Filosofía sceptica, extracto de la física antigua y moderna, recopilada en diálogos entre un aristotélico, cartesiano, gasendista y sceptico.*

fuerzas eléctricas y magnéticas debida a Maxwell; éste demostró que ambas son dos manifestaciones de un potencial básico: los fenómenos electromagnéticos se reducen a una propiedad intrínseca de la materia (carga eléctrica), y a las fuerzas creadas por estas cargas, en reposo (campos eléctricos) o en movimiento (campos eléctricos y magnéticos). Posteriormente, Millikan encontró que todas las cargas eléctricas son múltiplos enteros (positivos o negativos) de una carga fundamental que puede identificarse con la del electrón, y se denota por $-e$, o con la del positrón, y se denota por e . La fuerza que una carga elemental ejerce sobre otra (en reposo) y en el vacío viene dada por la conocida ley de Coulomb: $e^2/4\pi r^2$, donde r es la distancia entre las cargas. (Hemos utilizado el sistema de unidades usual en física subnuclear, en el que la velocidad de la luz, c , y la constante de Planck, \hbar , se toman como uni-

dad). Como se ve, la interacción entre dos cargas elementales está caracterizada por la constante de interacción (o constante de acoplamiento, nombre más usual): $\alpha = e^2/4\pi \approx 1/137.036$, donde α es la constante en cuestión.

Esta intensidad es pequeña, pero resulta todavía muy grande si la comparamos con la gravitatoria; la atracción gravitatoria entre, por ejemplo, dos protones es: $G_N m_p^2/4\pi r^2$, siendo $G_N m_p^2 \approx 10^{-39}$, es decir, unas 10^{38} veces menor. G_N es la constante gravitatoria de Newton y m_p la masa del protón.

La segunda unificación condujo a explicar las "fuerzas de cohesión" como residuo de las fuerzas electromagnéticas (fuerzas de Van der Waals). Para mostrar el mecanismo veamos un ejemplo sencillo (fuerza dipolar) sobre el que está calcado en buena parte el moderno modelo de quarks. Consideremos una molécula de hidrógeno. Esta molécula consta de dos átomos de dicho elemento, H' y H'' (véase la ilustración de la página 9), cada uno de los cuales está a su vez formado por un protón (símbolo p) y un electrón (símbolo e). Como las cargas de éstos son opuestas, se atraen y, al ligarse, forman los átomos de hidrógeno. Sin embargo, cada átomo es eléctricamente neutro: ¿cómo interactúan para formar una molécula? La respuesta se ve claramente en la ilustración citada. El protón del segundo átomo, por ejemplo, está solicitado por dos fuerzas (aparte de la de su electrón acompañante que no influye en el argumento y por tanto no consideramos): la repulsión del protón del otro átomo, de magnitud $e^2/4\pi(R+r)^2$, y la de atracción del

electrón del otro átomo, que vale $-e^2/4\pi R^2$ donde r es la distancia intraatómica entre protón y electrón y R es la distancia interatómica entre el electrón del átomo de H' y el protón del átomo de H'' . Como vemos, no se cancelan exactamente, sino que queda una resultante, atractiva, que viene dada por la siguiente razón: $-e^2(r^2 + 2rR)/4\pi R^2(R+r)^2$.

Esta fuerza residual (fuerza dipolar, caso particular de las del tipo Van der Waals) explica la atracción entre los dos átomos H' y H'' , atracción que los liga en la molécula de hidrógeno, H_2 .

Es instructivo razonar a la inversa. A gran distancia (R) las interacciones entre átomos son muy complicadas, según acabamos de ver; ello indica que sus objetos compuestos. En efecto, si los miramos a distancias más pequeñas encontramos sus constituyentes (electrones y protones) que interactúan de acuerdo con la sencilla ley de Coulomb: ($e^2/4\pi r^2$).

Como es lógico, todos estos esquemas fueron propuestos antes de descubrirse la relatividad y la mecánica cuántica; su adaptación a éstas no cambió, sin embargo, nada esencial. De hecho, lo que hizo estrecho el esquema en que dos interacciones (electromagnética y gravitatoria) explicasen toda la física fue el descubrimiento, al filo de la transición al siglo XX, de las nuevas interacciones (llamadas, con falta de imaginación, "débiles" y "fuertes" por ser, respectivamente, más débiles y fuertes que la interacción electromagnética), y no la adaptación a los requisitos generales relativistas o cuánticos. La adaptación del electromagnetismo, por ejem-

plo, es tan excelente que la teoría cuántica relativista (Quantum Electro-Dynamics, QED en inglés) es una de las teorías más perfectas que se conocen; estando de acuerdo las predicciones teóricas y las medidas experimentales hasta los límites conocidos (unas nueve cifras decimales exactas). Similarmente, la teoría cuántica no hizo sino perfeccionar el conocimiento de las fuerzas químicas (Heitler y London).

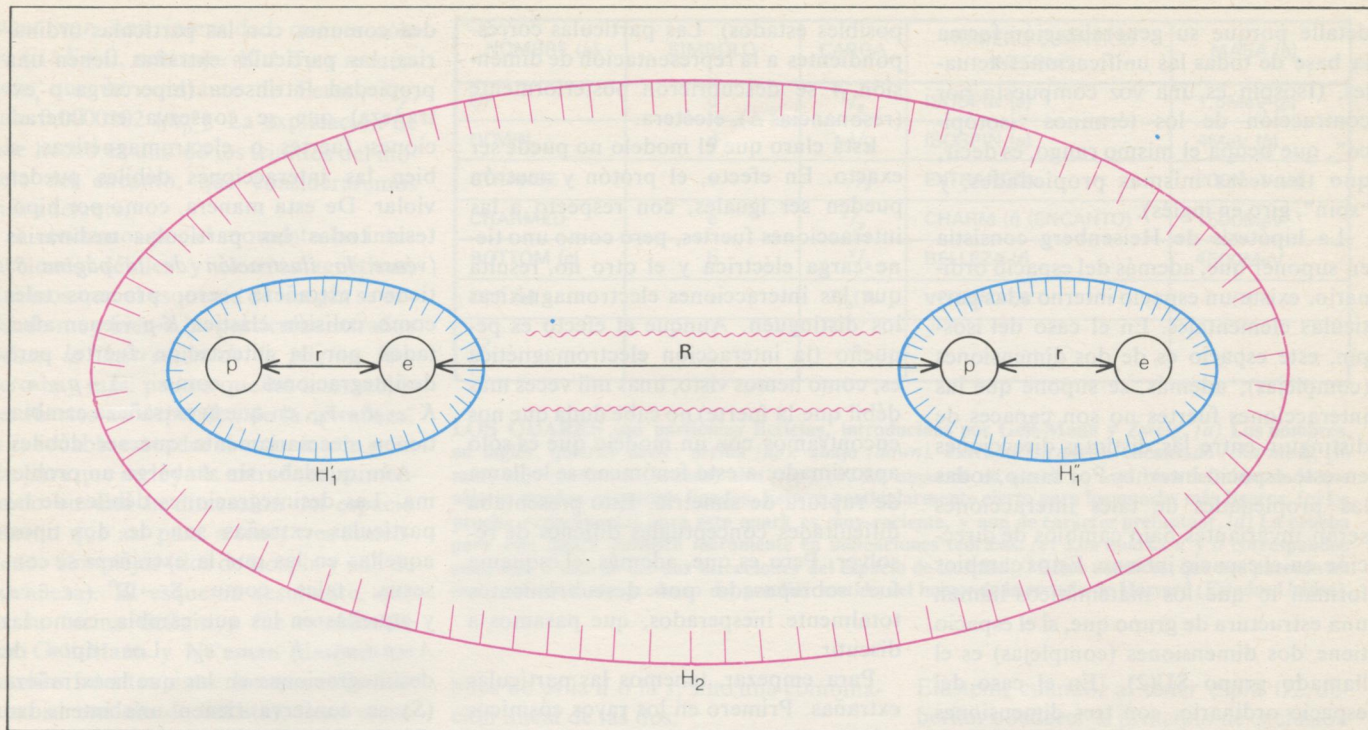
En 1896 Becquerel descubrió las desintegraciones radiactivas (desintegraciones β), fenómeno que desafió largo tiempo a una interpretación teórica. El primer modelo propuesto que tuvo éxito al comparar sus predicciones con la experiencia fue el iniciado por Fermi, y que, con modificaciones de detalle, ha pervivido hasta los años sesenta. En este modelo, se supone que la desintegración β se debe a que uno de los neutrones (símbolo n) del núcleo atómico se desintegra según el esquema siguiente: $n \rightarrow p + e + \nu$; ν es el símbolo del neutrino, partícula postulada por motivos teóricos por Pauli y encontrada experimentalmente más tarde (Reines y Cowan). La intensidad de la fuerza (interacción débil) responsable del proceso viene dada por la constante de Fermi, G_F , que, tomando como unidad la masa del protón, tiene un valor de $G_F = 0.0000102 (m_p^{-2})$: es decir, unas mil veces más débil que las fuerzas electromagnéticas. Uno podría sentirse tentado de explicar esta fuerza como un residuo a la Van der Waals de las electromagnéticas: esto es imposible debido a que su alcance es pequeñísimo, compatible con cero dentro de los límites experimentales actuales y, desde luego, mucho menor que el tamaño del núcleo.

La interacción fuerte tiene su origen experimental en el descubrimiento de Rutherford de que los átomos contienen a todos los electrones en la periferia, y que todos los protones se encuentran en un núcleo de tamaño mucho más reducido que el del átomo. La carga de este núcleo es netamente positiva; para explicar por qué no se desintegra bajo el efecto de la repulsión eléctrica entre los protones que contiene, hace falta postular una nueva interacción (llamada por su gran intensidad *interacción fuerte*) que sólo afecta a los constituyentes del núcleo (pero no a los electrones), caracterizada por la constante de Yukawa, g_Y , de valor $g_Y^2/4\pi \approx 14$. Compárese con la constante de acoplamiento electromagnético (α) o con la constante de Fermi (G_F), y se apreciará su enorme superioridad en punto a intensidad.

Para acabar este capítulo, que nos lleva a los albores de lo que podríamos

	NOMBRE	SIMBOLO	CARGA (a)	MASA (b)	INTERACCIONES (c)	DESINTEGRACION (d)
LEPTONES	FOTON	γ	0	0	e.m.	ESTABLE
	ELECTRON	e	-1	0,51	e.m.w.	ESTABLE
	MUON	μ	-1	106	e.m.w.	$e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
	NEUTRINOS { ELECTRONICO MUONICO	ν_e ν_μ	0	0(e)	w	ESTABLES (f)
HADRONES	PROTON	p	+1	938,3	s,e.m.,w	ESTABLE (f)
	NEUTRON	n	0	939,6	s,w	$p + e + \bar{\nu}_e$
	PIONES { NEGATIVO NEUTRO POSITIVO	π^-	-1	139,6	s,e.m.,w	$\mu + \bar{\nu}_\mu$
		π^0	0	135,0	s,w	$\gamma + \gamma$
		π^+	+1	139,6	s,e.m.,w	$\mu + \bar{\nu}_\mu$
ETA	η	0	548,8	s,w	$\gamma\gamma, 3\pi$	

PARTICULAS "NORMALES". A cada partícula (de cualquier tipo) le corresponde una antipartícula, que denotamos poniendo una barra sobre el símbolo correspondiente. Partícula y antipartícula coinciden a veces: $\nu = \bar{\nu}$; $\pi^0 = \bar{\pi}^0$. Respecto a las letras: (a) Unidad de carga: la del protón. (b) Unidad de masa: 1MeV. (c) e.m.: electromagnéticas; w: débiles; s: fuertes. Sólo se explicitan las interacciones directas, no las inducidas. (d) Sólo se cita la forma de desintegración más común. (e) En algunas teorías, los neutrones tienen una pequeña masa. Experimentalmente, $m_{ne} < 0,00006$ MeV, $m_{\mu} < 0,65$ MeV. (f) En algunas teorías, los neutrones y/o el protón son inestables aunque con enormes vidas medias. Experimentalmente, la vida media del protón es como mínimo de 10^{20} años. Por ahora no se conoce límite experimental útil a la vida de los ν (neutrinos).



MODELO de la molécula de hidrógeno, H^2 (en rojo). Los “residuos” de las fuerzas electromagnéticas elementales entre los elementos (p y e) que

componen los átomos H_1' y H_1'' (en azul) ligan a éstos. La interacción entre H' y H'' es un residuo de las interacciones más básicas, de sus constituyentes.

llamar la problemática actual, es conveniente hacer una digresión sobre la naturaleza de las distintas fuerzas discutidas y una compilación de los constituyentes elementales ya encontrados. Con respecto a lo primero, la noción de fuerza se asocia con la de carga y campo (que es una generalización de la noción de campo electromagnético). La relatividad, sin embargo, al no admitir la acción a distancia, hace que el campo tenga una existencia propia; la mecánica cuántica, que implica un dualismo entre onda (y campo) y partícula, dice que cada campo tiene asociada una partícula. Asimismo, la relatividad y la mecánica cuántica ligan el alcance de una fuerza (campo) con la masa de la partícula asociada. Supongamos que una partícula A crea un campo, asociado con la partícula P (véase la ilustración de la página 12). Para que el campo actúe hace falta que se cree la partícula P . La energía mínima necesaria para esto es, según el principio de equivalencia de Einstein, la propia masa m_p de la partícula P . Esta creación “espontánea” es posible porque la energía no está bien definida, sino que su fluctuación, ΔE , está ligada con la distancia d sobre la que está extendida por la famosa relación de incertidumbre de Heisenberg, $\Delta E \cdot d \approx \hbar c$.

Por tanto, como la fluctuación mínima para crear la partícula P es m_p , el campo que ésta transporta sólo será efectivo a la distancia d (alcance de la interacción), dado por la expresión $d = 1/m_p$ (utilizan-

do el sistema de unidades con $\hbar = c = 1$). El campo electromagnético tiene alcance infinito; luego su partícula asociada (el fotón, designado con el símbolo γ) ha de poseer masa cero. Efectivamente, las mediciones experimentales más precisas dicen que m_γ es menor que 10^{-19} veces la masa del electrón. El alcance de las interacciones débiles es extremadamente pequeño. De hecho, no ha podido ser medido; sólo se conoce un límite para la masa de las partículas asociadas (partículas W): m_W mayor que unas treinta veces la masa del protón. Finalmente, las interacciones fuertes tienen como partículas asociadas los llamados mesones (en particular el pión, símbolo π) de masa unas doscientas ochenta veces la del electrón, lo que da un alcance de unos 10^{-13} centímetros. Compárese con el tamaño de un átomo, unos 10^{-8} centímetros, cien mil veces mayor que el núcleo.

Partículas extrañas, simetrías superiores y quarks

La fauna de las partículas conocidas antes de la segunda guerra mundial está resumida en la ilustración de la página 8; nótese que a los ya discutidos hemos añadido el muon (símbolo μ) de propiedades exactamente análogas a las del electrón, pero de masa 200 veces mayor y la partícula η (de propiedades análogas a las del pión; ver más adelante); y hemos distinguido dos neutrinos, ν_e y ν_μ : el pri-

mero acompaña siempre al electrón, el segundo al muon. Una primera agrupación distingue entre leptones, que son los más ligeros y sólo tienen interacciones electromagnéticas y débiles y hadrones (los más pesados) que, además, presentan interacciones fuertes. Aparte queda el fotón.

Con las partículas e interacciones resumidas en la ilustración de la página 8 se explican, al menos en principio, todos los fenómenos del mundo que nos rodea. En este sentido, tres interacciones (más la gravitatoria, que a propósito dejamos para el final del artículo) y unos diez constituyentes elementales no parece demasiada complicación (compárese por ejemplo con los cuatro elementos y las dos fuerzas de Empédocles) y, aunque incompleta, la unificación de la descripción de la materia es verdaderamente impresionante. Sin embargo, un vistazo a la tabla de la ilustración recién citada nos indica que deberá ser posible simplificar más. Por ejemplo, el neutrón y el protón tienen propiedades extremadamente análogas (excepto la carga eléctrica); y lo mismo pasa con los leptones. Los intentos de unificar estas partículas son bastante antiguos (años 30, 40 y 50); en el caso de los leptones chocan siempre con dificultades que sólo se han superado recientemente, y lo discutiremos más adelante; en el caso de los nucleones (protón y neutrón) y piones esto llevó (Condon y Shortley, Heisenberg) al llamado esquema de *isospin* que describiré en algún

detalle porque su generalización forma la base de todas las unificaciones actuales. (Isospin es una voz compuesta por contracción de los términos "isotópico", que ocupa el mismo rango, es decir, que tiene las mismas propiedades, y "spin", giro en inglés).

La hipótesis de Heisenberg consistía en suponer que, además del espacio ordinario, existe un espacio interno a las partículas elementales. En el caso del isospin, este espacio es de dos dimensiones (complejas); además, se supone que las interacciones fuertes no son capaces de distinguir entre las distintas direcciones en este espacio interno. Por tanto, todas las propiedades de tales interacciones serán invariantes bajo cambios de dirección en el espacio interno. Estos cambios forman lo que los matemáticos llaman una estructura de grupo que, si el espacio tiene dos dimensiones (complejas) es el llamado grupo SU(2). [En el caso del espacio ordinario, con tres dimensiones reales, el grupo correspondiente es el de rotaciones ordinarias, SO(3) en nomenclatura matemática.] La manifestación física de este espacio se hace por lo que se denomina representaciones del grupo, concepto que no es fácil de explicar en términos no matemáticos. El resultado es que cada grupo da lugar a una serie de representaciones; a cada representación le corresponde una partícula elemental, que puede manifestarse en tantos estados distintos como dimensiones tenga la representación. En el caso del grupo SU(2), tenemos representaciones con dimensión 1, 2, 3, 4... Una partícula correspondiente a la representación de dimensión 1 es la llamada mesón eta (símbolo η), que no se conocía aún al ser propuesto el modelo; la de dimensión 2 al nucleón, en sus dos posibles estados (protón y neutrón), la de dimensión 3 al pión (en sus tres

posibles estados). Las partículas correspondientes a la representación de dimensión 4 se descubrieron posteriormente (resonancias Δ), etcétera.

Está claro que el modelo no puede ser exacto. En efecto, el protón y neutrón pueden ser iguales, con respecto a las interacciones fuertes, pero como uno tiene carga eléctrica y el otro no, resulta que las interacciones electromagnéticas los distinguen. Aunque el efecto es pequeño (la interacción electromagnética es, como hemos visto, unas mil veces más débil que la fuerte) no cabe duda que no encontramos con un modelo que es sólo aproximado: a este fenómeno se le llama de ruptura de simetría. Esto presentaba dificultades conceptuales difíciles de resolver. Pero es que, además, el esquema fue sobrepasado por descubrimientos totalmente inesperados, que pasamos a discutir.

Para empezar, tenemos las partículas extrañas. Primero en los rayos cósmicos y luego en cuanto se construyeron aceleradores con energía suficiente en el laboratorio, se observó la existencia de partículas (llamadas, con una evidente falta de imaginación, "partículas extrañas") con propiedades muy peculiares. Cuando estas partículas interactúan entre sí o con las ordinarias, lo hacen con una fuerza similar a la de Yukawa, pero cuando se desintegran en partículas "ordinarias" en procesos tales como $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$, $K^- \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu$, la fuerza de la interacción correspondiente varía entre G_F y unas veinticinco veces menor que G_F . (Algunas de las propiedades de las partículas extrañas pueden verse en la ilustración de esta página) ¿Cuál es la solución a este rompecabezas? Influidos quizá por la teoría del isospin, Pais, Nambu, Nijishima y Gell-Mann postularon que, además de otras propieda-

des comunes con las partículas ordinarias, las partículas extrañas tienen una propiedad intrínseca (hipercarga o extrañeza) que se conserva en interacciones fuertes o electromagnéticas, si bien las interacciones débiles pueden violar. De esta manera, como por hipótesis todas las partículas ordinarias (véase la ilustración de la página 8) tienen extrañeza cero, procesos tales como colisión elástica $K-p$ vienen afectados por la interacción fuerte, pero desintegraciones como $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$, $K^- \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu$, en que la extrañeza cambia, tienen necesariamente que ser débiles.

Aún quedaba sin embargo un problema. Las desintegraciones débiles de las partículas extrañas son de dos tipos: aquellas en las que la extrañeza se conserva, tales como $\Sigma^- \rightarrow \Sigma^0 + e + \bar{\nu}_e$, y aquellas en las que cambia, como las $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$, $K^- \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu$. Los tipos de desintegraciones en las que la extrañeza (S) se conserva tienen una intensidad $G(\Delta S = 0) \approx G_F$, mientras que las que cambian la extrañeza viene caracterizada por $G(\Delta S \neq 0) = (0.2) \times G_F$. La unificación de ambos tipos de procesos fue dada por Cabibbo, quien supuso la existencia de una única fuerza débil elemental, G_F , y, que esta fuerza se reparte entre procesos con cambio de extrañeza, y procesos sin cambios de extrañeza: de esta forma, $G(\Delta S = 0) = G_F \cos \theta$, $G(\Delta S \neq 0) = G_F \sin \theta$; donde θ (experimentalmente, $\theta = 0,2$ radianes) es el "ángulo de reparto" que indica qué proporción de fuerza débil corresponde a cada tipo de proceso. (La manera más clara de ver esto es dentro del modelo quark.) Esta hipótesis ha sido verificada con gran precisión con los cientos de desintegraciones conocidos actualmente, en el sentido de que todas las desintegraciones observadas experimentalmente se explican con el esquema; pero presenta un problema, irrelevante en apariencia, que resulta ser clave.

El problema es el llamado de las corrientes neutras con cambios de extrañeza. Todos los procesos de desintegración de partículas extrañas observados experimentalmente se caracterizan por presentar, además de un cambio eventual de extrañeza, una transferencia de carga eléctrica, del hadrón inicial a los leptones finales. Por ejemplo, en la desintegración $\Sigma^- \rightarrow \Sigma^0 + e^- + \bar{\nu}$ ya considerada, la carga del Σ^- se transfiere al electrón (e). Sin embargo, los procesos en que tal transferencia no tiene lugar, tales como $K^0 \rightarrow \bar{e} + e$, $K^0 \rightarrow \bar{\mu} + \mu$, que uno esperaría se diera con intensidad $G(\Delta S \neq 0) = G_F \sin \theta \approx (0.2) \times G_F$, tienen

NOMBRE	SÍMBOLO	CARGA	MASA	INTERACIONES	EXTRAÑEZA	DESINTEGRACION	
KAONES	NEUTRO	K^0	0	497,7	s,w	1	$\pi\pi, 3\pi$
	CARGADO	K^+	+1	493,7	s,e,m,w		$\mu + \bar{\nu}_\mu$
LAMBDA	Λ	0	1.115,6	s,w	-1	$p + \pi^-$	
SIGMA	NEGATIVA	Σ^-	-1	1.197,4	s,e,m,w	-1	$n + \pi^-$
	NEUTRA	Σ^0	0	1.192,5	s,w		$\Lambda + \gamma$
	POSITIVA	Σ^+	+1	1.189,4	s,e,m,w		$p + \pi^0$
CASCADAS	NEUTRA	Ξ^0	0	1.314,9	s,w	-2	$\Lambda + \pi^0$
	NEGATIVA	Ξ^-	-1	1.321,3	s,e,m,w		$\Lambda + \pi^-$
OMEGA	Ω^-	-1	1.672,3	s,e,m,w	-3	$\Xi + \pi$	

PARTÍCULAS EXTRAÑAS. Nótese las afinidades y las diferencias con las partículas de la tabla precedente. Cuando estas partículas interactúan entre sí o con las ordinarias, lo hacen con una fuerza similar a la de Yukawa, pero cuando se desintegran en partículas "ordinarias" en procesos tales como $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$, $K^- \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu$, la fuerza de interacción correspondiente varía entre G_F y unas veinticinco veces menor que G_F . Sólo se indican los modos de desintegración más usuales.

lugar con una intensidad que es sólo de $G(\Delta S \neq 0, \text{neutro}) \approx 10^{-4} G_F$ y recuérdese, que la constante de Fermi, G_F , vale $0,0000102 (m_p^{-2})$. La explicación de este hecho es uno de los triunfos del modelo del encanto, que consideraremos más adelante.

Si olvidamos por el momento las interacciones débiles y electromagnéticas, tenemos que el esquema de isospín se extiende muy bien a las partículas extrañas (véase la ilustración de la página 10). Pero hay más: puesto que las interacciones fuertes no dependen de la extrañeza, es razonable extender el esquema de isospín para que incluya la extrañeza, aumentando en una la dimensión del espacio interno que así pasa a tener tres dimensiones complejas (dos de isospín y una de extrañeza). El esquema resultante, que en su forma definitiva fue establecido por Gell-Mann y Ne'eman (después de muchos intentos entre los que cabe destacar el modelo de Sakata), tiene como grupo asociado el famoso SU(3). Un hecho salta a la vista en el esquema: a pesar de que las interacciones son independientes del lugar que la partícula ocupa en las representaciones, las masas varían enormemente de una partícula a otra. Por otra parte, y en contra de lo que ocurría con el isospín, cuya representación fundamental (a partir de la cual pueden construirse todas las demás) de dimensión 2 es realizada en la naturaleza (los nucleones), a la representación fundamental de SU(3), de dimensión 3, no corresponden ninguna de las partículas conocidas. Debido a esto, Gell-Mann y Zweig introdujeron unas partículas ficticias (más que como entes reales, como artificio matemático): son los quarks (véase la ilustración de esta misma página), denotados con los símbolos u , d y s (sobre los demás quarks de la tabla hablaré más adelante). La idea es que las partículas conocidas son en realidad agregados de estos entes ficticios, y que sus propiedades pueden entenderse simplemente como expresado su contenido en quarks; por ejemplo, el isospín es simplemente el contenido en quarks u y d , y la extrañeza el contenido en quarks s . Nótese que el modelo de quarks no se aplica a los leptones que, por tanto, siguen considerándose partículas elementales mientras que los hadrones se visualizan como compuestos. La interacción fuerte se explica así como un residuo, a la Van der Waals, de una hipotética fuerza elemental entre quarks (véanse y confróntense las ilustraciones de las páginas 13 y 9).

El esquema de Cabibbo también se simplifica: basta suponer que la partícula que intervienen en las interacciones dé-

NOMBRE (a)	SIMBOLO	CARGA	NUMERO CUANTICO INTERNO	MASA (b)
UP	u	$2/3$	ISOSPIN (e)	1,5MeV (b)
DOWN	d	$-1/3$	ISOSPIN (e)	4MeV (b)
STRANGE	s	$-1/3$	EXTRAÑEZA	200MeV (b)
CHARMED	c	$2/3$	CHARM (f) (ENCANTO)	1500MeV
BOTTOM (c)	b	$-1/3$	BELLEZA (f)	4500MeV
TOP (d)	t	$2/3(?)$	VERDAD (f)	(?)
?	

LOS QUARKS son partículas ficticias, introducidas por Gell-Mann y Zweig. (a) Los nombres, en inglés, quieren decir: arriba (*up*), abajo (*down*), extraño (*strange*), encantado (*charmed*), (lo más) bajo (*bottom*), (lo más) alto (*top*). (b) La masa de un quark no está bien definida, dado que sólo se pueden encontrar ligados. Esto es particularmente cierto para los quarks más ligeros. (c) La prueba experimental para este quark es muy reciente, y aun de carácter preliminar. (d) La prueba para este quark consiste meramente en indicaciones teóricas. (e) Los quarks u y d corresponden cada uno a una de las dos direcciones del espacio de isospin. (f) Estos nombres, que nos parecen tanto ridículos, son producto del peculiar sentido del humor de la escuela de Harvard (Estados Unidos).

biles no es la d o la s , sino una combinación lineal de las dos:

$$d_\theta = d \cos \theta + s \sin \theta,$$

con lo que la esperada relación $G(\Delta S \neq 0) = G_F \sin \theta \approx (0,2) \times G_F$ es automática. Las interacciones débiles se supone, pues, que acoplan las partículas en pares que (incluyendo a los leptones) son

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ d_\theta \end{pmatrix}$$

Como se ve, en todos los acoplamientos hay transferencia de carga eléctrica unidad (del ν_e al e , del u al d_θ , del ν_μ al μ), con lo que, aunque de forma algo forzada, se explica la debilísima intensidad de los procesos $K^0 \rightarrow \bar{e} + e$ y $K^0 \rightarrow \bar{\mu} + \mu$. Desgraciadamente, el esquema deja fuera a la combinación, ortogonal a d_θ , $s_\theta = -d \sin \theta + s \cos \theta$, lo que no es muy comprensible.

Con cuatro problemas graves se enfrenta, sin embargo, el modelo de quarks "clásico". Estos son: primero, que a pesar de una intensa búsqueda, no hay ninguna prueba convincente de la existencia de quarks aislados. (Hay dos o tres experimentos que han pretendido encontrar quarks; ninguno de ellos ha sido confirmado y lo único que se sabe es que, de existir, los quarks deberían pesar más de cuatro veces lo que el protón, lo que contradice otras indicaciones sobre sus masas.) Segundo, el hecho de que contando cada quark como $+1$, y cada anti-quark como -1 , todas las partículas conocidas tienen un número de quarks múltiplo de tres; y además, los quarks se comportan dentro de un protón, por ejemplo, como partículas de tipo Bose-

Einstein, cuando, al tener espín $1/2$, deberían obedecer el principio de exclusión de Pauli. [El principio de exclusión de Pauli establece que en un mismo sistema no puede haber dos fermiones (partículas cuyo espín es múltiplo impar de $1/2$) que sean idénticos en el mismo estado cuántico; a los fermiones se oponen los bosones, que son partículas cuyo espín es entero.] En tercer lugar, las interacciones fuertes entre los quarks (que producen como residuos a la Van der Waals las fuerzas de Yukawa) son independientes del tipo de quark que se considere, u , d o s . Esto, que a primera vista parece muy positivo ya que explica por qué las interacciones entre los hadrones son universales, presenta el problema de que las partículas correspondientes al campo de la interacción elemental entre quarks no puede ser ninguna de las conocidas, ya que todas éstas (debido a sus diferentes masas) violan la necesaria universalidad. Finalmente, aunque las fuerzas que ligan a los quarks tienen que ser muy grandes (de lo contrario sería fácil romper los hadrones y "liberar" a los quarks), cuando se mira un hadrón a cortas distancias (distancias inferiores a unos 10^{-14} centímetros, para lo que se utilizan fotones virtuales) el resultado experimental (funciones de estructura) puede interpretarse muy bien a condición de suponer que los quarks estén prácticamente libres.

Una solución a estas cuestiones fue propuesta por Greenberg en 1924 y, en su forma contemporánea por W. Bardeen, Fritsch y Gell-Mann. Consistía en suponer que cada quark tiene tres posibles estados que se distinguen por un nuevo número cuántico al que se llamó color. Los colores utilizados dependen de la nacio-

nalidad del autor. Gell-Mann toma siempre los colores de la bandera americana (rojo, blanco y azul); por motivos análogos, muchos físicos españoles utilizan el rojo, amarillo y violeta. Así, por ejemplo, un quark u puede venir en cualquiera de los tres colores, rojo, amarillo o violeta, lo que se denota por u^r, u^a, u^v ; y lo mismo el d o el s . Se supone que los quarks interactúan entre sí por medio de un campo que es el que los liga (al que se ha llamado *gluónico*, del inglés *glue*=cola de pegar), y que *sólo afecta al color*; la universalidad de las interacciones quark-quark queda pues asegurada. Si se supone que hay ocho de estos gluones, y que las interacciones quark-quark son invariantes bajo cambios de color (lo que nos da un nuevo grupo $SU(3)$, de "color"), puede demostrarse que todos los estados ligados deben tener un número de quarks múltiplo de tres, lo que resuelve la segunda dificultad antes mencionada. La primera y cuarta dificultades no fueron superadas hasta más tarde, cuando Politzer y Gross y Wilczek demostraron que la teoría de color con ocho gluones tiene la propiedad de "libertad asintótica" y, probablemente, "confinamiento". La manera más sencilla de ver esto es escribir el potencial elemental entre dos quarks: éste (compárese con la ley de Coulomb) es del tipo $k^2/4\pi$ y multipli-

cando el resultado por r ; en donde r es la distancia entre los quarks.

A cortas distancias r es pequeño ("libertad asintótica") y, por tanto, los quarks aparecen como libres; cuando intentamos separar los quarks, la fuerza crece (r aumenta), lo que explica la dificultad, si no imposibilidad, de aislar quarks ("confinamiento").

Hasta hoy, la inmensa mayoría de las predicciones experimentales del modelo de color (quarks y gluones) están de acuerdo con la experiencia. Salvo un importante problema que mencionaremos en el próximo capítulo, la situación, pues, es relativamente satisfactoria: tenemos una teoría unificada de las interacciones fuertes (QCD: "quantum chromodynamics", nombre por el que se conoce en inglés a la teoría de quarks y gluones con color); una teoría excelente de las interacciones electromagnéticas; y un esquema que, al menos fenomenológicamente, describe las interacciones débiles.

Unificación de interacciones débiles y electromagnéticas. Corrientes neutras. Encanto.

El problema más grave del esquema que acabamos de describir es que el modelo de las interacciones débiles es in-

consistente. El Lagrangiano de interacción tipo Fermi (incorporando la teoría Cabibbo y el modelo de quarks) es

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{\lambda} J_{\lambda} J_{\lambda}^{\dagger}$$

$$J_{\lambda} = \bar{d}_{\theta} \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) u + \bar{e} \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) \nu_e + \bar{\mu} \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) \nu_{\mu}$$

donde d, u, ν, e, \dots son los operadores que representan a las partículas correspondientes, y las γ son las matrices de Dirac. Si se intenta calcular con el Lagrangiano de interacción recién formulado más allá del primer orden de teoría de aproximaciones, encontramos resultados infinitos. Esto también ocurre con QED y QCD; mas, para estas últimas, puede demostrarse que la teoría se puede reexpresar de forma que las predicciones para cantidades observables sean siempre finitas. Una teoría con esta propiedad se llama *renormalizable*; otra como la anterior de Fermi, donde siempre se encuentra infinitos, se llama *no-renormalizable*; desde un punto de vista fundamental, es dudoso que una teoría no-renormalizable tenga sentido físico.

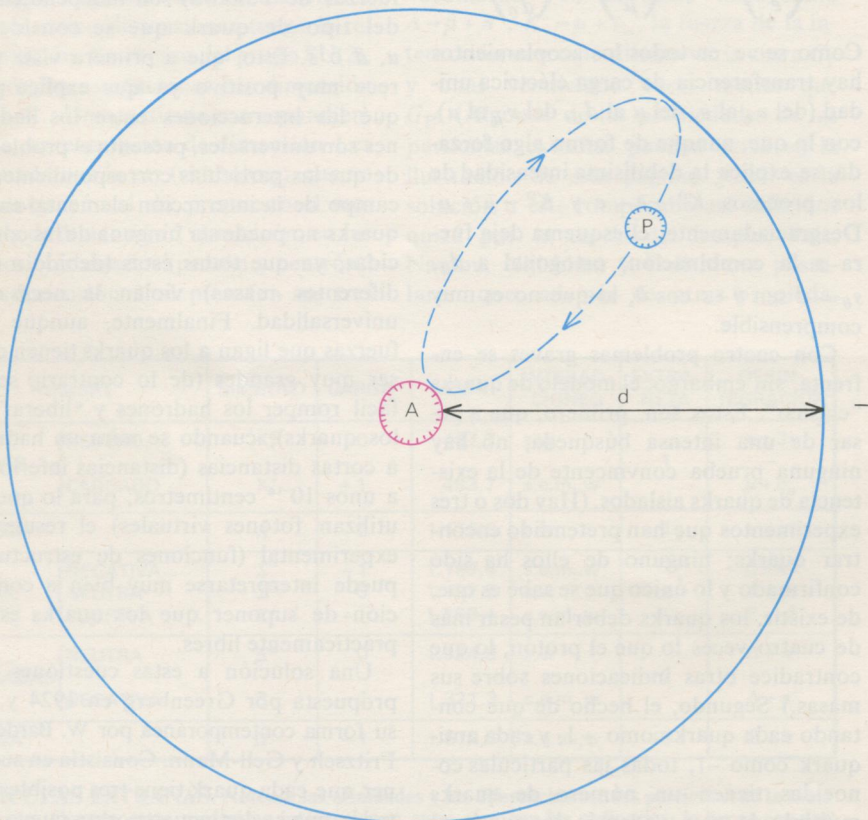
Un primer paso para reemplazar el Lagrangiano de interacción tipo Fermi con las incorporaciones citadas por una teoría renormalizable fue dado ya en 1954 por Lee y Yang, quienes postularon la existencia de partículas (las llamadas bosones vectoriales intermedios) W^+, W^- , de gran masa (más de 20 veces la del protón), sustituyendo el tipo Fermi por

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = g_{\text{LY}} \sum (J_{\lambda} W_{\lambda}^{\dagger} + J_{\lambda}^{\dagger} W_{\lambda})$$

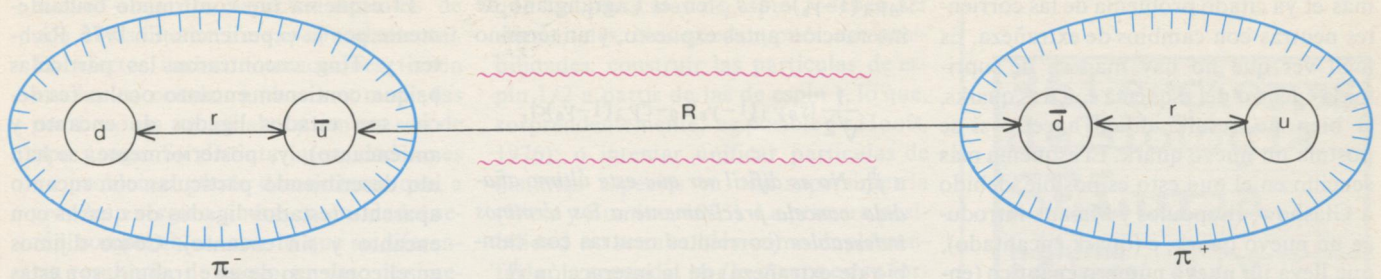
Las predicciones son prácticamente las mismas que las del modelo de Fermi con tal que escojamos

$$\frac{g_{\text{LY}}^2}{4\pi} = \frac{G_F m_W^2}{4\pi \sqrt{2}} \approx 10^{-3}$$

Esto es muy interesante, porque el valor de $g_{\text{LY}}^2/4\pi$ es del orden de α con lo que aparece una posible relación entre las interacciones débiles y las electromagnéticas. Sin embargo, aunque las divergencias del Lagrangiano de interacción de tipo Lee y Yang son menos violentas que las de tipo Fermi, también aquél sigue siendo no-renormalizable. Para hacerlo normalizable, puede probarse que es necesario que exista un grupo de invariancia interna; las relaciones que esta invariancia fuerza son las que llevan a cancelaciones que hacen desaparecer los infinitos y convierten a la teoría en renormalizable. Esto implica



EL CAMPO (productos de fuerza de interacción), (en azul), se debe a la emisión y absorción virtuales de la partícula P asociada, por dualidad cuántica, a dicho campo. El alcance de la fuerza es d .



FUERZAS entre dos piones como residuo de las interacciones elementales de las partículas (quarks u , d) que los componen. La semejanza

con las fuerzas que actúan entre los átomos de la molécula de hidrógeno antes expuesta (véase la ilustración de la página 9) resulta evidente.

la existencia de un nuevo bosón vectorial neutro, W^0 y añadir al Lagrangiano de interacción de tipo Lee y Yang las interacciones siguientes (corrientes neutras):

$$g_{LY} \sum_{\lambda} (j_{\lambda}^{\dagger} W_{\lambda}^0 + j_{\lambda}^h W_{\lambda}^0), \text{ donde:}$$

$$j_{\lambda}^{\dagger} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \bar{\nu}_e \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) \nu_e - \bar{e} \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) e + \bar{\nu}_{\mu} \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) \nu_{\mu} - \bar{\mu} \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) \mu \}, \text{ y}$$

$$j_{\lambda}^h = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \bar{d} \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) d - \bar{u} \gamma_{\lambda} (1 - \gamma_5) u \}$$

El trozo que contiene a la expresión que define a j_{λ}^h no había sido observado, pero ciertamente esto podría deberse a dificultades experimentales: el trozo que contiene a la expresión que define j_{λ}^h induce, sin embargo, corrientes neutras con cambio de extrañeza y desintegraciones, como las $K^0 \rightarrow \bar{e} + e$, $K^0 \rightarrow \bar{\mu} + \mu$, con intensidad similar a las de un proceso débil típico; y ello está en violento desacuerdo con la experiencia. Sin embargo, este problema sólo aparece para los hadrones; por tanto, se puede pensar en construir un modelo válido sólo para los leptones; es decir, introducir sólo las interacciones de la expresión que define a j_{λ}^{\dagger} , pero no las de la expresión que define a j_{λ}^h , aunque esto sea inconsistente.

Avanzando en esta línea, el parecido entre $g_{LY}^2/4\pi$ y $e^2/4\pi = \alpha$ hace natural, como se ha dicho, el intentar unificar las interacciones débiles y electromagnéticas. En las primeras unificaciones (Schwinger, Glashow [1961]) se introducía un nuevo campo neutro, B , de forma que éste y W^0 se mezclan para dar dos partículas físicas: la llamada Z , muy masiva, y el fotón, γ , de masa cero:

$$\begin{aligned} Z &= W^0 \cos \theta_w + B \sin \theta_w \\ \gamma &= W^0 \sin \theta_w + B \cos \theta_w \end{aligned}$$

Al ángulo θ_w se le llama *ángulo de mezcla débil*.

El modelo tal cual tiene el indudable atractivo de unificar las interacciones

electromagnéticas y débiles; pero debido a la diferencia de masas entre el Z , los W^+ y W^- y el fotón, la simetría interna, conocida por "isospín débil", se rompe, y el modelo deja de ser renormalizable: por lo que estas teorías cayeron en el olvido hasta ser resucitadas por Weinberg (1967) y Salam (1968) al descubrirse cómo aplicar al problema el mecanismo de ruptura espontánea de simetría, que paso a discutir brevemente.

Tomemos un ejemplo clásico. Piénsese en un vaso y una bolita (véase la ilustración de la página 14). El vaso tiene, claramente, simetría de revolución alrededor del eje Z . Sin embargo, hay dos posiciones de equilibrio de la bolita: la posición I, que sí es simétrica, y la II, que no lo es. La simetría inicial de revolución ha desaparecido; únicamente se manifiesta en el hecho de que en adelante no habrá una única posición de equilibrio, sino una serie de ellas (las II', II''... en la ilustración) entre todas las cuales recomponen la simetría inicial.

Estos mecanismos de ruptura espontánea de la simetría son conocidos desde hace mucho tiempo; aplicados a la física de partículas reciben el nombre de *mecanismo de Higgs*, quien fue uno de los físicos que lo introdujeron. Un aspecto de interés incluso filosófico de este mecanismo en el caso de la mecánica cuántica relativista es que, aquí, el estado de equilibrio estable es el de menor energía, y corresponde al vacío. Por tanto, el hecho de que las soluciones con ruptura espontánea de simetría no sean únicas implica que el vacío tampoco es único; precisamente, la simetría entre los distintos vacíos posibles se rompe al considerar a uno de ellos como el vacío físico.

De todas maneras, tampoco el modelo de Weinberg-Salam se tomó muy en serio, hasta que en 1971 't Hooft demostró que una teoría con simetría interna de tipo *gauge*, rota espontáneamente, es de hecho, renormalizable. Antes de seguir, sin embargo, es importante dedicar unas palabras al calificativo *gauge*, que acabamos de utilizar. Se dice que una

simetría es de tipo *gauge local*, o simplemente *gauge*, si se tiene invariancia incluso cuando las rotaciones que se hacen en el espacio interno varían según el punto del espacio ordinario en que se realizan. Para que se dé esta invariancia, puede demostrarse que es necesario que todas las interacciones que corresponden a la misma invariancia tengan la misma intensidad. El poder unificador de este hecho es enorme: quiere decir que el que una interacción tenga una intensidad constante, independiente de las partículas específicas que se consideran, no es ninguna hipótesis ad hoc, sino una consecuencia de la teoría (invariancia *gauge*). Debido a esta capacidad unificadora, y al hecho de garantizar renormalizabilidad, pocos físicos dudan que la teoría fundamental sea de tipo *gauge*.

Cerrada esta disquisición, digamos que a pesar de los atractivos extra de que el descubrimiento de 't Hooft dotó al modelo unificado de interacciones débiles y electromagnéticas descrito, queda por resolver el problema de los nuevos términos j_{λ}^{\dagger} y j_{λ}^h que hemos tenido que introducir. Fijándonos en los términos que sólo involucran leptones j_{λ}^{\dagger} , estas interacciones implican la existencia de corrientes neutras, en particular, de procesos como las colisiones: $\nu_{\mu} + e \rightarrow \nu_{\mu} + e$, con intensidad análoga a la de los procesos con corrientes cargadas, es decir, con intercambio de carga eléctrica, del tipo $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu + p$.

Después de una búsqueda intensa, estos procesos con corrientes neutras fueron encontrados primero en el CERN y después en otros laboratorios. La intensidad era la predicha teóricamente. El ángulo de mezcla interacción débil-interacción electromagnética (θ_w), introducido antes, fue medido experimentalmente. Su valor es tal que $\sin^2 \theta_w = 3,5 \pm 0,6$.

Este éxito predictivo de la teoría unificada de interacciones débiles y electromagnéticas no hizo sino resaltar aún

más el ya citado problema de las corrientes neutras con cambios de extrañeza. Es fácil ver que no hay manera de suprimirlas dentro del esquema con tres quarks, si bien no resulta difícil hacerlo si se postula un nuevo quark. El esquema más sencillo en el que esto es posible, debido a Glashow, Iliopoulos y Maiani, introduce un nuevo quark, c (quark encantado), que lleva un nuevo número cuántico (encanto, "charm" en inglés). Las interacciones fuertes de este quark son, como es lógico, las mismas que las de los demás; al igual que la extrañeza, se supone que el encanto sólo puede crearse o destruirse por medio de las interacciones débiles en las que intervienen con el quark que, hasta ahora, habíamos dejado de lado, el s_θ ; por consiguiente, las interacciones débiles que acoplan las partículas en pares serán

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ d_\theta \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s_\theta \end{pmatrix}.$$

El carácter gauge de la simetría implica que hay que añadir un nuevo término a las interacciones débiles. Un término

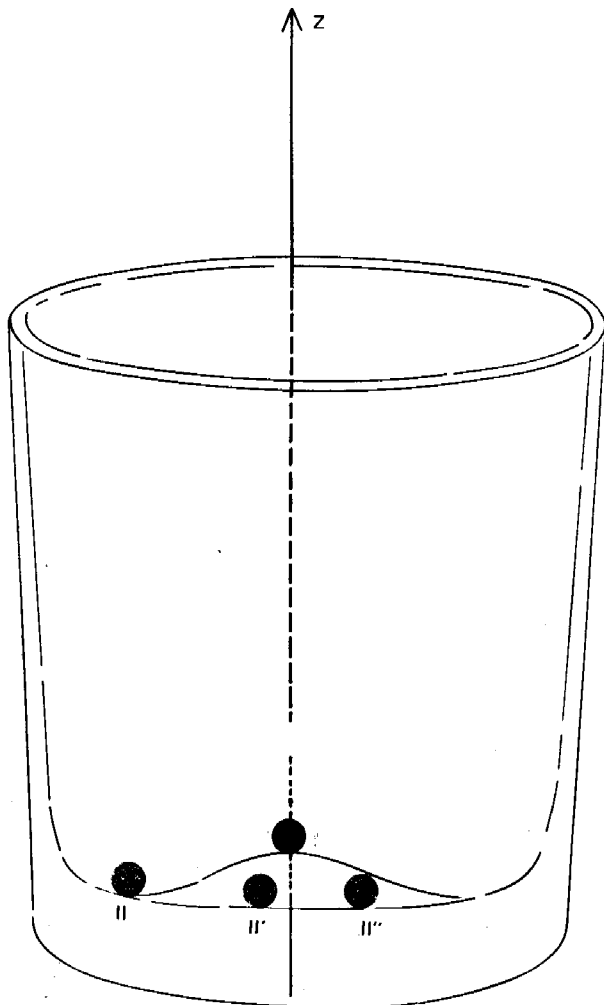
$\bar{s}_\theta \gamma_\lambda (1-\gamma_5) c$ a J_λ en el Lagrangiano de interacción antes expuesto, y un término

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{s}_\theta \gamma_\lambda (1-\gamma_5) s_\theta - \bar{c} \gamma_\lambda (1-\gamma_5) c),$$

a j_λ^h . No es difícil ver que este último añadido cancela precisamente a los términos indeseables (corrientes neutras con cambio de extrañeza) de la interacción j_λ^h .

Gráficamente podemos imaginar que un proceso como $K^0 \rightarrow \mu + \bar{\mu}$ está solicitado por dos fuerzas; una, proveniente de j_λ^h , de intensidad $d \gamma_\lambda (1-\gamma_5) s \cos \theta \sin \theta$, y otra, debido a la interacción definida en el punto y aparte anterior, de valor $-d \gamma_\lambda (1-\gamma_5) s \cos \theta \sin \theta$, que la anula.

De hecho la cancelación no es exacta. Puede demostrarse (Glashow, Iliopoulos y Maiani; B. Lee y M. Gaillard) que quedan efectos residuales de orden $(m_s^2 G_F)^2$. Dada la probabilidad experimental del proceso $K \rightarrow \mu + \bar{\mu}$, resulta la predicción de unos 1500 MeV para la masa del quark encantado, lo que a su vez implica una masa entre 2000 y 4000 MeV para las partículas físicas que contengan quarks encantados.



POSICIONES DE EQUILIBRIO de una bolita en el fondo de un vaso. Posición simétrica I (en rojo) inestable. Posiciones asimétricas II, II' II'' (en azul) estables. Entre todas éstas recomponen la simetría de rotación alrededor del eje Z. La simetría se rompe al particularizar una de ellas.

El esquema fue confirmado brillantemente por la experiencia. En 1975, Richter y Ting encontraron las partículas ψ , que contienen encanto oculto (es decir, son estados ligados de encanto y antiencanto), y, posteriormente, se han ido describiendo partículas con encanto aparente (estados ligados de quarks con encanto y sin encanto). Como dijimos en el comienzo de este trabajo, son estas dos verificaciones experimentales (corrientes neutras y descubrimiento del encanto) las que han dado apoyo a los modelos unificados de interacciones débiles y electromagnéticas.

Gran unificación, superunificación. Gravitación. Situación actual

Recapitemos la situación tal como la acabamos de describir. Las interacciones fuertes vienen descritas por una simetría gauge asociada con el grupo $SU(3)$ que actúa sobre el color de los quarks. Las interacciones débiles y electromagnéticas se unifican en una interacción, también de tipo gauge, basado en el grupo $SU(2) \times U(1)$. Las interacciones fuertes vienen mediadas por un campo cuyas partículas asociadas (los gluones) no son observables aisladamente por estar, igual que los quarks, confinados dentro de los hadrones "físicos". Las interacciones débiles y electromagnéticas están mediadas por un campo con cuatro partículas asociadas: W^+ , W^- , Z , y el fotón, γ . Las tres primeras son muy pesadas (unos setenta a cien veces la masa del protón) y no se ha observado experimentalmente aún porque no se dispone de energía suficiente para crearlas; el fotón no tiene masa. Esta ruptura de simetría es del tipo espontáneo (mecanismo de Higgs). Lo único que no está fijado en el esquema es el número de quarks y leptones.

Cuando todo el mundo estaba contento con los cuatro leptones "clásicos" y los cuatro quarks u , d , s y c , se ha descubierto un nuevo leptón τ de masa unos 2000 MeV (¡el nombre de "leptón" empieza a no ser apropiado!) y, posiblemente, su neutrino asociado, ν_τ ; y hay fuertes indicios de la existencia de un nuevo quark, b (véase la ilustración de la página 11), lo que probablemente implica que existe al menos otro t , aún más pesado. La existencia de tales partículas no afecta al esquema que aparece, casi por primera vez desde el siglo XIX, como un modelo global, capaz de dar una descripción unificada de las interacciones básicas.

Sin embargo, parece difícil evitar el pensar que las interacciones fuertes y las electromagnético-débiles no sean, de

nuevo, sino dos aspectos distintos de una única interacción superfundamental. En efecto, ambas interacciones tienen mucho en común: ambas son mediadas por bosones vectoriales y ambas son de tipo gauge. Su distinta intensidad no es un problema: puede demostrarse que, a grandes energías, ambas intensidades serán comparables, con lo que su diferencia resultaría, de nuevo, un caso de simetría espontáneamente rota.

Tal unificación ("gran unificación", en la jerga del oficio) ha sido propuesta por Pati y Salam, y posteriormente por muchos otros físicos. De hecho, estos esquemas responden a una vieja aspiración que en cierto sentido, y como hemos visto, se remonta a la filosofía presocrática; lo que es nuevo es que se llega a implicaciones específicas, que se pueden refrendar con la experiencia. Por ejemplo, los modelos predicen el ángulo de mezcla débil (en el modelo de Georgi y Glashow, $\text{sen}^2\theta_W=3/8$), predicción que está en acuerdo con el valor experimental, valor tal que $\text{sen}^2\theta_W=3,5\pm 0,6$; y que no hay interferencia débil-electromagnética (C. Jarlskog, Ynduráin [1976]) en aniquilaciones inclusivas electrón-positrón, lo que es compatible con resultados experimentales actuales y podrá ser verificado con precisión en experimentos que se harán pronto. A pesar de estas indicaciones de que la idea de una unificación global es correcta, lo cierto es que no hay consenso sobre el modelo concreto en que plasmarlo; para distinguir entre las distintas alternativas se necesita mayor información experimental.

Hemos venido pasando revista a una serie de modelos, en los que, progresivamente, se han ido unificando más y más interacciones. En todos los casos, los esquemas están bien establecidos en el sentido de que la mayor parte de los expertos en el tema los consideran como mecanismos apropiados para describir los procesos en cuestión, y hay pruebas experimentales en su corroboración. No podemos, sin embargo, acabar este artículo sin mencionar al menos esquemas de carácter más especulativo, que, no obstante, pretenden ir más allá aún: dedicaremos pues este apartado final a discutir problemas abiertos y a los esfuerzos por resolverlos.

En primer lugar, incluso lo que llamamos "gran unificación" contiene dos tipos de partículas: quarks y leptones, de espín 1/2, y gluones, W , Z , γ , de espín 1. Antes de que se valorase la importancia de las simetrías gauge, se intentó construir modelos en los que las partículas de espín 1 eran estados ligados de las de espín 1/2 (Heisenberg). Sin embargo, el carácter gauge de las simetrías implica

que las partículas de espín 1 deben ser elementales. Nos quedan, pues, dos posibilidades: construir las partículas de espín 1/2 a partir de las de espín 1, lo que, sorprendentemente, es posible ('t Hooft, 1976); o intentar unificar partículas de distintas especies en una supersimetría (Wess y Zumino, 1973). La primera posibilidad no se sabe bien cómo implementarla; la segunda, por lo menos en su forma actual, contiene predicciones en desacuerdo con la experiencia.

Un segundo problema importante es el intentar predecir, y no simplemente introducir como parámetros fenomenológicos, las masas de las partículas, y los grupos de invariancia. La única masa que puede formarse con unidades naturales es la de Plank:

$$m_{\text{Pk}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}$$

que contiene la constante de Newton, G_N ; lo que sugiere que no se puedan calcular masas sin tener en cuenta la interacción gravitatoria (que hasta ahora hemos dejado al margen). Hay otro motivo por el que se insinúa una conclusión similar. En las grandes unificaciones, la ruptura espontánea entre interacciones fuertes y débiles-electromagnéticas se da a una energía E del orden de (Georgi, Quinn y Weinberg, 1974).

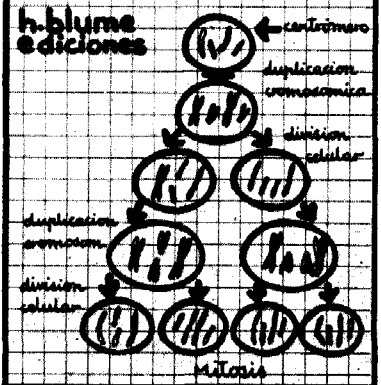
$$E \sim (1 \text{ GeV}) \log\left(\frac{gG}{e}\right)$$

donde e es la carga del electrón y gG la constante de acoplamiento gluónica (a 1 GeV). Los valores que resultan para E dependen del modelo específico pero son comparables a m_{P} .

Finalmente, tenemos el problema de qué hacer con la interacción gravitatoria. La interacción gravitatoria es, cuando se cuantifica, una teoría gauge; sin embargo, no se sabe aún si es o no renormalizable. Con respecto a esto, sin embargo, hay fuertes indicaciones de que, para ser renormalizable, es necesario que la materia se ordene según esquemas de simetría similares a los que ya hemos descrito. De hecho, el problema con estas teorías supersimétricas de la gravitación (en las que se da un significado geométrico no sólo a la propia gravitación, como en la teoría original de Einstein, sino también a los fermiones—"quarks" y "leptones") es que unifican demasiado: no hay, de momento al menos, ningún modelo de los que funcionan fenomenológicamente que cumplan todas las limitaciones requeridas. De todas maneras, los esquemas de "supergravedad" son tremendamente atractivos puesto que en ellos la unificación de distintas interacciones sería total.

36 Lecciones de Biología SE Luria

H. Blume Ediciones



36 lecciones de Biología es un libro organizado con coherencia que se centra más en las ideas que en los hechos. Estas lecciones constituyen lo esencial de un curso de Biología General impartido en el MIT por Salvador E. Luria, profesor de Biología y premio Nobel.

Aunque de amplio contenido —incluye biología celular, bioquímica, genética, embriología y fisiología—, esta obra es algo más que un curso de introducción tradicional. Está construido alrededor de un concepto unificador.

«El de los organismos vivos como poseedores de un programa —un conjunto de información genética— que subyace bajo todas las funciones vitales y que evoluciona por mutación, recombinación genética y selección natural. Este tema se desarrolla a través de la discusión de la química de las células vivas y sus actividades sintéticas que se dirigen esencialmente a la reproducción del programa.»

Luria señala que «las justificaciones para publicar este conjunto de conferencias... son, primero, que me pareció que a los estudiantes les gustaban y que sacaban provecho de ellas; y, segundo, que éste puede servir como ejemplo útil de cursos de biología, capaz de adaptarse a los buenos estudiantes a quienes gusta profundizar bajo la superficie de las materias tratadas.»

14 x 21 cm. 432 págs. 1977. Rústica.



H. BLUME
EDICIONES

Rosario 17, Madrid 5 Tel. 2659200