

PARTÍCULAS ELEMENTALES

Por Fidel A. Schaposnik* y María Cecilia von Reichenbach*

Los físicos han desarrollado el modelo standard hacia la gran unificación: la supersimetría, la teoría de supercuerdas. Pero hay cuestiones que todavía quedan sin respuesta, algunas de las cuales podrán ser aclaradas en el futuro cercano por los nuevos aceleradores y los progresos que se logren en los dominios de la astrofísica y la cosmología

INTRODUCCIÓN

Nada más simple que una **partícula elemental**: parte indivisible de materia sin estructura interna, sin tamaño o forma detectables. En otros términos, es una partícula casi puntual en el sentido en que, con la precisión de las mediciones actuales, su dimensión no es detectable. El electrón o el quark por ejemplo, con un radio inferior a 10^{-18} m, son partículas elementales.

Tal simplicidad será requerida a la teoría que describa a estas partículas y las fuerzas que se ejercen entre ellas (sus "**interacciones**"). En ese sentido, el "guión" que orienta las investigaciones desde hace 25 años, establece que la materia está formada solamente por dos clases de partículas elementales: los *leptones* (como el electrón, por ejemplo) y los *quarks*, con un radio inferior a 10^{-19} metros. En lo que concierne a las fuerzas entre partículas, existen cua-

tro interacciones elementales: **gravitacionales y electromagnéticas** (conocidas desde hace siglos), **débil y fuerte** (descubiertas en el siglo XX). En principio este conjunto de partículas e interacciones podría tener en cuenta todos los fenómenos observados en nuestro Universo, desde los núcleos atómicos a las galaxias.

De hecho, los físicos han llevado adelante la idea (ya intuída por Albert Einstein) de desarrollar una teoría unificada donde una sola interacción pueda explicar las diferentes fuerzas entre partículas. Esta unificación ha tenido un éxito importante con la construcción de la teoría **electrodébil**, que unifica el electromagnetismo – responsable, por ejemplo, de las fuerzas que ligan a los electrones dentro del átomo– y las interacciones débiles –que están en el origen de la radioactividad.

Para lograr esta unificación, así como la de las interacciones fuertes (entre las que están, por ejemplo, las fuerzas nucleares) y las interacciones gravitacionales (como las fuerzas que

ligan entre sí a los planetas), los físicos han definido en el curso de los últimos treinta años una estrategia donde las *simetrías*, no solamente en el espacio-tiempo sino en los *espacios internos* de las partículas, juegan un rol más y más importante. De esta manera, una vez determinado el conjunto de partículas fundamentales, es el carácter de la simetría elegida el que determina, por sí solo, la dinámica del sistema.

LAS CUATRO FUERZAS DE LA NATURALEZA

Cuatro interacciones fundamentales son conocidas en la actualidad: gravitacional, electromagnética, débil y fuerte.

Interacción gravitacional. Es una fuerza universal en el sentido en que es experimentada por todas las partículas conocidas. Es por mucho la más débil de las fuerzas y es siempre atractiva. Además, tiene un alcance infinito. Debido a estas dos últimas características es una fuerza detectable macroscópicamente: la suma de

* Departamento de Física, Universidad Nacional de La Plata c.c. 67 (1500) La Plata

las fuerzas gravitacionales entre cada una de las partículas que forman nuestro cuerpo y la Tierra, por ejemplo, produce una fuerza bien conocida que es nuestro peso. Al nivel de las partículas elementales, esta fuerza deviene importante si entran en juego energías enormes. En un núcleo atómico, por ejemplo, la fuerza de atracción gravitacional entre dos protones es 10^{36} veces más débil que la de repulsión electrostática. Es a partir de una energía de 10^{19} GeV (1 GeV es la energía cinética adquirida por un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1000 millones de volts) que esta fuerza es comparable a la de interacción electromagnética.

Interacción electromagnética:

Es la fuerza responsable de la atracción y repulsión entre partículas cargadas eléctricamente. De hecho, la carga eléctrica se define como una propiedad de ciertas partículas que responden a las interacciones electromagnéticas según la ley de Coulomb (la fuerza es inversamente proporcional a la distancia entre las partículas y proporcional al producto de sus cargas). Esta interacción, de un alcance infinito, está en el origen de la existencia de los átomos, porque es la atracción eléctrica la que mantiene a los electrones (de carga eléctrica negativa) ligados al núcleo (que contiene protones, de carga eléctrica positiva).

El nombre atribuido a esta interacción hace alusión también a fenómenos magnéticos. Fue James Maxwell quien mostró, en el siglo pasado, que estos fenómenos podían ser unificados con los eléctricos. La teoría de Maxwell muestra que los campos eléctricos que varían en el tiempo producen un campo magnético e, inversamente, los campos magnéticos variables producen un campo eléctrico. La simetría entre electricidad y magnetismo es perturbada por el hecho de que las cargas magnéticas aisladas (los *monopolos magnéticos*) no han podido ser detectados hasta el presente. De hecho, si estos monopolos fueran detectados, el

electromagnetismo de Maxwell debería ser modificado, como ha sido mostrado por Paul A.M. Dirac.

Interacción débil. Para explicar los fenómenos de desintegración radioactiva como la llamada emisión β , es necesario introducir el concepto de interacción débil. Las partículas que sólo son susceptibles a las interacciones débiles son llamadas *leptones* (del vocablo griego *leptos*, que significa tenue, liviano).

Aunque la radioactividad fue descubierta a fines del siglo pasado, recién a fines de 1960 pudo ser elaborada una teoría completa y coherente de las interacciones débiles. Unificada con el electromagnetismo en la teoría electro-débil de Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg (1967), esta teoría fue confirmada experimentalmente a partir de 1973.

Las similitudes entre las interacciones electromagnéticas y las interacciones débiles habían sido ya utilizadas por Enrico Fermi para la construcción de una teoría fenomenológica que diera cuenta de la desintegración β . Sin embargo, la existencia de ciertas diferencias remarcables, en particular el corto alcance de la fuerza débil, planteaban problemas insolubles a la hora de encontrar, usando como modelo al electromagnetismo, una teoría que al mismo tiempo describiera a las interacciones débiles.

Interacción fuerte. Como se explicará más adelante, existe una categoría de partículas llamadas *hadrones* (del griego *hadros*, que significa fuerte), que pueden ser descritas como combinaciones de partículas más elementales llamadas *quarks*. A la familia de los hadrones pertenecen los nucleones (protón y neutrón) y los mesones. Estas partículas están ligadas entre sí mediante una interacción llamada fuerte. Esta fuerza, que es responsable, por ejemplo, de las fuerzas nucleares en el interior del núcleo, posee ciertas características singulares. En especial, esta fuerza produce el *confinamiento* de los quarks en los hadrones: los quarks no pueden ser obser-

vados por medidas directas en estado libre, como es el caso, por ejemplo, para los electrones. Es entonces una fuerza que no decrece con la distancia: para separar los quarks haría falta una energía infinita. Es debido a esta propiedad que la existencia de los quarks ha estado oculta a una evidencia experimental directa. Por el contrario, cuando las distancias entre los quarks son muy pequeñas (es decir, cuando las energías puestas en juego son muy grandes) la interacción fuerte decrece más y más y los quarks se comportan como si estuvieran libres. (*libertad asintótica*).

Las cuatro fuerzas mencionadas son las únicas conocidas en nuestro Universo. Las intensidades de estas interacciones, comparadas en una escala de energía de 1 GeV, son como se indican a continuación:

Int. Fuerte : Int. Electromagnética :
1 : 10^{-2}

Int. Débil : Int. Gravitacional :
 10^{-10} : 10^{-38}

LAS PARTICULAS INTERMEDIARIAS

El marco natural para estudiar las interacciones entre partículas elementales es el de la teoría cuántica de campos. Esta teoría asocia un *campo* a las fuerzas presentes entre las partículas materiales (campo gravitacional, campo magnético, etc.). Desde el punto de vista cuántico, la fuerza debida a la presencia de un campo se asocia al intercambio de partículas denominadas *cuantos* de campo.

Así, la *electrodinámica cuántica* que da una descripción cuántica del electromagnetismo, es el paradigma de las teorías cuánticas de campos. La interacción entre dos partículas cargadas, dos electrones por ejemplo, está relacionada con el intercambio de una partícula intermediaria, el *fotón*, *cuanto* de la radiación electromagnética. El fotón es una partícula sin carga ni masa (como el alcan-

de la interacción electromagnética es infinito, la partícula que la transmite debe tener una masa nula), que viaja (por definición!) a la velocidad de la luz. La descripción cuántica de la fuerza electromagnética a través del intercambio de fotones evita el concepto poco cómodo de acción a distancia. La interacción se reduce a dos eventos puntuales: la emisión y la absorción de un fotón. Debe señalarse que este fotón intermediario, llamado *fotón virtual*, posee propiedades que lo distinguen de los fotones reales que forman la luz del sol o las ondas de radio. Estas propiedades, ligadas al principio de incerteza de Heisenberg, permiten conciliar la idea de una partícula intermediaria con la ley de conservación de la energía.

La teoría de las interacciones fuertes está inspirada en el modelo que acabamos de describir para la electrodinámica cuántica. Se llama *cro-modinámica cuántica* (de *croma*, color, que es el nombre asignado a la carga asociada, para distinguirla de la carga eléctrica). Igual que para las cargas eléctricas, la fuerza entre dos cargas de color es proporcional al producto de las cargas, con un acoplamiento que es, sin embargo, más grande que el del electromagnetismo. Nuevamente, el mecanismo de transmisión de las fuerzas fuertes se basa en la existencia de partículas intermediarias, los *gluones*, que juegan un rol similar al de los fotones. Pero, la cromodinámica cuántica es una teoría más complicada que la electrodinámica: mientras que un sólo tipo de carga es suficiente para describir la fuerza eléctrica, han de introducirse tres cargas diferentes para tener en cuenta las interacciones fuertes. En lo que concierne al número de partículas intermediarias, ocho gluones de masa nula son necesarios, algunos de los cuales poseen una carga de color. Esta última propiedad del intercambio de gluones permite cambiar la carga de color de los quarks (mientras que, como el fotón no posee carga eléctrica, no puede alterar la carga de las partículas que lo intercambian).

La existencia de cargas de color en los gluones tiene como conse-

cuencia importante la cuantificación de dicha carga. En electrodinámica, en principio, el fotón puede ser emitido o absorbido por una partícula con carga eléctrica arbitraria (la cuantificación de la carga eléctrica es un hecho experimental). Las partículas con una carga de color interactuarán por intercambio de gluones, solamente, si las cargas están separadas a intervalos fijos (múltiplos de $1/2$), de manera de satisfacer la conservación de la carga de color en el proceso en cuestión.

También las interacciones débiles pueden ser descritas por medio de partículas intermediarias, de una masa del orden de 100 GeV . Dos de estas partículas tienen carga (el W^+ y el W^-) mientras que la tercera es neutra (el Z^0). Así como la interacción electromagnética se relaciona con la carga eléctrica de las partículas y la interacción fuerte con la de color, la interacción débil actúa sobre el *sabor* de las partículas. Veremos más sobre este aspecto de las interacciones débiles en la discusión concerniente a su unificación con la electrodinámica.

La partícula intermediaria de la interacción gravitacional es el **gravitón**. Por tratarse de una fuerza de largo alcance, los gravitones tienen masa nula, y por lo tanto pueden ser reales o virtuales. Hasta el presente no han podido ser detectadas (midiendo, por ejemplo, las ondas gravitacionales asociadas). De hecho, la gravitación presenta, desde el punto de vista de la mecánica cuántica, dificultades insuperables hasta el momento. Se espera poder incluirla de una manera coherente en una teoría unificada de todas las interacciones.

SIMETRÍAS E INTERACCIONES FUNDAMENTALES

Existen en la Naturaleza algunas magnitudes imposibles de observar, al menos con las experiencias desarrolladas hasta hoy día. La presencia de estos *no-observables* hace que las teorías que pretendan describirlas gocen de invarianza ante cambios de

ciertos parámetros. Estas *invarianzas de la teoría* o *simetrías*, permiten establecer *leyes de conservación*, que determinan qué magnitudes físicas permanecen inalteradas frente a los cambios efectuados. Estas son entonces las magnitudes a medir. Las simetrías juegan un rol central en los esfuerzos desarrollados hoy en día para comprender las leyes de la Naturaleza.

Un ejemplo de las *leyes de conservación* que se deducen de estas simetrías es la ley de conservación de la energía que resulta de postular la invarianza de las leyes de la física frente a translaciones en el tiempo, debido a que el tiempo absoluto no es observable. Debe señalarse que algunas de estas simetrías parecen ser *exactas*, mientras que otras parecen estar *quebradas* (se habla entonces de la ruptura de las simetrías).

A medida que las experiencias se hacen más y más precisas, ciertos no-observables devienen observables. Los descubrimientos de violaciones de simetrías han marcado el desarrollo de la física durante la segunda mitad de este siglo, a través de la búsqueda de mecanismos de ruptura de simetrías.

En física clásica, las partículas con propiedades idénticas no pierden por esto su "individualidad". En un instante dado uno puede "numerarlas" y seguir su movimiento individual. En mecánica cuántica, por el contrario, la situación es totalmente distinta: del principio de incerteza resulta el *principio de la indistinguibilidad de partículas idénticas*, que establece que la función de onda que describe los estados de estas partículas o bien es simétrica (no cambia bajo una permutación de partículas), o bien es antisimétrica (cambia de signo bajo la permutación). La descripción de partículas por funciones de onda simétricas o antisimétricas depende de la naturaleza de las partículas. Aquellas descritas por funciones de onda simétricas tienen comportamientos que son descritos por la llamada *estadística de Fermi-Dirac* y se denominan **fermiones**, en tanto que las descritas

por funciones de onda antisimétricas se comportan de acuerdo a la *estadística de Bose-Einstein* y se denominan **bosones**.

Esta propiedad de las partículas elementales es esencialmente cuántica y no admite entonces una interpretación clásica. Todas las partículas intermediarias son bosones, mientras que las partículas que componen la materia son fermiones. Una propiedad fundamental de los fermiones es que obedecen el principio de exclusión de Pauli: dos fermiones idénticos no pueden encontrarse simultáneamente en un mismo estado cuántico.

Se comprende así por qué las partículas que forman la materia y que son fermiones no colapsarán nunca en un estado único, de densidad muy alta, bajo la influencia de las fuerzas producidas por las partículas intermediarias.

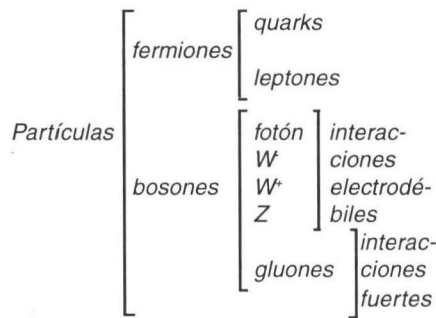
Se está trabajando sobre una simetría que permite las transformaciones entre estados bosónicos y fermiónicos, llamada *supersimetría*. Si bien no es una simetría de la naturaleza tal como la concebimos hoy en día, podría estar presente a energías más altas, y haberse roto por algún mecanismo y estar ausente a las energías de las experiencias actuales.

Entre las ventajas que ofrece la teoría de la supersimetría se pueden mencionar:

- Permite unificar a quarks y leptones con los bosones intermediarios.
- Se hace imprescindible para incluir la gravitación.
- El efecto de la supersimetría sobre las constantes de acoplamiento efectivas es tal que se podría llegar, si ciertos cálculos recientes son confirmados, al encuentro de las tres cargas a una energía de unificación única.

LAS PARTICULAS EN DETALLE

A esta altura podemos tratar de hacer un inventario de las partículas elementales. Si excluimos a la gravitación, tenemos el cuadro siguiente:



Hemos visto que las partículas elementales se caracterizan no solamente por su masa sino también por sus propiedades internas, ligadas a sus respuestas a las diferentes interacciones. Así, se distinguen la *carga* (respuesta a las interacciones electromagnéticas), el *sabor* (respuesta a las interacciones débiles), y el *color* (respuesta a las interacciones fuertes).

Cada partícula tiene una **antipartícula** asociada. Partículas y antipartículas tienen la misma masa y carga eléctrica opuesta. En el caso de las partículas intermediarias, la antipartícula coincide con la partícula. La necesidad de la existencia de las antipartículas surge de la unión de la mecánica cuántica y la relatividad, según demostró Paul A.M. Dirac. A partir del descubrimiento en 1932 del antielectrón (el positrón), el catálogo de antipartículas ha aumentado al mismo ritmo que el de las partículas, dando como resultado una lista de los constituyentes de la llamada *antimateria*. Es muy frecuente detectar simultáneamente pares de partícula-antipartícula en las colisiones de alta energía.

LOS FERMIONES EN DETALLE:

Se conocen seis leptones, que pueden ser cargados o neutros. Los leptones cargados interactúan con fuerzas electromagnéticas y débiles, los neutros con fuerzas débiles. La

teoría electrodébil, que los considera como constituyentes fundamentales, ha sido verificada en todas las experiencias.

El prototipo del leptón es el electrón. Tiene una masa pequeña, equivalente en unidades de energía a 500.000 electrón volts y una carga unitaria, que es por convención igual a -1 . Su tamaño es tan pequeño como 2 ó 3×10^{-18} m. Otros dos leptones, el *muón* y el *tau*, tienen la misma carga y propiedades similares a las del electrón, excepto su masa. La masa del muón es 200 veces más grande que la del electrón, mientras que la del leptón tau es 300 veces la del electrón.

Los otros leptones son los *neutrinos*, sin carga y con masa tan pequeña que a la fecha (Agosto de 1996) no se puede afirmar experimentalmente que sean masivos. Cada leptón cargado tiene un neutrino asociado.

Se tienen evidencias suficientes sobre la existencia de seis clases de quarks de sabores diferentes. Además, cada quark puede existir en tres colores diferentes. Los seis sabores están en correspondencia con las seis variedades de leptones, mientras que esta correspondencia no existe para el color, puesto que los leptones no sienten la interacción fuerte. Otra propiedad de los quarks concierne a su carga eléctrica, que es fraccionaria ($-1/3$ o $+2/3$ según el sabor). Se clasifica a los leptones y los quarks en tres generaciones. Cada generación está formada por un leptón cargado, su neutrino asociado y dos quarks, uno de carga $-1/3$ y el otro de carga $+2/3$. Como los quarks vienen en tres colores, hay ocho partículas en cada generación. Se pueden representar las diferentes generaciones en el esquema siguiente:

	quarks	leptones	
1era generación	u d	ν_e neutrino e e electrón	presente en la materia de todos los días
2nda generación	c s	ν_μ neutrino μ μ muón	presentes sólo a muy altas energías
3era generación	t b	ν_T neutrino t t tau	

La carga de los leptones se representa en la tabla siguiente:

leptón	carga
electrón	-1
neutrino ν_e	0
muón	-1
neutrino ν_μ	0
tau	-1
neutrino ν_τ	0

(La unidad de carga es la carga del protón).

Para los quarks se tiene:

quark	carga
u, up	+2/3
d, down	-1/3
c, charm	+2/3
s, strange	-1/3
t, top	+2/3
b, bottom	-1/3

LOS BOSONES EN DETALLE:

Las partículas intermediarias asociadas a las fuerzas fundamentales son el fotón, los gluones y los bosones W^+ , W^- , Z. En la tabla siguiente se indican su carga y masa:

bosón	carga	masa	interacción
fotón	0	0	
Z	0	91	
W^-	-1	81	electrodébil
W^+	+1	81	
gluón	0	0	fuerte

(Las masas están expresadas en GeV/c^2 , de acuerdo con la relación bien conocida $E = mc^2$, donde c es la velocidad de la luz.)

El gravitón (de masa nula, asociado a la interacción gravitacional) no figura porque, por una parte, no ha sido aún detectado, y por otra parte, no ha sido presentada aún una teoría cuántica satisfactoria de la gravitación. Es con la *teoría de las supercuerdas* que se espera describir a la gravitación unificada con las otras interacciones de una manera correcta.

Una partícula escalar, neutra, juega un rol fundamental en la teoría electrodébil: el **bosón de Higgs**. Su

nombre viene del físico Peter Higgs, que ha propuesto un modelo donde esta partícula es responsable de la ruptura de la simetría de gauge, que está en la base de la teoría electrodébil (ver más adelante). Se ha buscado esta partícula sin éxito en las experiencias de colisiones a altas energías. La predicción que resulta de ellas establece que su masa estaría dentro de un rango de 76_{50}^{+152} GeV. Es posible que el campo de Higgs no corresponda a una partícula elemental sino a un estado ligado de partículas desconocidas vinculadas por partículas intermediarias de interacciones aún desconocidas.

LA COMPOSICIÓN DE LOS HADRONES

A partir de los años 60 se ha desarrollado la idea de que las partículas tales como el protón o el mesón π serían objetos compuestos. La noción de quark fue introducida por el físico Murray Gell-Mann, que mostró cómo la plétora de hadrones que se detectan en las colisiones de altas energías pueden ser interpretadas si se las considera como ensamblajes de quarks.

Como se muestra en la siguiente tabla, para formar un hadrón los quarks pueden combinarse de a tres (cada uno con un color diferente) para formar un barión, o de a dos (un quark de un color dado con el antiquark del anticolor que le corresponde) para dar un **mesón**. Cada color corresponde a una combinación de *cargas de color*. Las combinaciones posibles de cargas asociadas son tales que la carga total de color es nula (estado de color neutro, como es neutro el átomo de hidrógeno para la interacción

electromagnética). Las principales propiedades de los hadrones están indicadas en la siguiente tabla:

Como todos los átomos son eléctricamente neutros, la carga del protón debe ser igual en valor absoluto y de signo opuesto a la del electrón y el neutrón debe tener carga nula (dado que el número de protones es igual al de electrones).

SIMETRÍAS DE GAUGE Y TEORÍAS UNIFICADAS

Las interacciones fundamentales, descritas mediante una clase de teorías de campos cuánticos llamadas *teorías de gauge* presentan una simetría interna (simetría de gauge) que juega un rol fundamental. De hecho, el concepto de simetría de gauge está en la base de la formulación unificada de la electricidad y el magnetismo, adelantada por James Maxwell el siglo pasado.

Se sabía desde hacía mucho tiempo que el potencial eléctrico en el electromagnetismo clásico puede ser definido independientemente de su potencial de referencia. Esta es una expresión de una simetría que los físicos llaman *simetría de gauge global*, y que asegura la conservación global de la carga eléctrica.

Maxwell ha comprendido la manera de convertir esta simetría global en una *simetría de gauge local* de manera de asegurar la conservación local de la carga eléctrica en cada punto del espacio. Para lograrlo modificó la ecuación de acoplamiento entre campos eléctricos y magnéticos de Ampère. Las ecuaciones resultantes (ecuaciones de Maxwell) tienen una

tipo	nombre	composición	carga	masa
bariones	protón	uud	+1	0.938
	neutrón	udd	0	0.939
	delta (Δ^{++})	uuu	+2	1.232
	Omega (Ω^-)	sss	-1	1.672
mesones	pión (π^+)	ud	+1	0.140
	kaón (κ^-)	$s\bar{u}$	-1	0.494
	rho (ρ^+)	ud	+1	0.770
	D^+	cd	+1	1.869
	eta-c (η_c)	$c\bar{c}$	0	2.980

(las masas están expresadas en GeV/c^2)

forma muy sencilla si son escritas en términos de objetos matemáticos llamados *campos de gauge*, que determinan los campos eléctrico y magnético a menos de una función arbitraria de las coordenadas y el tiempo.

El éxito que esta teoría, la electrodinámica cuántica, ha tenido en la descripción de las interacciones electromagnéticas puede ser medido comparando sus predicciones para el *momento magnético* con los resultados de la física atómica. En efecto, mientras que los cálculos previos muestran que el electrón produce un campo magnético que puede ser asociado a un momento magnético medido por el *factor giromagnético g* (que tiene, en la teoría semiclásica, un valor 2), la electrodinámica cuántica predice que el valor de g es:

$$g_{\text{teor}} = 2 \times (1,001\,159\,652\,459 \pm, 000\,000\,000\,123)$$

Las experiencias, por otra parte, dan un valor:

$$g_{\text{exp}} = 2 \times (1,001\,159\,652\,193 \pm, 000\,000\,000\,004)$$

La comparación de estos valores confirma la validez de la electrodinámica cuántica. Esto da una idea del poder de predicción de esta teoría y también de la precisión de las medidas experimentales que se realizan hoy en día.

A la hora de unificar las interacciones en una sola, surge el problema que, mientras que los intermediarios deben ser masivos, la invarianza de gauge les impone una masa en reposo nula. Este problema fue solucionado por P.Higgs, desarrollando un mecanismo de *ruptura espontánea de la simetría*, que da una masa a ciertos campos de gauge sin que por eso se viole la invarianza de gauge, lo que asegura la eliminación de cantidades mal definidas en las teorías cuánticas de campos. La idea de fondo es que el estado fundamental de una teoría puede tener más simetrías que sus ecuaciones de movimiento. El mecanismo de Higgs necesita de partículas bosónicas (bosones de

Higgs), que no han sido descubiertas hasta ahora. En presencia de un campo de Higgs, el W y el Z (los campos de gauge) adquieren una masa grande mientras que el fotón conserva su masa nula. El acoplamiento a los campos de Higgs permite también a los quarks y leptones tener una masa no nula.

La teoría electrodébil ha sido confirmada en 1973 en el Centre Européen des Recherches Nucléaires (CERN), en Ginebra, por la detección de las corrientes neutras (mediadas por el bosón Z) que ella predijo. Sin embargo, esta teoría presentaba problemas en relación con ciertos procesos que no existen en la Naturaleza. La solución correcta consiste en introducir un quark "charmé" (llamado quark c). Cuando en 1974 el quark c fue descubierto resultó el triunfo de la teoría electrodébil. En 1983 se encontraron las partículas W y Z, en el CERN, con masas que concordaban con las calculadas teóricamente.

La información acerca de los procesos que involucran a estos campos se obtiene a partir del estudio de colisiones entre partículas a energías muy altas en el interior de aceleradores de partículas. Los aceleradores de los años 90 alcanzan energías de giga-electronvolts. Así en el L.E.P. (Large Electron-Positron Collider) del CERN, que es el acelerador más grande del mundo, se ace-

leran electrones y positrones con una energía de 200 GeV, mientras que en el mismo lugar el proyecto LHC (Large Hadron Collider) pondrá en juego energías del orden de 16 000 GeV.

Vamos a dar un ejemplo de este tipo de interacciones:

Cuando un electrón y un positrón colisionan a muy altas energías, pueden aniquilarse para producir D^- y D^+ (ver tabla de hadrones). Este proceso implica la creación de bosones intermediarios (Z's o fotones (γ)):

$$e^+ e^- \rightarrow D^+ D^-$$

Más detalles se tienen en la Figura 1.

GRAN UNIFICACIÓN

A partir de los años ochenta los fenómenos de interacciones fuerte y electrodébil, parecen bien descritos por los modelos de quarks y leptones en interacción a través de campos de gauge (bosones intermediarios de las fuerzas). Es el *modelo standard* en su forma actual, cuya simetría puede describirse diciendo que es invariante frente a transformaciones definidas en el llamado grupo de gauge $SU(3)_{\text{color}} \times [SU(2) \times U(1)]_{\text{electrodébil}}$.

Una característica importante de las teorías de gauge reside en el hecho de que las constantes de acoplamiento (que determinan la intensidad

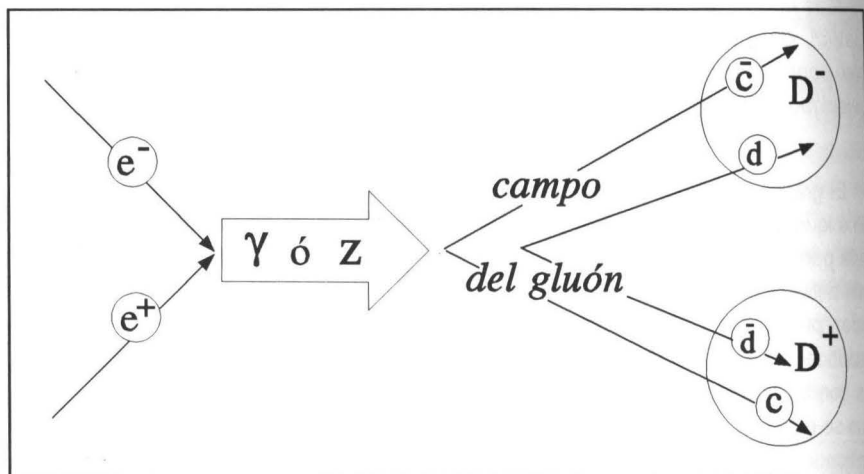


Fig. 1.- ENCUENTRO DE UN POSITRÓN Y UN ELECTRÓN: Mientras que es estable cuando está aislado, el positrón desaparece cuando interactúa con un electrón: esta "aniquilación", que puede producirse por la intermediación de un fotón o un bosón Z virtuales, produce mesones D^- y D^+ .

de las fuerzas) no son verdaderamente constantes. Su valor depende de la energía a la que son medidas. El mecanismo físico que explica esta propiedad está ligado a la posibilidad de creación de pares de cargas virtuales a partir del vacío.

En el caso de las teorías de gauge del tipo del electromagnetismo, las partículas virtuales de carga opuesta a una carga real producen una suerte de pantalla que disminuye el valor medido de la carga real. La carga efectiva *aumenta* así para distancias cortas o, lo que es equivalente, cuando las medidas son hechas a muy altas energías. En el caso de las simetrías de gauge dis-

tintas del electromagnetismo (llamadas teorías no-abelianas), los campos de gauge, están cargados y producen una "anti-pantalla" que *disminuye* el valor de la carga efectiva a muy altas energías.

Entonces, se puede buscar una escala de energías en la que las constantes de acoplamiento de las interacciones electromagnéticas (que aumentan), las débiles y las fuertes (que disminuyen), finalmente coincidan. En ese caso, se podría decir que se han unificado las tres interacciones (a partir de este valor de la energía) en una sola teoría de gauge, con una sola constante de acoplamiento, y con un grupo de simetría

único que englobaría los grupos del modelo standard.

Los cálculos muestran que se puede llegar a esta unificación a una energía del orden de 10^{15} GeV (o lo que es equivalente, a una distancia de 10^{-29} cm). A estas energías y estas distancias todas las interacciones tendrían la misma intensidad (la misma constante de acoplamiento) y todas las interacciones entre las partículas serían igualmente probables. A partir de distancias más grandes que la de la unificación se podría distinguir entre interacciones fuertes y electrodébiles. A partir de distancias superiores a 10^{-16} cm la simetría se rompería y las tres fuerzas serían dis-

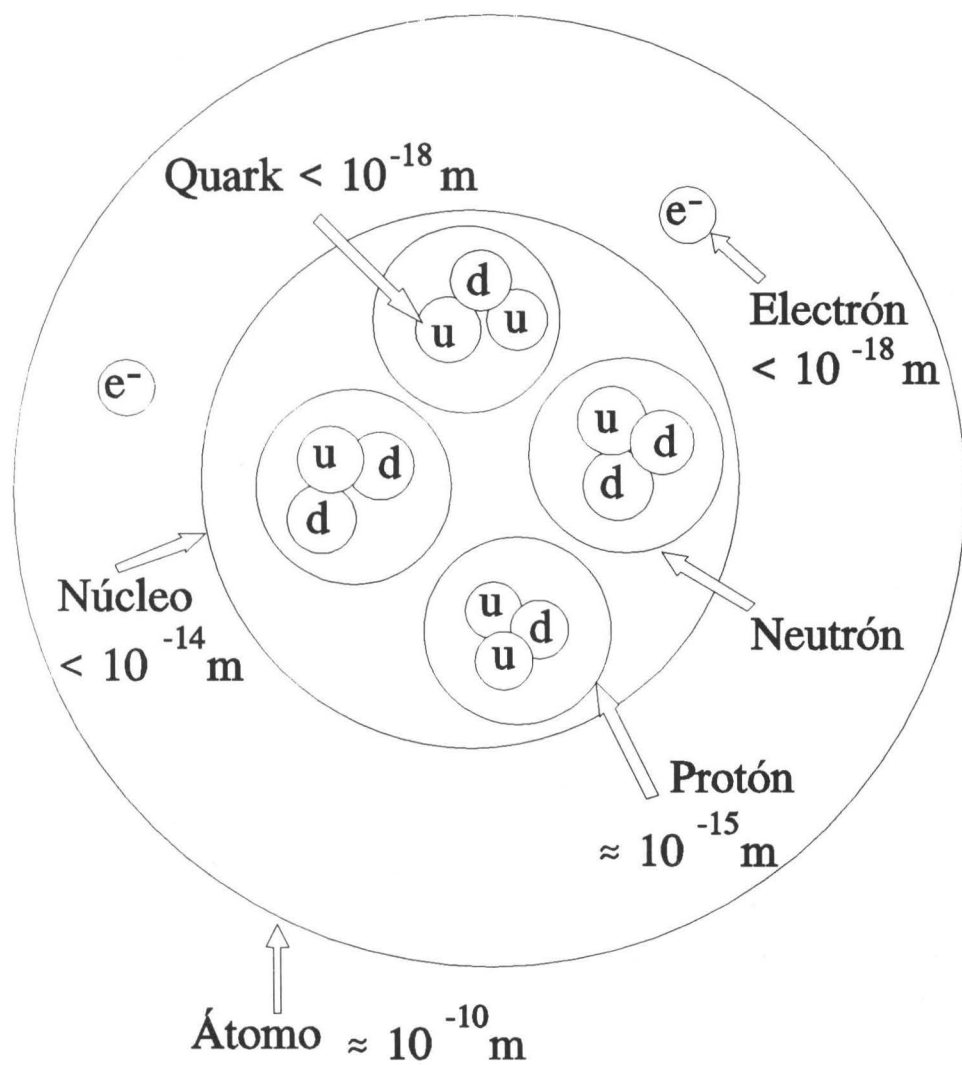


Fig. 2.- LA ESTRUCTURA DE UN ÁTOMO: Si el tamaño de los nucleones fuera el de la figura, los quarks y los electrones tendrían un tamaño inferior a 0,01 mm, mientras que el átomo tendría un diámetro de 1 km.

tintas. El mecanismo que explicaría las rupturas sucesivas de las simetrías sería nuevamente el de la ruptura espontánea.

Una de las consecuencias de la unificación de las tres interacciones es que el protón devendría inestable. Las experiencias llevadas a cabo para medir la desintegración del protón difieren en dos órdenes de magnitud del valor predicho para la vida media del protón, que es de 10^{31} años, de modo que no existe todavía una forma de corroborar la desintegración del protón. Otro problema de las teorías de gran unificación está ligado al hecho de que las medidas de los últimos años muestran un desacuerdo leve pero significativo que impide el encuentro de las tres constantes de acoplamiento. Para resolver este último problema los físicos han apelado a otra simetría descubierta en el estudio de las teorías de cuerdas, la *supersimetría*.

En los últimos meses ha habido gran excitación ante experiencias en USA y Europa que podrían mostrar evidencia experimental de las implicaciones de los modelos supersimétricos.

CONCLUSIONES

El modelo standard de las interacciones fuertes y electrodébiles, establecido después de treinta años de investigaciones, da una descripción satisfactoria de la naturaleza de las fuerzas que se ejercen entre las partículas elementales en términos de quarks y leptones, constituyentes de la materia, y de los bosones intermedios, mediadores de las interacciones. Un modelo basado en una simetría de gauge permite explicar todas las experiencias de física efectuadas a energías de hasta 200 GeV.

En la Figura 2 se muestra un átomo, la partícula "elemental" descubierta por los griegos hace más de 2500 años, tal como se la concibe hoy en día. Nótese que si el tamaño de los nucleones fuera como el de la figura, los quarks y los electrones serían de un tamaño inferior a 0.01 mm y el átomo tendría un tamaño de 1 km.

Si bien los éxitos del modelo standard son notables, restan muchas cuestiones por aclarar. Los físicos han desarrollado el modelo standard

en dirección a la gran unificación supersimetría, la teoría de cuerdas... Pero hay cuestiones que todavía quedan sin respuesta. Por ejemplo, habría que comprender el esquema según el cual los fermiones se agrupan en familias y deducir los valores de masas y acoplamiento de los fermiones. El bosón de Higgs juega un rol central en el modelo electrodébil pero aún no ha sido detectado. Debe aún determinarse si es una partícula elemental o un estado ligado. Si la supersimetría es una simetría fundamental de la Naturaleza habría que encontrar la escala de ruptura así como las masas de los compañeros supersimétricos de las partículas conocidas. Por fin, faltaría desarrollar una teoría que unifique las cuatro interacciones conocidas.

La posibilidad de contar con aceleradores donde las energías sean de 16 TeV's (1 TeV = 1000 GeV) en la primera década del siglo que viene, así como los progresos alcanzados en el dominio de la astrofísica y la cosmología aportarán, sin lugar a dudas, algunas de las respuestas esperadas.

CIENCIA E INVESTIGACIÓN es una revista que tiene por objetivos:

- la publicación de temas básicos del conocimiento científico y tecnológico, a través de artículos accesibles a estudiantes y público en general.
- la difusión de las actividades desarrolladas por los científicos y tecnólogos argentinos en centros, laboratorios e institutos, así como también en reuniones nacionales e internacionales.
- la publicación de biografías, comentarios bibliográficos y trabajos relacionados con la historia de la ciencia y la técnica (evolución histórica de conceptos científicos y tecnológicos, historia de centros, laboratorios e institutos de investigación, etc.).

Sus páginas están abiertas a todos los interesados en colaborar y el Comité Editorial tiene a su cargo la selección de los artículos que serán publicados.