

# Simetrías e Interacciones en Física

**Describir las interacciones fundamentales de la materia en una sola teoría es uno de los grandes objetivos de la Física. Importantes avances para esta unificación se han logrado al investigar las simetrías de esas interacciones.**

RODOLFO MARTINEZ \*

## INTRODUCCION

Existen en la naturaleza cuatro tipos diferentes de interacciones entre la materia que son responsables de todos los fenómenos físicos observados hasta ahora. Dicho de otra manera, dos trozos cualesquiera de materia sólo pueden interactuar a lo más de cuatro formas distintas, ya que existen ciertas partículas materiales, como el neutrino, por ejemplo, que les está prohibida alguna o algunas de estas interacciones.

Este conocimiento representa en sí una de las mayores síntesis intelectuales logradas por la humanidad, y su origen podría rastrearse hasta la Grecia antigua, puesto que con sólo cuatro principios se intenta explicar toda la fenomenología hasta ahora observada. Evidentemente esto no quiere decir que todo fenómeno, por ejemplo el estado de enamoramiento, se puede explicar mediante estas cuatro interacciones, ya que van apareciendo nuevas categorías de pensamiento que no son contempladas por la física.

Ahora bien, ¿Cuáles son estas cuatro interacciones? Las dos más conocidas son la interacción gravitacional, responsable del peso de los cuerpos, y la interacción electromagnética, responsable no sólo —como podría creerse— de fenómenos eléctricos como el rayo o el funcionamiento de una computadora, sino también del comportamiento de los electrones en un

átomo y por consecuencia (al menos en gran parte) del comportamiento químico y biológico. El hecho de que nos sean familiares es debido a que se trata de interacciones (que en este caso se manifiestan como "fuerzas") de largo alcance, infinito en realidad, ya que su intensidad es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia.

Pero las otras dos son diferentes: son en primer lugar interacciones de muy corto alcance y por eso son muy poco familiares. Además no se manifiestan simplemente como "fuerzas", sino que implican un cambio en la naturaleza de la materia que sufre tales interacciones, es decir, ¡la materia se transforma cualitativamente!

Estas interacciones son las llamadas interacción fuerte e interacción débil.

La primera —como su nombre lo indica— es muy fuerte: a corta distancia equilibra la repulsión electrostática y permite mantener unidos a los protones del núcleo atómico. Estas características de la interacción fuerte son "exploradas" en la bomba atómica.

La interacción restante, la débil, es mucho menos intensa que la fuerte o la electromagnética, de ahí su nombre, pero es  $10^{35}$  veces más intensa que la gravitacional. El fenómeno más conocido en que interviene es probablemente la radioactividad  $\beta$  (emisión de un electrón por el núcleo de un átomo). Figura. 1.

Sólo para la interacción electromagnética tenemos una teoría coherente, por lo que razonablemen-

te se trata de construir teorías para las otras tres siguiendo un enfoque similar al del electromagnetismo. Esta teoría constituye un ejemplo de lo que los físicos llaman teoría de norma<sup>1</sup> de simetría local (en este caso teoría abeliana), y existen fuertes razones para suponer que las otras tres interacciones son tratables por teorías similares.

Las simetrías en física parecen jugar un papel importante y es sorprendente cómo el conocer las simetrías de un fenómeno físico nos permite conocer la teoría del fenómeno. Las simetrías más familiares son las geométricas. Por ejemplo, si se gira una esfera alrededor de un eje que pasa por su centro, se obtiene una situación indistinguible de la original, sea cual sea el ángulo de rotación. Sin embargo, existen simetrías que no son de naturaleza geométrica, por ejemplo la simetría CPT (conjugación de carga, paridad e inversión en el tiempo). Si se pudiera cambiar en el universo la materia por su antimateria e invertir la marcha del tiempo, se obtendría el mismo universo que antes. Esta es una simetría del universo. En este caso la

1. Este término fue introducido hacia 1920 por Herman Weyl cuando construía una teoría que combinase electromagnetismo y relatividad general. En la teoría había que introducir ciertos patrones de longitud y tiempo para cada punto del espacio-tiempo, y Weyl los comparó a los patrones usados por los obreros mecánicos, escribiendo en alemán "Cich Invarianz", que fue primero traducido al inglés como "calibration invariance" y posteriormente como "gauge invariance". En México se ha preferido usar el término "Norma" (medidor, patrón, etc.) "Eich Invarianzs"

Profesor de carrera del Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM.

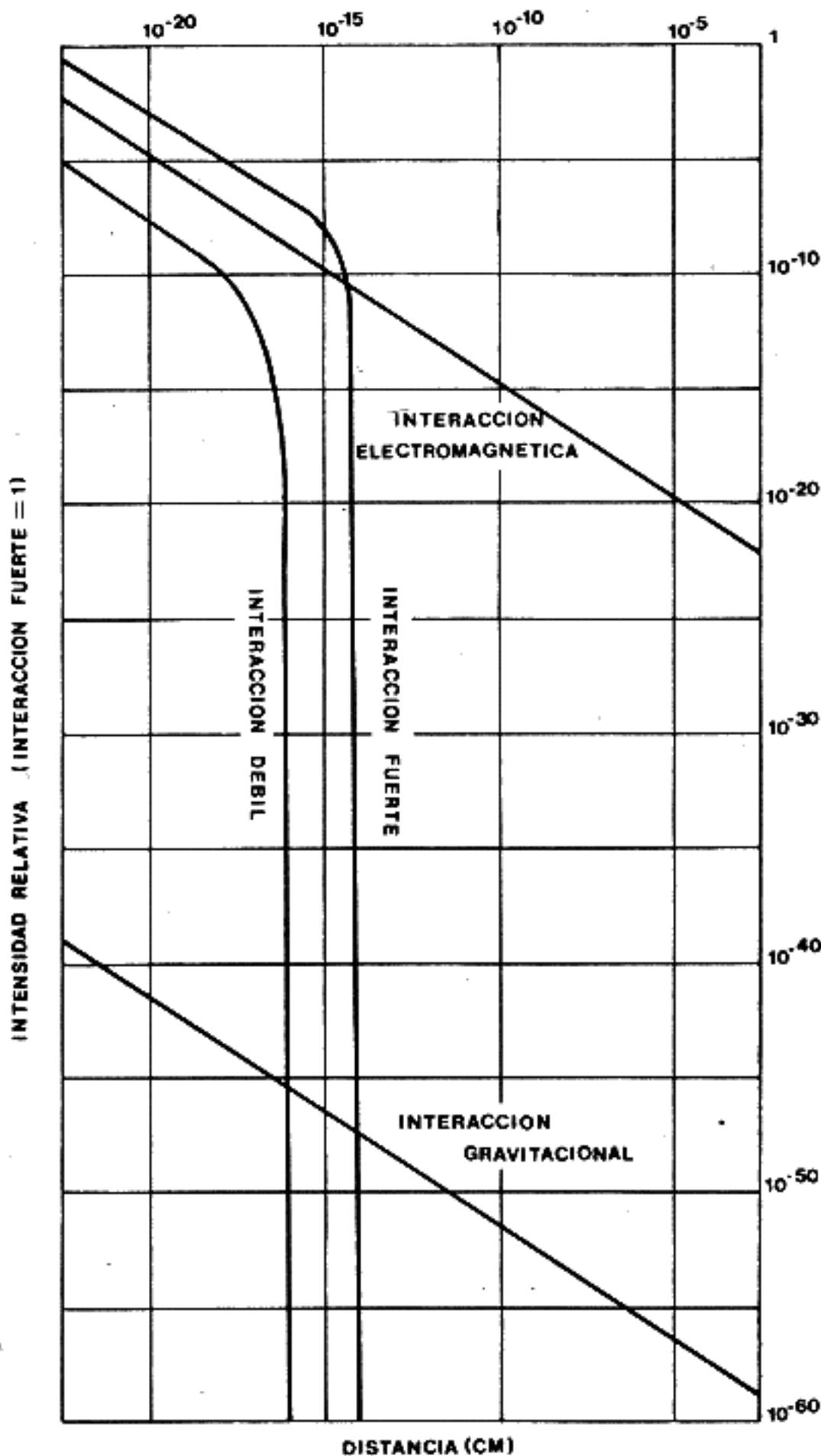


Fig. 1. Intensidades relativas entre las interacciones donde se escoge 1 (arbitrariamente) para la interacción fuerte.

transformación es la misma en cada punto del universo y por esto se llama global.

Otro ejemplo de simetría global lo constituye el llamado Spin isotópico o Isospin, que es una pro-

iedad que concierne al protón, al neutrón y muchas otras partículas similares llamadas Hadrones. Está basado en el hecho de que — excepto por la carga — el protón y el neutrón son partículas muy similares: ambas tienen interacciones

fuertes, el mismo spin, prácticamente la misma masa (diferente sólo en 10%) y si uno pudiese cambiar un protón por un neutrón y viceversa, las interacciones fuertes en el núcleo del átomo prácticamente no cambiarían. Todo esto sugiere la existencia de una simetría, la simetría de isospin, que permite cambiar protones en neutrones y viceversa<sup>2</sup> y que debe ser una simetría de la teoría de interacciones fuertes. Dicho de otra manera, las interacciones fuertes deben ser invariantes bajo transformaciones globales de isospin. Esto obliga a la teoría a tomar una forma particular impuesta por esta simetría. Sin embargo, de la misma manera que la simetría de la esfera en la práctica es sólo aproximada (siempre existe algún defecto, por ejemplo una raspadura, que nos permite conocer que ha tenido lugar una rotación), también la del isospin es sólo una simetría aproximada: un neutrón no es igual a un protón y la presencia de las interacciones electromagnéticas rompe la simetría.

Regresando al electromagnetismo, éste también tiene una simetría global: es invariante frente a cambios de fase en la función de onda  $\Psi$ . Esta función  $\Psi$  (compleja) se introduce en la física moderna para describir el estado de una partícula o un campo y su módulo al cuadrado  $|\Psi|^2 = \Psi\Psi^*$  se interpreta como la probabilidad de que la partícula tenga determinada posición, impulso o energía, etc., según sea el argumento de la función. Por ser compleja la función de onda tiene dos componentes, una real y otra imaginaria, y un cambio de fase en ella puede ser visualizado como una rotación en un espacio de dos dimensiones, con un eje real y otro imaginario, donde la función de onda se representa por un punto, o aún mejor por un vector en ese espacio. Como esta transformación no depende del punto en el espacio físico en el que se hace, se trata de una transformación global. El electromagnetismo es pues invariante bajo cambios de fase o

2. En la realidad las transformaciones de los espines son transformaciones continuas, como la rotación de una esfera, y permiten pasar por estados (en el sentido de la mecánica cuántica) intermedios de protón y neutrón, que a veces pueden ser contemplados como protón y a veces como neutrón.

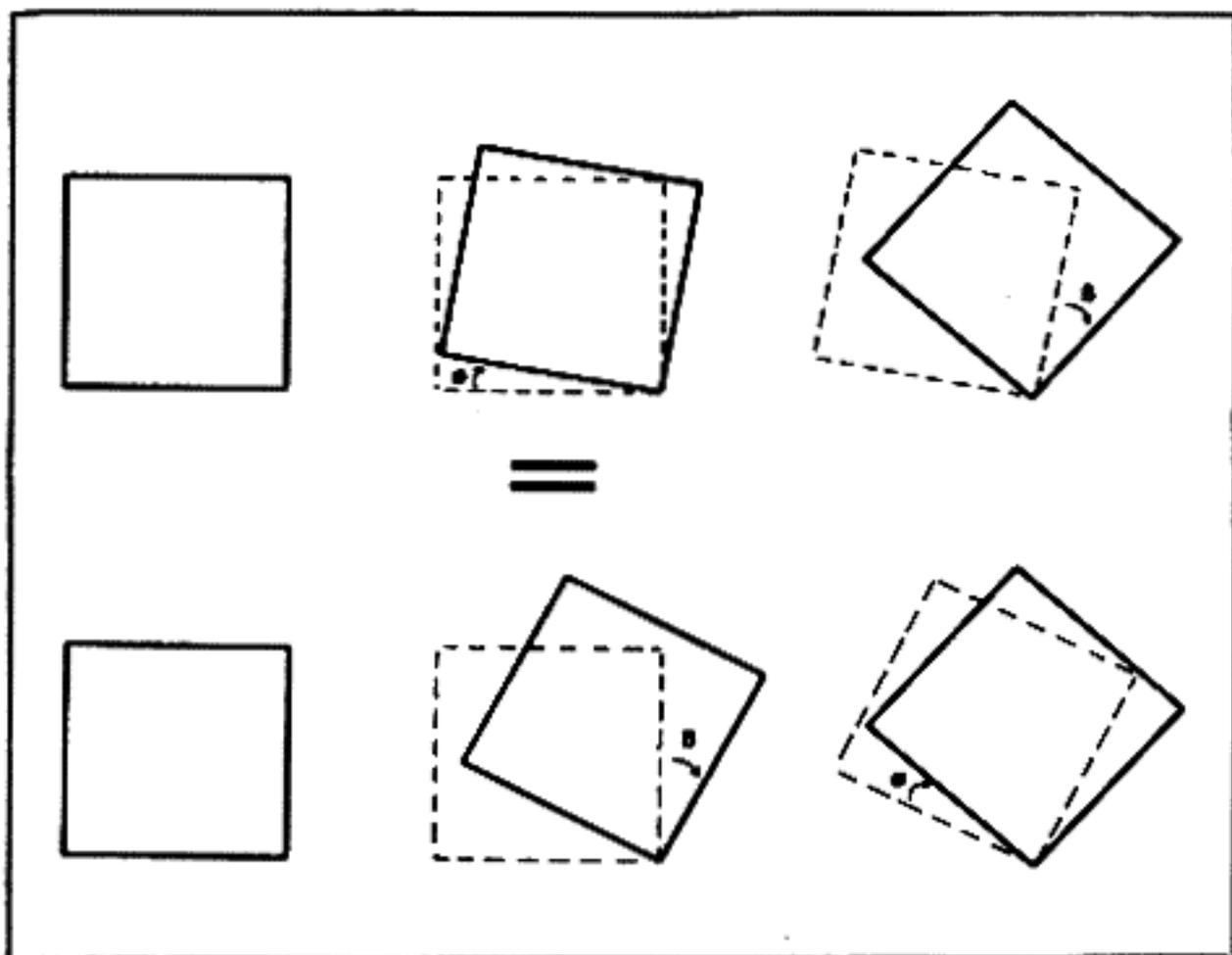


Fig. 2. El orden de las rotaciones planas no cambia el resultado final.

rotaciones en el espacio arriba mencionado, o sea, que el contenido físico del electromagnetismo no depende de la fase de la función de onda. Las rotaciones en un plano son un ejemplo de transformaciones abelianas<sup>3</sup> por ser conmutativas. En efecto, si uno realiza dos rotaciones en un plano, una seguida de otra, el resultado final es independiente del orden en que se efectúan como se ve en la figura 2.

De hecho las rotaciones forman una estructura algebraica conocida probablemente por el lector y que los matemáticos llaman grupo.

Cuando elementos del grupo conmutan bajo la operación definida en él, como en este caso las rotaciones conmutan bajo la operación de composición al grupo se le conoce como grupo Abeliano y los físicos lo denotan como  $U(1)$  (el "1" viene del hecho de que sólo es necesario un parámetro, el ángulo de rotación, para caracterizar una rotación en un plano). En tres dimensiones, sin embargo, el grupo de rotaciones no es Abeliano. (Figura 3)

3. En honor de Niels Henrik Abel, matemático noruego que estudió este tipo de transformaciones a principio de siglo.

### TEORIAS DE NORMA

El campo eléctrico, tal como se define en las ecuaciones de Maxwell, es invariante bajo la adición de un potencial constante arbitrario al potencial eléctrico. La razón es que el campo eléctrico está definido en términos de diferencias en el potencial y no por el valor absoluto de éste. A esta invariancia de norma, y a la adición de una constante al potencial se le conoce como cambio de norma. Por la naturaleza misma del campo eléctrico este cambio de norma no tiene consecuencias físicas y por lo tanto no se puede medir, es pues en realidad una simetría de la teoría. De hecho esta es la razón por la cual un gato puede caminar sobre un cable sin electrocutarse.

Se puede ilustrar la diferencia entre una simetría global y una local con el ejemplo siguiente. Imaginemos un balón de hule donde las características del hule sean las mismas en cualquier punto (grosor, intensidad, etc.). Al inflarse obtendremos un balón esférico y de hecho un campo de fuerzas de simetría esférica. Pero si el hule cambia localmente, por ejemplo en grosor, al inflarse no se obtendrá un balón esférico, sino de otra forma, una salchicha o un huevo, etc. El campo de fuerza no es ya más de simetría esférica, sino que

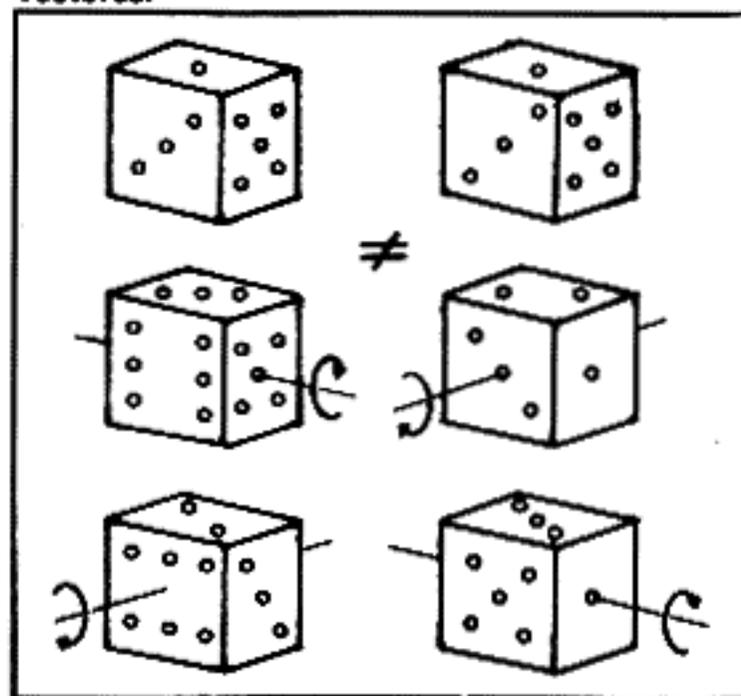
reproduce —de alguna manera— la estructura y simetría locales. Así, las zonas de mayor espesor se encontrarán menos estiradas, etc. Esta correlación entre simetría y campo de fuerzas ilustrada aquí es importantísima y es explotada sistemáticamente, como veremos más adelante en el estudio de las cuatro interacciones básicas. (Figura 4)

¿Qué sucedería si el cambio de fase en el electromagnetismo fuese local y no global; es decir, si el ángulo de rotación dependiese de la posición y cambiase de punto a punto del espacio (y posiblemente del tiempo)? Pedir que una teoría sea invariante bajo una transformación local significa pedir que la física descrita por esta teoría sea la misma después de efectuar la transformación, aunque esta sea distinta de punto a punto.

Es posible demostrar que el electromagnetismo no es invariante bajo cambios de fases locales —transformaciones del grupo abeliano local— a menos que se introduzca una nueva función que compense exactamente las variaciones en la teoría, de manera que la nueva teoría, electromagnetismo  $\pm$  nueva función, sea invariante. ¿Pero qué representa esta nueva función?<sup>4</sup> Se trata del poten-

4. En física moderna el nombre empleado es campo y no función.

Fig. 3. Rotaciones en tres dimensiones. Estas rotaciones no cumplen las propiedades conmutativa de la suma vectorial. A pesar del hecho de que tienen módulo y dirección, las rotaciones finitas no pueden representarse como vectores.



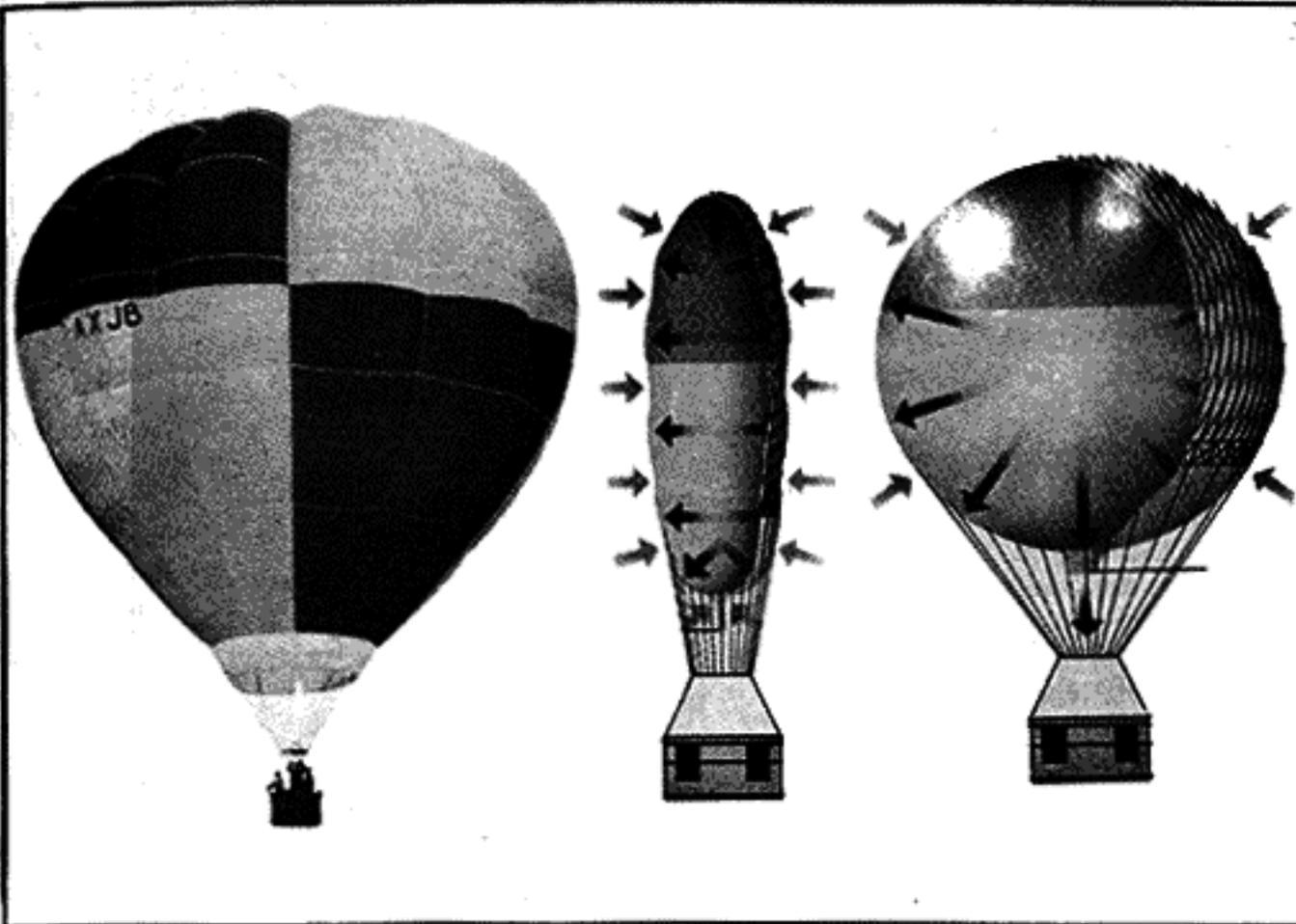


Fig. 4. Al inflarse un balón de hule donde las características del hule sean las mismas (grosor, intensidad etc.), en cualquier punto obtendremos un balón esférico y por lo tanto un campo de fuerzas con simetría esférica. Si el hule cambia localmente se tendrá otra figura: un huevo, una salchicha etc., y el campo de fuerzas tendría otra simetría. La forma del campo de fuerzas depende de las características locales del hule.

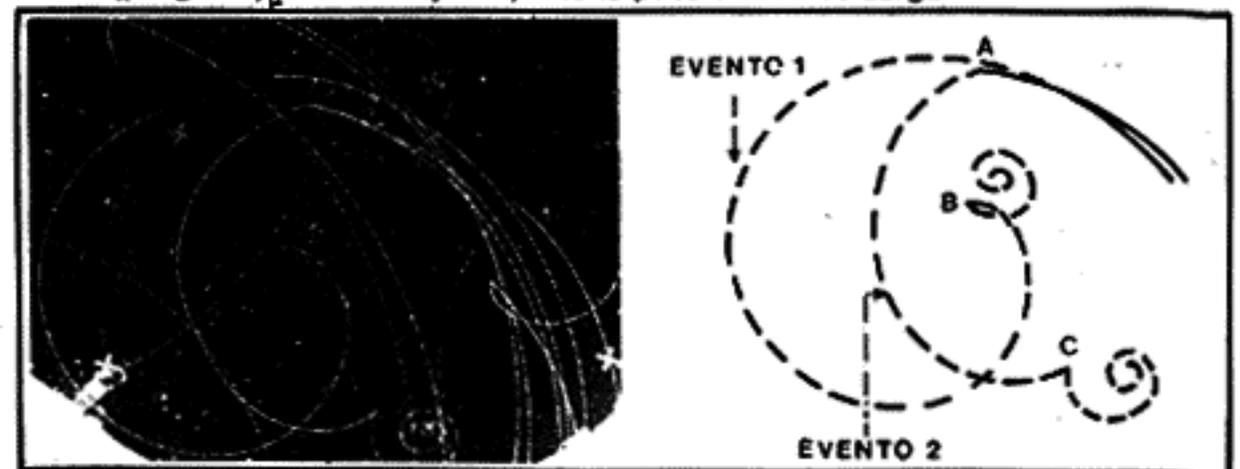
cial electromagnético o cuadripotencial y representa la interacción entre dos partículas cargadas. Es decir, una teoría libre (sin interacción) no puede ser invariante bajo U(1) local, pero con la presencia de una interacción sí puede serlo. Cada vez que dos electrones interactúan —es decir, cuando se establece una fuerza entre ellos— la fase de la función de onda que los describe cambia localmente, y a su vez a cada cambio local de la fase le corresponde una interacción. El cuadripotencial mismo debe transformarse de cierta forma para poder mantener la teoría invariante. Este cambio corresponde precisamente a un cambio de norma.

Pero hay algo más: pedir que el electromagnetismo sea invariante bajo U(1) local no sólo implica la existencia de una interacción sino que la determina exactamente. Si conocemos la simetría, podemos conocer la interacción que corresponde a esta simetría. Esta situación es exactamente la análoga a la del caso del globo: a una simetría dada se le puede asociar a un cierto campo de fuerzas determinado por ella. Es entonces natural aplicar este enfoque para estudiar las otras tres interacciones. Si pu-

diésemos conocer las simetrías de estas interacciones, entonces automáticamente podríamos conocer las interacciones mismas.

Este programa se ha llevado a cabo con éxito parcial. Empieza de hecho con las teorías de C.N. Yang y Robert L. Mills, que trabajaban juntos en el Brookhaven National Laboratory en los E.U. hacia 1954, y R. Shaw, de la Universidad de Cambridge. Actualmente a las teo-

Decaimiento (débil) de mesones  $\kappa^+$ . La fotografía muestra el decaimiento, via interacción débil en la cámara de burbujas del CERN en Suiza. El evento 1 es el decaimiento  $\kappa^+ \rightarrow \mu^+ + \gamma_\mu$ . La línea continua representa la trayectoria de  $\kappa^+$ , y la punteada, la trayectoria del muon  $\mu^+$ . En B el muon queda completamente en reposo y decae como sigue  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}_\mu$ . Sólo es visible la trayectoria del  $e^+$ , la pequeña espiral que se observa después de B. En una cámara de niebla no es posible ver la trayectoria de los neutrinos  $\nu$ , ni la de ninguna partícula neutra. El evento 2 es el decaimiento  $\kappa^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ .  $\pi^+$  llega al reposo en C decayendo como  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \gamma_\mu$ . El no deja trayectoria pues carece de carga.



rias de norma con simetría local se les conoce con el nombre de "teorías de Yang-Mills", en honor a sus dos descubridores.

En 1967 Steven Weinberg, de la Universidad de Harvard, e independientemente en 1968 Abdus Salam del Imperial College de Londres y John C. Ward de la Universidad John Hopkins, proponen un modelo que describe los principales aspectos de las interacciones débiles y que al mismo tiempo incorpora al electromagnetismo. Este trabajo les valió a S. Weinberg y A. Salam el premio Nobel de 1979.

En cierta medida se trata de una teoría de unificación de las interacciones débiles y las electromagnéticas. La simetría usada la denotan los físicos como SU(2) U(1).<sup>6</sup> Esta simetría, o mejor dicho grupo, es en este caso no abeliana, y cuenta con tres parámetros independientes más uno, el asociado al grupo U(1), que es la parte asociada al electromagnetismo.

En la teoría los parámetros del grupo se asocian con la existencia de correspondientes partículas o cuantos de energía. En el caso del electromagnetismo el grupo de norma es U(1), un grupo abeliano con un sólo parámetro, por lo tanto existe una partícula o "cuanto"<sup>6</sup> asociada a ese parámetro. De acuerdo con este enfoque la interacción ocurre cuando las partícu-

5. SU(2): grupo formado por las matrices unitarias 2X2 de traza nula. El símbolo  $\otimes$  significa tensorial.
6. También conocido con el nombre de "Bosón de norma".

las se intercambian un cuanto. En el caso del electromagnetismo dos partículas cargadas interactúan cuando se intercambian un fotón que es el cuanto asociado al electromagnetismo. Además el alcance de la interacción es proporcional al inverso del cuadrado de la masa del cuanto. En el caso del fotón la masa es cero y por lo tanto el electromagnetismo es de alcance infinito. De la misma manera, en el caso gravitacional, que es una interacción de alcance infinito, el cuanto gravitacional o "gravitón" como se le ha llamado, es de masa cero. Análogamente, entre más pesado el cuanto menor es el alcance de la interacción, como es el caso en la interacción débil.

Dentro del modelo de Winberg Salam hay tres nuevos parámetros que implican la existencia de tres partículas asociadas a ellos. Dos de estas partículas ya eran conocidas desde los tiempos de E. Fermi en los años 30. Se trata de  $W^+$  y  $W^-$ , dos de los cuantos (cargados) asociados a las interacciones débiles. Pero la teoría predice la existencia de una nueva partícula, un nuevo cuanto neutro, pesado (puesto que la interacción débil es de muy corto alcance) y de spin cero. El descubrimiento de esta partícula en 1973 en el CERN (Centre Europeen de la Recherche Nucleaire) cerca de Ginebra, en Suiza, representa un gran triunfo de este tipo de modelos.

## ROMPIMIENTO ESPONTANEO DE SIMETRIA.

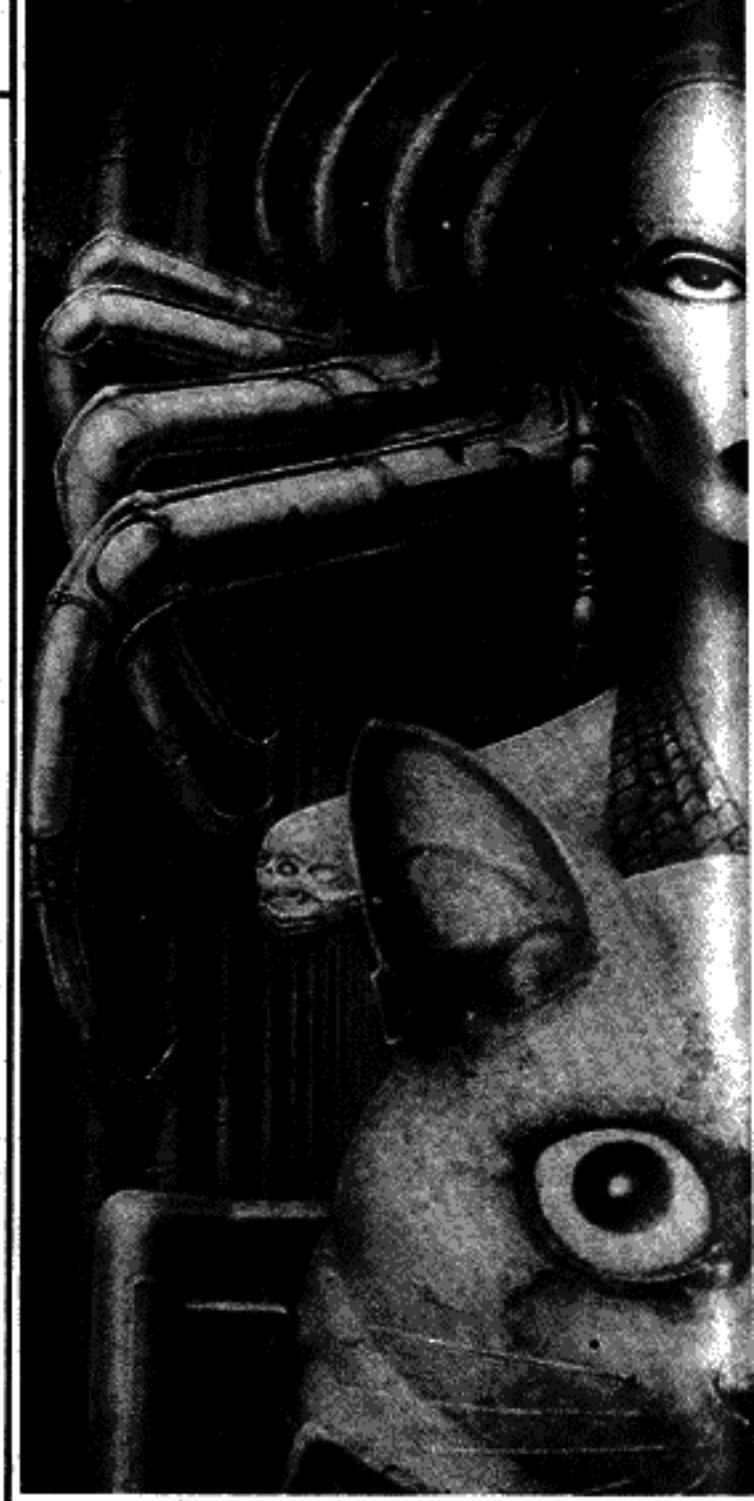
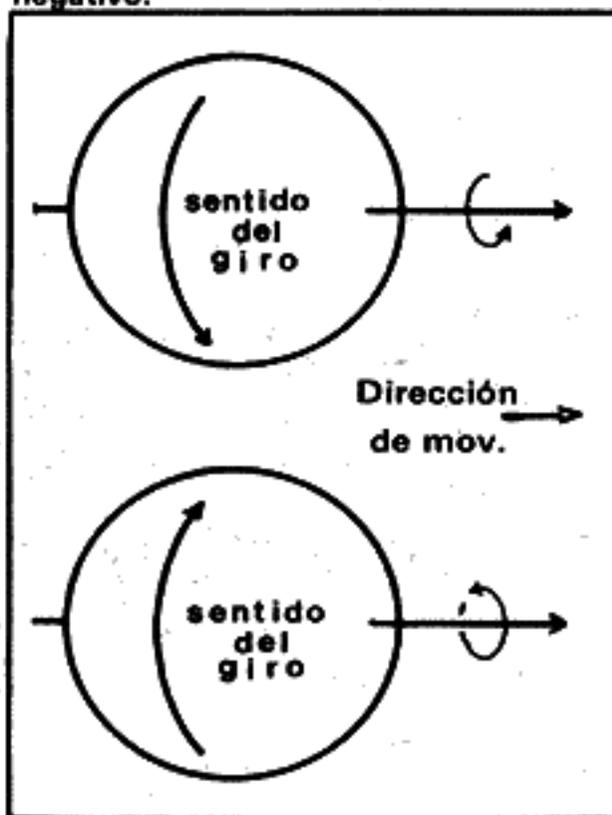
Sin embargo si las teorías de norma de simetría local (abelianas como el electromagnetismo o no abelianas como las débiles) eran conocidas desde 1954, ¿por qué se necesita llegar hasta 1967 para poder proponer un modelo realista? una de las principales razones consisten en que estos modelos sólo son compatibles con interacciones de alcance infinito, es decir con cuantos de masa cero. Pero las interacciones débiles, por ejemplo, son de muy corto alcance y por lo tanto sus cuantos deben tener masa (muy grande de hecho). La presencia de "términos de masa", responsables de las masas de los "cuantos" (bosones de norma), rompe la simetría local y éstos no pueden, consecuentemente, aparecer en la teoría. ¿Cómo se puede entonces conciliar la simetría de la teoría con el hecho de que, en ge-

Las simetrías más familiares son las geométricas, sin embargo, existen algunas que no son de esta naturaleza. Si se pudiera cambiar en el universo la materia por su antimateria, invertir la marcha del tiempo y reflejarlo en un espejo se obtendría el mismo universo que antes.

neral los bosones de norma sean masivos?. La respuesta fue dada hacia el final de la década de los 60's por F. Englert y Robert H. Brout de la Universidad de Bruselas y por Peter Higgs de la Universidad de Edinburgo, con el método conocido actualmente como mecanismo de Higgs. La idea central es análoga a la de estudiar una ecuación diferencial con una cierta simetría y encontrar soluciones de ella que no tengan tal simetría. Para hacer esto se introducen nuevas funciones, llamadas "Campos de Higgs", con la extraña propiedad de que no desaparece en el vacío. Usualmente se piensa en el vacío como ausencia de materia, pero en la física moderna es sólo un estado de la naturaleza, definido como aquel estado que minimiza la energía de todas las partículas. Esto se logra usualmente haciendo desaparecer las partículas. Por ejemplo, un conjunto de electrones tiene su mínima energía cuando no hay electrones. Pero los campos de Higgs representan partículas? to-

7. En física moderna a cada función o más concretamente campo, se le asocia una partícula caracterizada por éste.

Spin. La partícula en la parte superior lleva un spin positivo, la otra un spin negativo.



talmente fuera de serie: hacerlas desaparecer cuesta energía y por tanto no desaparecen en el vacío. Es a través de estos campos de Higgs que pueden redefinir —de una cierta manera— las funciones asociadas a los bosones de norma para que éstos adquieran masa sin romper la simetría de la teoría (los campos de Higgs tampoco rompen la simetría de la teoría). Este mecanismo de Higgs se conoce también con el misterioso nombre de "rompimiento espontáneo de simetría". Es necesario señalar el hecho que al redefinir las funciones asociadas a los bosones de norma se están redefiniendo las soluciones a la teoría, que al adquirir masa pierden de hecho la simetría original, más no ocurre así con la teoría misma.

## INTERACCIONES FUERTES

En la actualidad se conocen dos grandes grupos de partículas. Por un lado se tienen los leptones, que son partículas de spin (giro intrínseco) semientero, sin estructura



símbolo	nombre	carga*	spin
u	arriba	2/3	1/2
d	abajo	-1/3	1/2
s	extraño	-1/3	1/2
c	encanto	2/3	1/2
t	tope	-1/3	1/2
b	fondo	-1/3	1/2

\* en unidades de la carga fundamental e

de spin semi-entero, pero con la diferencia de que son capaces de tener interacciones fuertes. Por alguna razón no entendida completamente hasta ahora, los quarks no pueden estar solos y se juntan de dos formas exclusivamente: un quark con un antiquark formando lo que se conoce con el nombre de mesones (el pion, por ejemplo) o tres quarks formando lo que se conoce con el nombre de bariones (Figura 5)

Aunque originalmente se pensaba que sólo había tres quarks, actualmente se piensa que hay seis: "arriba", "abajo" y "extraño" son los tres primeros y "tope", "fondo" y "encanto" los otros tres. Los nombres pueden parecer un sin sentido, pero universalmente son aceptados y existe desgraciadamente la tendencia principalmente en los Estados Unidos de seguir esta política de asignación de nombres. (cuadro arriba)

Cada tipo de quark se presenta en tres formas diferentes, prácti-

camente indistinguibles. Los físicos dicen que se presentan en tres "colores" diferentes, "azul", "rojo" y "verde". Así es el quark encanto (c), por ejemplo, se presentará como quark encanto rojo, o verde, etc. Como a cada partícula le corresponde su antipartícula a cada quark de cierto color le corresponde su antiquark de anticolor. Así un quark rojo le corresponde un antiquark "antirrojo" que al juntarse produce un sistema de quark-antiquark, como en el caso de los mesones, (denotado  $q\bar{q}$  de color "blanco", ya que la propiedad que los físicos llaman "rojo" queda aniquilada por su anticolor el antirrojo. También los bariones, que son la combinación de tres quarks, son "blancos" ya que son la combinación de tres "colores" necesariamente distintos,<sup>9</sup> es de-

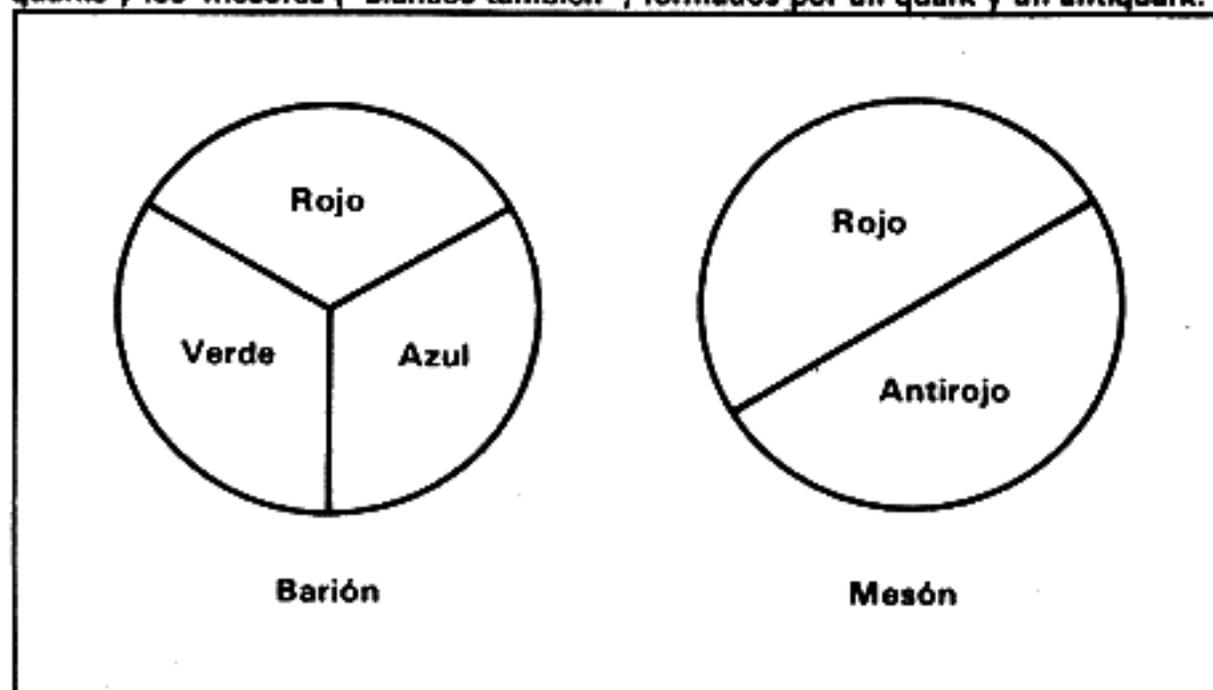
9. Para los que conocen mecánica cuántica, este es un resultado del principio de exclusión de Pauli que no permite que dos fermiones idénticos ocupen el mismo estado y por esto deben poder distinguirse.

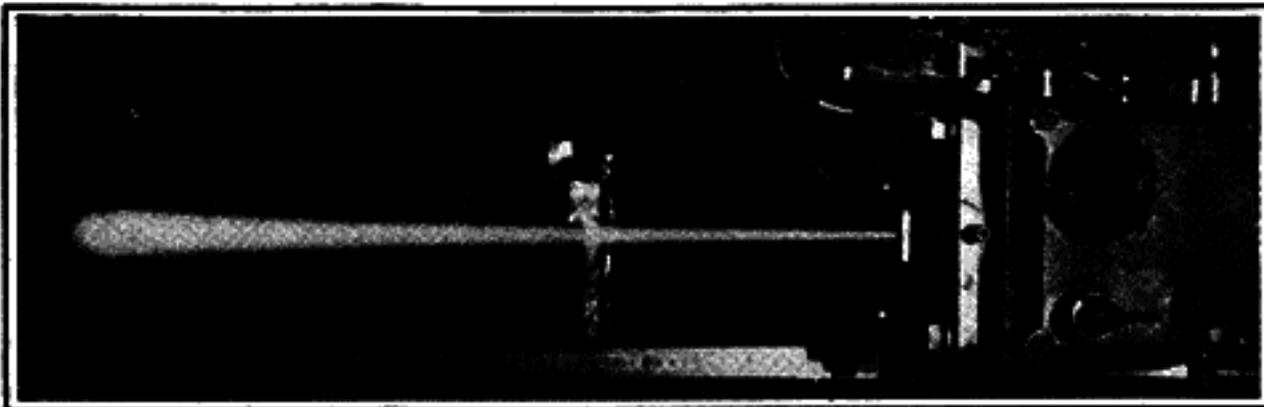
aparente, puntuales y que intervienen en interacciones fuertes, como por ejemplo el electrón, el muón el tau, y sus neutrinos asociados, y por otro lado están los hadrones, que son el resto de las partículas. Estos usualmente más pesados que los leptones, tienen una estructura interna y actualmente se piensa que se pueden describir en términos de partículas hipotéticas llamadas "quarks", propuestas inicialmente por Murray Gell-Mann del California Institute of Technology en 1963 y por las mismas fechas por Yucal Ne'eman de la Universidad de Tel-Aviv y George Zweig de Cal-Tech.<sup>8</sup>

Estos quarks son muy semejantes a los leptones, son puntuales,

8. El nombre de "quark" fue propuesto por Gell-Mann a propósito de una lectura de James Joyce: "Finnegan's Wake" y aunque dentro del contexto del libro no quiere decir gran cosa, en Siliza (Alemania), es un cierto tipo de queso (requesón).

Fig. 5. Los dos tipos de hadrones: los bariones ("blancos") formados por tres quarks y los mesones ("blancos también") formados por un quark y un antiquark.





Haz de deuterones (compuestos de un protón y un neutrón) que emerge de un ciclotrón.

cir, rojo, azul, verde.<sup>10</sup> El blanco en este caso se considera como "ausencia de color" (¿aunque no sería mejor, tal vez, denominarlo negro?) Esta es la razón por la cual a la teoría de las interacciones fuertes se les llama "Cromodinámica Cuántica", o sea el electromagnetismo moderno.

Ahora bien, las interacciones fuertes (que tienen lugar entre hadrones) pueden también ser descritas, aunque parcialmente hasta ahora, por una teoría de norma. En este caso la simetría se denota por  $SU_c(3)$ <sup>11</sup> donde "c" significa color.

Este grupo está caracterizado por ocho parámetros y hay por lo tanto ocho bosones de norma. Podemos comparar con el electromagnetismo, donde sólo hay uno, y comprender la complejidad de las interacciones fuertes y su reticencia a ser entendidas hasta ahora.

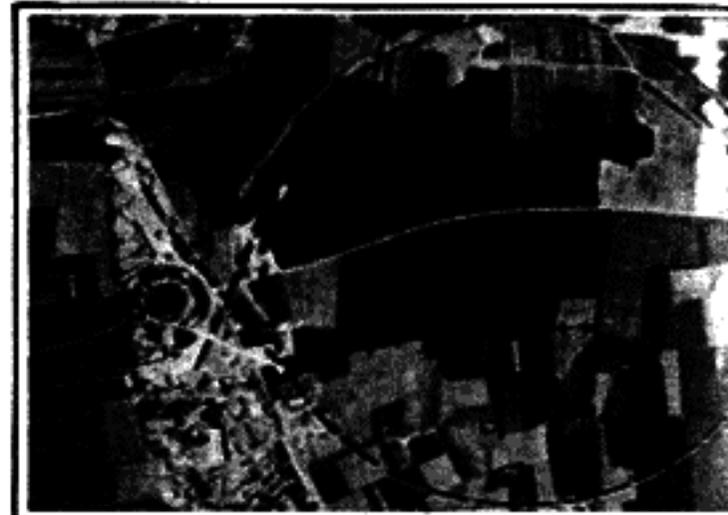
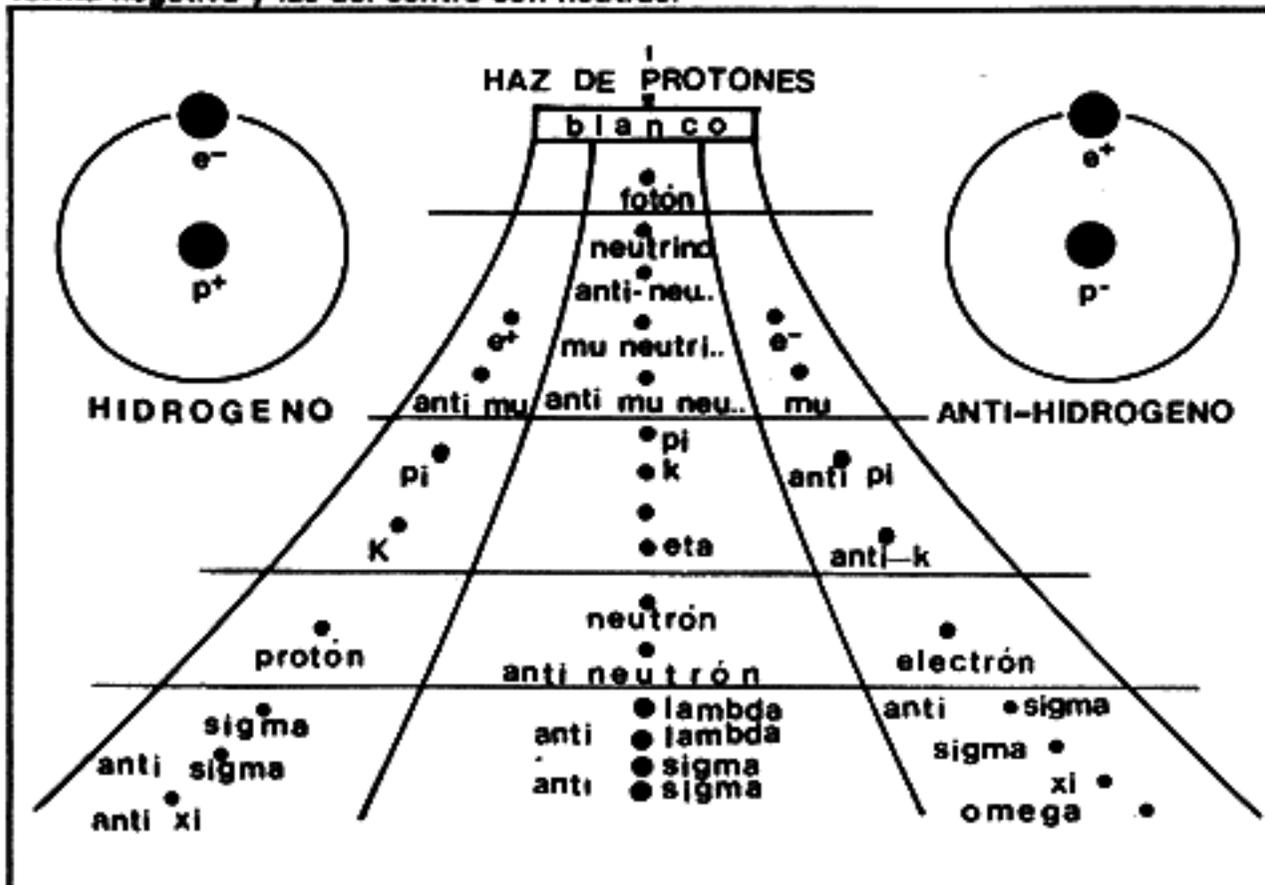
Estos bosones de norma son conocidos con el espantoso nombre de 'gluones' (del inglés "Glue" pegamento, cola, etc.) por la propiedad que tienen las interacciones fuertes de mantener pegados, por intercambio de gluones, a los quarks. Ahora bien, las interacciones fuertes son de muy corto alcance por lo que los gluones deben ser muy pesados, aunque no tanto como para no poder ser observados cosa que no ha sucedido hasta ahora. Además existen razones para pensar que estos gluones deben ser de masa cero. ¿Qué suce-

de entonces?

Hay que observar que el grupo  $SU_c(3)$  es no abeliano y que esto trae como consecuencia que los gluones porten también "color" a diferencia del electromagnetismo, donde el grupo de simetría  $U(1)$  es abeliano y como consecuencia el fotón carece de carga. Esto a su vez implica que cuando dos quarks interaccionan cambian de color. Por ejemplo, si un quark pasa de verde a rojo —en una interacción

11.  $SU(3)$ : matrices unitarias de traza nula  $3 \times 3$ .
10. Cuando los tres colores básicos se mezclan de una cierta forma, por ejemplo en una rueda giratoria, el efecto visual es un color blanco.

Algunas partículas conocidas en un haz que emergen de un acelerador imaginario. Las partículas de la izquierda están cargadas positivamente, las de la derecha en forma negativa y las del centro son neutras.



Vista aérea del CERN cerca de Ginebra. Las instalaciones cuentan con dos laboratorios CERN I y CERN II y emplean un total de 3650 empleados. Un supersincrotrón de cerca de 5 km de diámetro se construye en el CERN II capaz de lograr energías de 400 GeV.

fuerte entre dos quarks— el gluón que interviene en la interacción "lleva" los colores "rojo" y "anti-verde" de manera que este último anula al verde y el rojo "colorea" al quark dejándolo de color rojo. (Figura 6).

Hay evidencias experimentales que señalan que cuando dos quarks están juntos prácticamente interaccionan entre ellos, pero a medida que se alejan, los quarks interaccionan con una nube de sistemas  $q-\bar{q}$  y de pares de gluones que rodean a los quarks. Una cosa similar ocurre en el electromagnetismo, donde alrededor de cada electrón existe una nube de pares electrón-positrón (anti-electrón) y fotones, cuyo efecto es enmascarar la carga del electrón. Pero en el caso de los quarks, si bien los pares  $q-\bar{q}$  enmascaran el "color", los gluones también llevan color (a diferencia de los fotones que no llevan carga) y consecuentemente el efecto de éstos es el de incrementar el color neto de los quarks de manera que a medida que los quarks se alejan la interacción crece más y más —indefinidamente parece ser— por lo que se necesita

una energía infinita para separar dos quarks. Es este mecanismo que los físicos llaman confinamiento, el responsable del comportamiento tan curioso de las interacciones débiles. Así según la teoría, no es posible separar dos partículas que tengan "color" solamente los sistemas "blancos" pueden permanecer aislados, los demás estarán siempre ligados a otros con color. Por esto no se observan los gluones aunque sean



de masa cero, y por esto aparentemente, las interacciones se manifiestan a corta distancia. En realidad se podrían manifestar a distancia infinita, pero se necesitaría una energía infinita para esto. El hecho de no existir hasta ahora una teoría realista de las interacciones fuertes que explique el confinamiento se ha convertido en una de las más grandes dificultades de la teoría de las interacciones fuertes.

### SUPERSIMETRIA.

Las teorías de normas aquí expuestas sufren de varias dificultades intrínsecas. Las constantes físicas por ejemplo, según su valor modifican enormemente una teoría. Las teorías de norma son compatibles con los valores experimentales de las constantes físicas, pero no explican porque éstas toman precisamente esos valores. ¿Por qué la carga del electrón es  $1.602 \times 10^{-19}$  C? ¿Por qué la interacción fuerte es precisamente tan fuerte? ¿Por qué la masa del electrón es  $9.1 \times 10^{-31}$  Kg? ¿Cuántos quarks hay realmente?. Estas preguntas y muchas más no pueden ser resueltas por esquemas de este tipo. Tal vez sea necesario buscar nuevos tipos de simetría que engloben las aquí descritas. Tal vez

sean de tipo local y se puedan poner las cuatro interacciones en una gran simetría que la unifique, formando una sola teoría.

Recientes progresos apuntan un poco en esta dirección. Las nuevas teorías son conocidas con el horrible nombre de supersimetría. Esta nueva simetría permite lo que hasta ahora no era posible: relacionar partículas de spin diferente y tratarlas de igual manera.<sup>12</sup> La importancia de esta teoría radica en el hecho de ofrecer con unos cuantos parámetros, una descripción bastante detallada de cientos de partí-

12. Para aquellos que conozcan la teoría de grupos, consiste en tener bosones y fermiones, dentro de la misma representación irreducible del grupo de supersimetría.

culas, además reconcilia aunque sea parcialmente, la teoría de la gravitación con la teoría de campos cuánticos.

Una de las predicciones más importantes de esta teoría es la inestabilidad del protón. Experimentos muy recientes (Mayo de 1981) parecen confirmar ésta. El protón se desintegraría (en un lapso de tiempo verdaderamente gigantesco) en neutrinos y ciertas partículas llamadas D.

Si este tipo de teorías permite o no una descripción y finalmente una unificación de las cuatro interacciones básicas sólo el tiempo podrá decirlo. Por el momento el estudio y comprensión de estas interacciones representa probablemente el más grande reto de la física moderna. Ⓢ

Fig. 6. Después de una interacción fuerte dos quarks cambiar de color.

