



Rafael NÚÑEZ-LAGO ROGLA es Catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Zaragoza desde 1970. Licenciado y Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid, amplió estudios en el Instituto Tecnológico de California (EEUU), en el CERN (Ginebra) y en el Centro Internacional de Física Teórica (Trieste, Italia). Fue funcionario de la Junta de Energía Nuclear hasta su ingreso en la Universidad. Ha sido Catedrático en las Universidades de Granada y Sevilla. Es autor de numerosos trabajos en el campo de las partículas elementales. En la actualidad es director del Laboratorio de Bajas Actividades de la Comunidad Autónoma de Aragón.

EL MUNDO SUBNUCLEAR

R. NÚÑEZ - LAGOS

INTRODUCCIÓN

El mundo subnuclear estudia los constituyentes fundamentales de la materia, lo que se ha llamado tradicionalmente partículas fundamentales y sus interacciones. Pero esto no significa que nos tengamos que restringir a considerar sólo lo más pequeño, ya que lo más grande también está implicado. La estructura y evolución del universo está regido también por las leyes del mundo subnuclear.

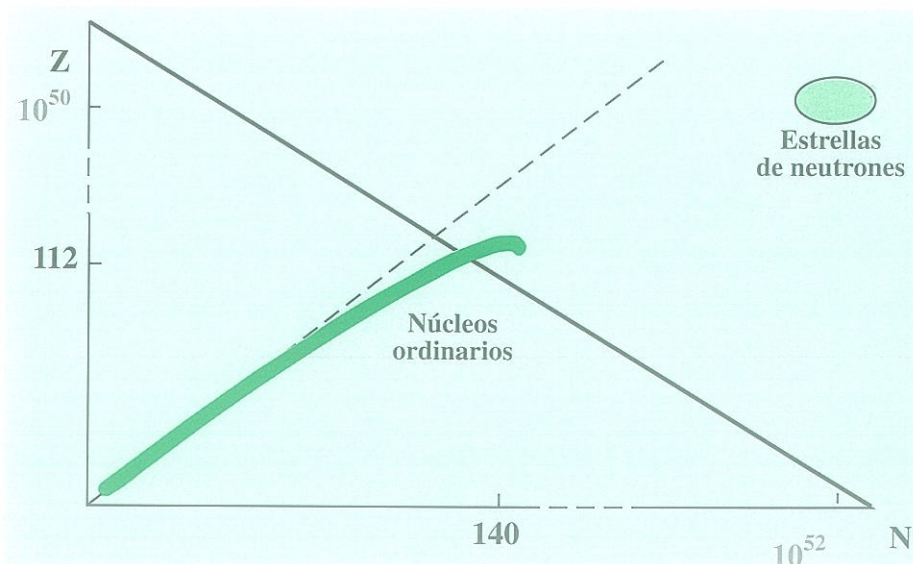
Hemos hablado de partículas fundamentales y no elementales porque el concepto de elementalidad es algo complejo. A medida que el hombre ha sido capaz de preguntar a la naturaleza por los constituyentes más fundamentales de la materia se han ido abriendo nuevas estructuras complejas. Antes que preguntarse cuántas y cuáles son las partículas elementales habría que

formularse algunas preguntas previas: ¿qué es una partícula elemental?, ¿es realmente elemental?, ¿qué significa ser "elemental"?

Átomo se llamó durante siglos a lo "elemental" de que estaba hecha la materia. Sabemos que los átomos tienen una estructura compleja, pero sabemos también que son los constituyentes más simples posibles desde el punto de vista químico. Son los elementos químicos. Las moléculas son los elementos de sustancia, las cantidades más pequeñas posibles de una sustancia. Sin embargo, los millones de diferentes moléculas están contribuidas combinando tan sólo un centenar de átomos.

Cuando nos preguntamos por la estructura del átomo nos encontramos que núcleos y electrones son capaces de explicar toda la estructura atómica. A su vez, con sólo un par de partículas,

FI - Carta de núcleos. Ordenadas número atómico Z (número de protones). Abcisa número de neutrones N .



protones y neutrones podemos dar razón del millar de núcleos que conocemos. No sabemos, sin embargo, tratar bien el problema de los sistemas ligados de protones y neutrones. La FI les muestra una tabla de isótopos, la bien conocida representación N-Z, sólo que reflejando la situación real. Hay sistemas "estables" en la zona baja de N y Z, hasta Z aproximadamente 112 y N=140 que conocemos como núcleos y una zona en N=10⁵² y Z=10⁵⁰ que conocemos como estrellas de neutrones con un tamaño de unos pocos kilómetros de radio. La zona intermedia aparece vacía al menos por ahora.

La elementalidad es, por tanto, un concepto relativo. Por un lado, podríamos referirla a un conjunto de propiedades, la molécula es elemental para la sustancia, átomo para la química, etc. Por otro, podríamos referirla de una forma más profunda a si existe o no una estructura subyacente, a si esos entes que llamamos elementales están a su vez constituidos por otros o no. En ese sentido, la molécula deja de ser elemental en favor de los átomos y éstos en favor de los núcleos y los electrones. En esta conferencia trataré la elementalidad en su acepción estructural.

Volvemos a la pregunta inicial y al tema estricto del título de esta charla: ¿qué hay debajo del núcleo?, ¿hay algo que podamos llamar elemental o al menos constituyente fundamental o básico?, ¿cómo y por qué sabemos que un núcleo no es elemental, que tiene una estructura? Si con protones, neutrones y electrones, tan sólo tres partículas, se puede explicar el núcleo, las reacciones nucleares, y de ahí los átomos y las moléculas, los sólidos y las estrellas y el universo, ¿de dónde vienen y para qué hacen falta más partículas? Trataré de responder a todo ello de forma ordenada.

Para preguntar a la naturaleza hay que interaccionar con ella y para ello lo único de que disponemos es hacer experimentos bombardeando con partículas el objeto a estudiar, partículas que interaccionan con el objeto y de cuyo resultado tratamos de inferir qué es lo que ha ocurrido y qué estructura tenía el objeto estudiado. Partículas e interacciones son los elementos básicos con los que abordar el esquema de la constitución fundamental de la materia. El problema radica en que una estructura compleja desconocida, interaccionando con otra, también desconocida a través de fuerzas tampoco conocidas es un estudio no trivial.

La información que tenemos de un objeto es función de la distancia mínima que somos capaces de discriminar. La solidez y opacidad de una mesa es debida a que mi información procede, por una parte, de la luz con que la ilumino (que tiene una longitud de onda de unos 5.000 Å, o sea, unas 5 milésimas de milímetro), y, por otra, de la capacidad de discriminación del detector y la

capacidad de análisis de la información. El ojo y el cerebro humanos, en este caso, no son capaces de llegar a tanto y no vemos detalles inferiores a una décima de mm. Provistos de microscopios adecuados, la limitación de la información procede de la fuente de luz.

La longitud de onda asociada a una partícula cuántica fue postulada por Luis de Broglie en 1924 y es $\lambda = h/p$. Si utilizamos un alto momento lineal, o lo que es equivalente una gran energía, podremos obtener pequeñas longitudes de onda. Este es el fundamento, por ejemplo, del microscopio electrónico. Pero para el estudio subnuclear hay que tener en cuenta que la longitud de onda asociada a electrones de 100 GeV es del orden de los 10e-15 cm. De ahí la necesidad de aceleradores de partículas de muy alta energía. Lo que ha ocurrido es que la respuesta de la naturaleza al aumentar la energía de los proyectiles que se han utilizado para preguntarle ha sido aumentar el número de partículas elementales.

Hoy día se ha logrado obtener un esquema aceptable del mundo subnuclear, conocido como modelo estándar que es capaz de explicar razonablemente la mayoría de los fenómenos y propiedades conocidas desde los procesos a las más altas energías conseguidas hoy día, como colisiones electrón-positrón a 400 GeV en el centro de masas, como se efectúa en el LEP del CERN en Ginebra o colisiones con protones de 2.000 GeV del Tevatrón de FERMILAB en Estados Unidos, hasta la evolución del universo desde tiempos inferiores a 10⁻⁴³ s. a nuestros días pasando por la evolución estelar.

EL MODELO ESTÁNDAR

En la actualidad (en el sentido del estado de la evolución del universo), el mundo elemental se nos presenta como constituido por tres familias de partículas que interaccionan a través de cuatro tipos de fuerzas básicas.

Una partícula está caracterizada por una serie de números cuánticos, observables medibles experimentalmente que la identifican por completo, espín, masa, carga, eléctrica, números bariónico, leptónico, color, sabor, isospín, etc.

De las tres familias sólo una sería suficiente para dar razón del mundo que nos rodea; las otras dos, copias de la primera, pero con partículas más masivas, jugaron un papel importante en el universo primitivo. Las cuatro fuerzas sí son necesarias.

Cada familia está constituida por dos quarks y dos leptones.

Las cuatro interacciones se conocen con los nombres de fuertes, electromagnéticas, débiles y gravitatorias.

La figura II resume los constituyentes esenciales del modelo estándar.

LEPTONES

e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

QUARKS

u	c	t	u	c	t	u	c	t
d	s	b	d	s	b	d	s	b
(azules)			(rojos)			(verdes)		

BOSONES GAUGE

γ	fotón/interacción electromagnética
W^+W^-	interacción débil (cargada)
Z^0	interacción débil (neutra)
g	gluón / interacción fuerte

FALTA por descubrir h HIGGS

F II - Partículas fundamentales. Modelo estándar

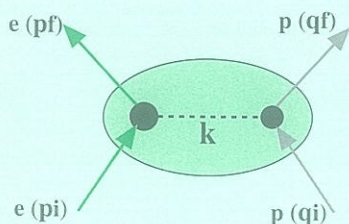
HISTORIA

Permítanme introducirles al complejo mundo subnuclear actual del mismo modo que se ha ido introduciendo en la física. El mundo de las partículas elementales comenzó en los años 50 cuando se dispuso de aceleradores de protones y electrones de una energía razonable con los que abordar la estructura nuclear, a la par que se afinaban las herramientas teóricas necesarias para el cálculo (teoría cuántica relativista de campos, electrodinámica cuántica, etc.).

Un avance importante fue el concepto de interacción fundamental entre partículas como el intercambio virtual de otra partícula. En la descripción teórica solamente existen partículas, el concepto de campo queda cuantificado y lo que interviene en un proceso elemental es un intercambio virtual de partículas.

Es cómodo y fácil describir un átomo con un potencial tipo coulombiano, pero ya Einstein introdujo, en 1905, el concepto de fotón como la unidad subyacente en un campo electromagnético. En la figura III simbolizamos el caso conocido de la interacción electromagnética.

La capacidad de emitir y absorber fotones, tanto real como virtualmente (un proceso entraña el otro) es lo que llamamos carga eléctrica. Una partícula cargada podríamos imaginarla como una parte central, masiva que está constantemente emitiendo y absorbiendo fotones, está rodeada de una nube (virtual) de fotones. El proceso de interacción electromagnética



PROCESO DE INTERACCIÓN

$$e(p_i) + p(q_i) \rightarrow e(p_f) + p(q_f)$$

F III - Interacción electromagnética entre dos partículas cargadas intercambiando un fotón virtual.

no es más que el intercambio de uno o varios de esos fotones con otra partícula. En lugar de reabsorberlos la partícula que los emitió, los absorbe la otra. El proceso entraña el intercambio de una serie de magnitudes: energía, momento, momento angular, etc. Las partículas cargadas son, pues, las que "sienten" la interacción electromagnética, las neutras no. Notemos que el fotón no lleva carga eléctrica, es decir, no interactúa electromagnéticamente consigo mismo, un fotón no emite y absorbe fotones.

El concepto de carga está unido, por un lado, a una interacción; por otro, lo está a una magnitud medible e invariante en el tiempo, a una constante del movimiento en mecánica tanto clásica como cuántica. A su vez sabemos que una constante del movimiento responde a una simetría del sistema, o si se prefiere, a una invariancia del lagrangiano que describe el sistema. En el caso de la interacción electromagnética, la invariancia subyacente es un cambio gauge (transformación de contraste en nomenclatura propuesta por Julio Palacios y no utilizada por nadie en español). Más adelante veremos que la invariancia gauge juega hoy día un papel fundamental en el esquema teórico.

Recordemos que un cambio gauge implica que bajo la transformación de los campos:

$\psi \rightarrow \psi' = e^{i\alpha(x)}\psi$ para electrones y/o protones (partículas de espín 1/2).

$A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu + \nabla_\mu \alpha(x)$ para los fotones (campo electromagnético).

El Lagrangiano total del sistema es invariante.

Para electrones la densidad lagrangiana libre es:

$$L_0(x) = 1/2 \bar{\psi} (i\delta_\mu + m) \psi$$

y la exigencia de invariancia gauge la transforma en otra en interacción con

un campo vectorial de masa nula A_μ que podemos identificar con el campo electromagnético.

$$L(x) = 1/2 \bar{\psi} (i\delta_\mu + m) \psi + 1/4 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + e \bar{\psi} \gamma_\mu \psi A^\mu$$

$$F_{\mu\nu} = (\delta_\mu A_\nu - \delta_\nu A_\mu)$$

Es interesante hacer hincapié en que la invariancia gauge para una teoría del electrón libre implica la existencia de un campo vectorial de masa nula con el que interactúa. Si no se hubiese descubierto el campo electromagnético antes, la invariancia gauge del electrón (o de otro fermión cargado) lo habría puesto de manifiesto. Este proceso es el que hoy día ha sucedido con las interacciones débiles y se ha podido detectar el bosón vectorial neutro Z^0 y los bosones cargados W^+ y W^- como responsables mediadores de los procesos. La invariancia gauge es un ingrediente esencial en toda teoría de interacciones fundamentales. El fotón es una partícula sin masa de espín 1 descrita por un campo gauge vectorial de masa nula.

Tenemos, pues, que distinguir entre partículas constituyentes fundamentales de la materia y partículas encargadas de mediar una interacción fundamental. Las partículas asociadas con la constitución de la materia tienen todas una propiedad en común, son de espín semientero, las fundamentales todas de espín 1/2. Las que median las interacciones, fotón incluido, son de espín entero. El espín y no la masa es la magnitud que define el carácter de materia, de impenetrabilidad y, por tanto, el comportamiento colectivo. Impenetrabilidad y conservación serían los conceptos ordinarios asociados con espines semienteros, no puede haber dos partículas en el mismo estado (en el mismo sitio) (comportamiento colectivo estadístico de Fermi-Dirac) y su número se conserva en los procesos de interacción. Características asociadas comúnmente con la radiación, intensidad variable, tantas partículas como se quiera en el mismo estado, no conservación de su número, es lo asociado con espines enteros (estadística de Bose-Einstein). La masa no juega papel alguno asociada a estos comportamientos y hoy día se conocen partículas con y sin masa de espín semientero y de espín entero. (Por ejemplo: espín 1/2 con masa, electrón y protón, sin masa, neutrino. Espín entero con masa, pión, sin masa el fotón.)

¿Cuántas partículas y cuántas interacciones fundamentales hay o son necesarias para explicar el mundo físico que nos rodea?

Por lo que respecta a las interacciones cuatro fueron casi desde un principio las necesarias para un esquema coherente. Dos existentes en el mundo clásico que nos rodea: las electromagnéticas y las gravitatorias, y dos han surgido del mundo nuclear: las

fuertes, responsables en origen de la cohesión de los núcleos (no así hoy día), y las débiles, responsables de la mayoría de los procesos de desintegración, en particular de la desintegración beta de los núcleos. Ambas deben su nombre a su intensidad en comparación con la electromagnética. La interacción gravitatoria es tan débil en el mundo subnuclear que no juega por ahora papel alguno y trataremos en adelante sólo con las tres interacciones restantes.

QUE PASÓ EN LOS AÑOS 40 Y 50

Descubierto el neutrón se pudo tener un esquema coherente del mundo con núcleos y electrones para explicar el átomo y protones y neutrones para explicar el núcleo. La ligazón electromagnética y el fotón eran bien conocidos y explicaban la estructura atómica. La ligazón fuerte entre nucleones supuso la hipótesis del pión, partícula con masa (para que el alcance de la interacción fuese corto), de espín cero, descrita clásicamente por un potencial tipo Yukawa.

$$V(r) = g e^{-mr}/r$$

donde m es la masa del pión y g la constante de acoplamiento.

El pión se buscó como resultado de las interacciones de protones con materia (se utilizaron globos para aprovechar los rayos cósmicos primarios con la alta atmósfera, pues no había aceleradores, la reacción prevista era $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$). El resultado condujo al descubrimiento de otra partícula: el muón, electrón pesado que nadie había previsto ni esperado, ni servía para explicar nada salvo que los piones se desintegran en muones $\pi \rightarrow \mu + \nu$ con un período $T_{1/2} = 2,60 \times 10^{-6}$ s. Si no subimos lo suficiente en la alta atmósfera vemos tan sólo los productos de desintegración del pión. (Que, por cierto, llegan hasta la superficie terrestre, a pesar de tener un período $T_{1/2} = 2,197 \times 10^{-6}$ s gracias al alargamiento del tiempo relativista, fenómeno explicado por Duperier. El muón se desintegra en un electrón y dos neutrinos $\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$).

Descubiertos posteriormente los piones, el esquema se cerraba. En rigor, en aquel tiempo sobraba el muón y faltaba el neutrino para que todo encajase. Este último fue propuesto por Pauli, recibiendo su nombre como despreciativo de neutrón al ser una partícula neutra de espín 1/2 y sin masa.

El siguiente gran paso fue dado por Heisenberg al introducir el concepto de isospín, lo que nos permite poder hablar de pión y de nucleón. Protón y neutrón son dos aspectos de una misma partícula. Su diferencia reside en la dirección en que "apunta" el isospín $\vec{\sigma}$, en otras palabras, en el valor de la

tercera componente del isospín I_3 . En la figura IV podemos ver las asignaciones de isospín para los nucleones y piones. El isospín es una nueva simetría aproximada en las interacciones fuertes. Existe una relación entre la carga eléctrica Q , la tercera componente del isospín I_3 y el número de nucleones (número bariónico) B , que es:

$$Q = I_3 + B/2$$

Partícula	Carga eléctrica Q	1/2 Núm. bariónico $B/2$	Isospín I	3.a Comp. Isospín I_3
p	+1	1/2	1/2	+1/2
n	0	1/2	1/2	-1/2
π^+	+1	0	1	+1
π^0	0	0	1	0
π^-	-1	0	1	-1

F IV - Piones y nucleones, espín isotópico y números cuánticos relacionados.

Con los aceleradores se pudo hacer experimentos en el laboratorio. Se produjeron piones y, con ellos, más partículas inesperadas. Por una parte, se generaron asociaciones entre piones y nucleones (de espín 1/2 y 3/2, 1, 2), que se llamaron al principio resonancias y que en los años 60 se descubrió que se trataba de partículas que se desintegran fuertemente y que, por tanto, viven tan sólo unos 10^{-23} s., no dejando traza alguna en los detectores. Tan sólo se detectan sus productos de desintegración. (Una vida media, por corta que sea, al igual que una masa nula, no es un factor determinante para poder definir una partícula elemental.

El gran descubrimiento de los finales de los años 50 fueron las partículas extrañas, llamadas así por su extraño

comportamiento. Se creaban abundantemente (lo que indicaba que el proceso era debido a una interacción fuerte) siempre por parejas (lo que recibió el nombre de producción asociada) y vivían bastante tiempo, es decir, se desintegraban mediante una interacción débil.

La figura V muestra algunas resonancias y partículas extrañas.

La introducción de un nuevo número cuántico, la extrañeza, que se conserva en los procesos fuertes permitió comenzar a entender este nuevo mundo. La extrañeza se conserva en los procesos fuertes de creación de partículas; así, por ejemplo, en el proceso de creación de las partículas Σ y K^+ .



la extrañeza del primer miembro es cero y la del segundo lo es también, pues las extrañezas son, respectivamente, $(-1) + (+1)$. En cambio, la reacción que produce sus compañeras de carga Σ^+ y K^- .

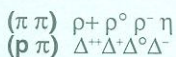
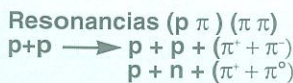


no es posible, pues ambas partículas tienen extrañeza -1 y el total es -2 en vez de cero. Las partículas extrañas de espín 1/2 (Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , Λ , Ξ^0 , Ξ^-) llamadas también hiperones) podían sustituir a los nucleones en los núcleos formándose núcleos extraños, si bien de vida corta. Son como nucleones extraños. Las partículas extrañas condujeron, por tanto, a la introducción de un nuevo cuántico, la extrañeza, una carga generalizada que se conserva en una interacción fuerte, pero no en los procesos débiles.

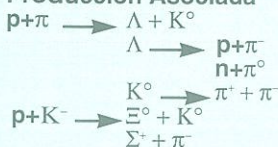
La relación entre magnitudes conservadas se amplía con la extrañeza en $Q = I_3 + B/2 + S/2$ a la cantidad $B + S$ se le llamó hipercarga y se denotó por Y

$$Y = B + S \quad Q = I_3 + Y/2$$

F V - Algunas resonancias y partículas extrañas.



Partículas Extrañas Producción Asociada



Bariones Λ Σ^+ Σ^- Σ^0 Ξ^- Ξ^0

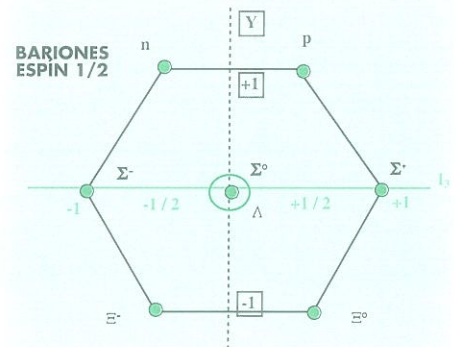
Mesones K^0 K^+ K^- K^0

EXTRAÑEZA +1 -1 -2

electrón, el muón y el neutrino, y desde el año 64 dos neutrinos, uno asociado al electrón y otro asociado al muón. Total 4 leptones (hoy día hay 6) y sus correspondientes antipartículas.

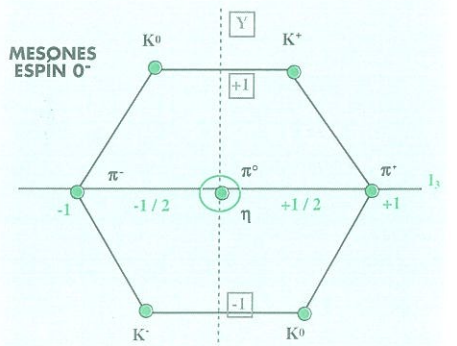
Los hadrones, que es con los que trata el esquema de Gell-Mann, nombre genérico que agrupa a las partículas que "sienten" la interacción fuerte (que no "sienten" los leptones) y que engloba a los bariones (del griego βαρος pesado), partículas de espín semientero 1/2 y 3/2, que son todos más pesados que el protón, y los mesones, partículas de espín entero 0 y 1 con masas intermedias entre los leptones y el protón. Todas sienten la interacción fuerte, la electromagnética y la débil.

El esquema de Gell-Mann sirvió para poner orden en los hadrones, le llamó "The eightfold way", pues descubrió que los hadrones con igual espín se agrupan en octetes, y si describimos cada hadrón por su isospín y su extrañeza, nos encontramos con el siguiente esquema:



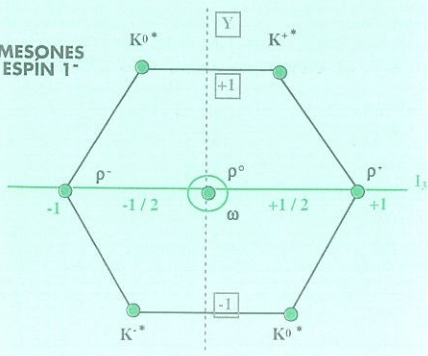
F VI - Los bariones de espín 1/2 clasificados en un octeto de $SU(3)$.

F VII - Los mesones de espín 0 clasificados en un octeto de $SU(3)$.



que responde a la representación regular de dimensión 8 de lo que matemáticamente se conoce como grupo $SU(3)$, generalización inmediata dentro de los grupos de Lie del $SU(2)$ que

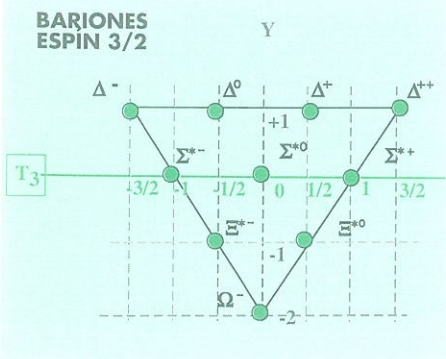
MESONES ESPÍN 1-



F VIII - Los mesones de espín 1 clasificados en un octeto de SU(3).

describe el espín y el isospín. De hecho, el grupo SU(3) contiene al SU(2) de isospín y al U(1) de la extrañeza. No todo eran octetos, los bariones de espín 3/2 se agrupan en la representación de dimensión 10. Cuyo esquema es:

BARIONES ESPÍN 3/2



F IX - Los bariones de espín 3/2 clasificados según la representación de dimensión 10 de SU(3).

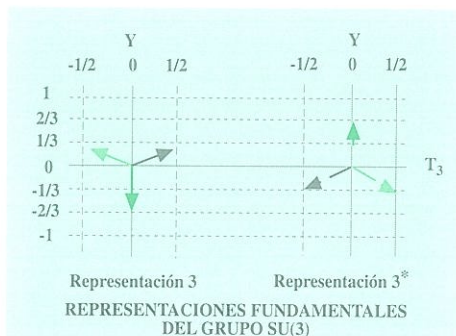
En 1963 se descubrió la partícula Ω que ocupa el vértice inferior y que era la única que faltaba. ¡Se trata de una partícula con extrañeza -3!

El éxito del esquema de clasificación de los hadrones condujo a estudiar a fondo el grupo SU(3), puesto que algunas de sus representaciones eran utilizadas por la naturaleza. Los mesones sólo estaban en la 8 y la 1 y los bariones en la 8 y la 10. Fue también Gell-Mann quien se atrevió a dar el paso siguiente. Todas las representaciones del grupo SU(3) se pueden construir a partir de la multiplicación de las dos representaciones fundamentales del grupo de dimensión 3, llamadas 3 y 3^* , cuya forma está dada por el esquema de la figura X.

La representación 8 puede surgir de diferentes productos, pero lo más simple es:

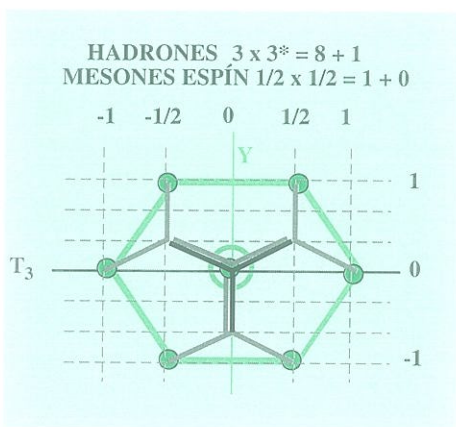
$$3 \times 3^* = 8 + 1$$

$$3 \times 3 \times 3 = 10 + 8 + 8 + 1$$



F X - Representaciones fundamentales 3 y 3^* del grupo SU(3).

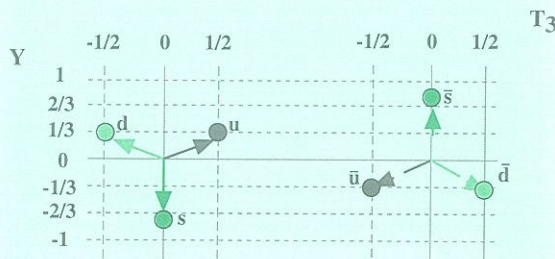
F XI - La representación 8 como producto de las representaciones 3 y 3^* .



Gráficamente el producto de representaciones se hace fácilmente superponiendo en los extremos de una representación el centro de la otra. En la figura X se ve el producto $3 \times 3^* = 8 + 1$.

QUARKS

ANTIQUARKS



Part	Espín	T_3	Y	S	Q	B
u	1/2	1/2	1/3	0	2/3	1/3
d	1/2	-1/2	1/3	0	-1/3	1/3
s	1/2	0	-2/3	-1	-1/3	1/3
$\bar{u}$	1/2	-1/2	-1/3	0	-2/3	-1/3
$\bar{d}$	1/2	1/2	-1/3	0	1/3	-1/3
$\bar{s}$	1/2	0	2/3	1	1/3	-1/3

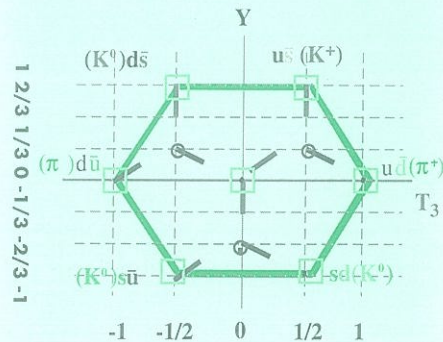
Gell-Mann propuso que las partículas asociadas con la representación 3 eran los constituyentes fundamentales de los hadrones, junto con sus antipartículas que corresponden a la representación 3^* . Les dio el nombre de quarks que procede de una novela de James Joyce que estaba leyendo en aquel momento. Los tres quarks son conocidos hoy día como u (up), d (down) y s (strange).

Los mesones (Figura XIII) estarían hechos de una combinación de un quark y un antiquark y los bariones de tres quarks.

La composición sería:

F XIII

HADRONES $3 \times \bar{3} = 8 + 1$
MESONES ESPÍN 1/2 x 1/2 = 1 + 0



La composición de los bariones sería la de la Figura XIV.

La explicación de porqué sólo hay mesones en las representaciones 8 y 1 y no en la 10 y los bariones en la 8 y la 10 estaba clara. Los espines de los mesones 0 y 1 también quedaban explicados al ser las dos combinaciones posibles de dos espines 1/2; lo mismo sucedía con los bariones, al combinar 3 espines 1/2 se pueden obtener 1/2 o 3/2. Pero los problemas que plantearon los quarks fueron enormes.

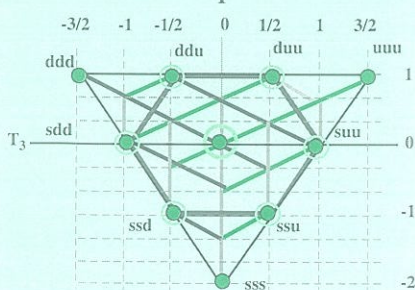
Por una parte, sus números cuánticos son fraccionarios, en particular la carga eléctrica y el número bariónico fraccionarios no eran fáciles de admitir. Por otra parte, todos los intentos de encontrar los quarks libres han fracasado. Finalmente se planteaba un problema serio con la conexión entre el espín y la estadística, que es uno de los pilares esenciales de la física cuántica. Si observamos la composición de la partícula Δ^{++} , que es uuu y de espín 3/2, resulta una combinación totalmente simétrica para su función de ondas, mientras que las partículas de espín semientero deben describirse por funciones de onda antisimétricas. Lo mismo sucede con todos los vértices del triángulo de la

F XIV

HADRONES $3 \times 3 \times 3 = 10 + 8$

Bariones ESPÍN $1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 3/2 + 1/2$

Y



representación 10. La solución a ambos problemas es común y ha supuesto el descubrimiento de un nuevo número cuántico, el color, y de las interacciones fuertes.

La única solución lógica al problema de la estadística es dar un nuevo grado de libertad, el color, que permita antisimetrizar la función de ondas. Como hay tres quarks hacen falta tres colores. Hay, pues, quarks de tres colores, por ejemplo, azul, verde y rojo. La partícula Δ^{++} estaría compuesta por la combinación antisimétrica de colores

$$F = avr - var - rva - arv + rav + vra$$

(r = rojo, v = verde, a = azul)

al carácter u, d y s se le ha llamado sabor. Sabor u, sabor d, sabor extraño.

La ligazón entre los quarks es la verdadera interacción fuerte y es francamente rara. Goza de la libertad asintótica, que consiste en lo siguiente: los quarks dentro de un hadrón son partículas libres. La fuerza que los une aumenta con la distancia, de forma que al separar un quark de un hadrón la energía en juego llega a ser tal que se materializa en la creación de una pareja quark antiquark. Por ejemplo, si un quark u de un protón recibe una gran cantidad de energía, por ejemplo, debido a la interacción de un fotón, se produce entre el quark que se aleja y el resto una pareja uu, dd o ss, y el resultado neto sería:

$$\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$$

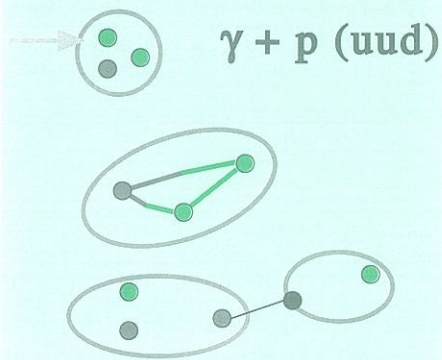
o en quarks

$$\gamma + (uud) \rightarrow (udd) + (ud)$$

Gráficamente podríamos describirlo como vemos en la figura XV.

Las partículas responsables de la ligazón entre los quarks reciben el

F XV



nombre de gluones (del inglés glue, cola). Son partículas sin masa, de espín 1 (análogas al fotón), pero que transportan la carga fuerte, es decir, llevan color, puesto que conectan quarks de distintos colores. Hay 8 gluones distintos. A diferencia del fotón (que no tiene carga eléctrica y no puede emitir y absorber fotones), un gluón puede emitir y absorber gluones, lo que introduce en la teoría términos no lineales y hace que las interacciones fuertes sean mucho más complicadas que las electromagnéticas. De hecho, todavía no está formulada por completo la teoría de las interacciones fuertes.

Las fuerzas nucleares son, por tanto, interacciones no fundamentales, al igual que las de Van der Waals en las moléculas. Son un reflejo y una mezcla de otras interacciones. Esto explica también la complicación de estas fuerzas que ligan los nucleones.

La interacción electromagnética a muy alta energía y la interacción con neutrinos ha probado que los quarks, al igual que los leptones, son partículas puntuales, de espín 1/2, con masa y con carga eléctrica entera para los leptones y fraccionaria para los quarks.

¿Cuántos quarks hay? o, mejor enunciado, ¿cuántos sabores distintos de quarks existen?

La creencia de que a mayor energía más partículas se producen tiene que tener un límite porque el número de partículas elementales sí jugó un papel importante en los primeros momentos del universo. El equilibrio entre radiación y parejas de materia-antimateria dura un tiempo que es función del número de entes elementales. La repercusión en la creación de materia y la distribución actual de la misma, así como de las abundancias de helio y deuterio primordiales, requiere la existencia de más de tres quarks hasta un máximo de seis.

Por otra parte, el esquema teórico impone ciertas exigencias. Para que

una teoría permita efectuar cálculos de procesos (secciones eficaces) sin que aparezcan infinitos, o en palabras más precisas, que la teoría sea renormalizable, debe ser invariante bajo un cambio gauge y eso a su vez obliga a que las partículas que median en la interacción sean de masa nula. Para fotones y gluones no habría problemas, pero si lo hay para las interacciones débiles cuyo alcance es prácticamente cero, lo que implica el intercambio de una partícula muy masiva. La solución al problema ha requerido años de trabajo duro y difícil. Se basa en la rotura espontánea de la simetría del vacío y la invariancia gauge, cuya combinación permite generar masas para los campos gauge de masa nula exigidos por la invariancia gauge, pero sin romper la renormalizabilidad de la teoría. El precio que hay que pagar, sin embargo, es la mezcla de las interacciones electromagnéticas y las débiles. Las cuatro partículas sin masa iniciales W^1 , W^2 , W^3 y B se transforman en tres partículas masivas W^+ , W^- y Z^0 , y una sin masa, el fotón A. Partículas todas ellas detectadas hoy día.

El esquema de las partículas elementales lo constituye el modelo estándar. Por ahora no se han encontrado fenómenos que requieran modificarlo al contrario parece que se afirma cada vez con mayor fuerza, a pesar de sus complicaciones teóricas. El esquema es el que hemos expuesto en la figura II.

El modelo predice que las fuerzas débiles y las electromagnéticas resultan ser una sola electrodébil a energías mayores de 100 GeV. Tal energía corresponde a temperaturas del universo que sólo tuvo unos 10^{-10} s después del big-bang.

La creencia general de los teóricos es que las interacciones fuertes se unifiquen con la electrodébil a unos 10^{15} GeV, según ciertas teorías de gran unificación (GUT) y a 10^{19} GeV se unan también con las interacciones gravitatorias (originándose una teoría de todo, Theory of Everything, TOE).

El acelerador más potente es el Tevatrón de Fermilab, que tiene 2.000 GeV y 4 km de circunferencia; para comprobar una GUT se necesitaría un acelerador que alcanzaría las estrellas más cercanas y para una TOE se llegaría al centro galáctico. Es decir, está fuera de la tecnología previsible. La única situación en la que se puede probar es en el origen del universo a 10^{-35} s. y a 10^{-43} s., respectivamente. El estudio de su evolución posterior es posible que pueda extenderse con detalle hasta hoy día y queden todavía trazas que nos permitan comprobar la veracidad de los distintos modelos teóricos.