

EL PROTON Y EL NEUTRON DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LAS INTERACCIONES FUNDAMENTALES

por *Huner Fanchiotti*

La comprensión de la estructura de la materia y las leyes que la gobiernan ha sido un objetivo primordial del hombre desde tiempos remotos. El punto de vista antiguo, tanto como el moderno se basa en un principio fundamental, la existencia de constituyentes elementales.

La última centuria está marcada por cambios fundamentales en nuestro entendimiento de la noción de espacio y tiempo (la teoría de la relatividad), la aparición de la mecánica cuántica, su versión relativista, la estructura atómica y nuclear y los usos prácticos de estos conocimientos.

Por otra parte, la creación de nuevas tecnologías y el avance de la ingeniería en relación con el desarrollo de investigaciones básicas, condujeron a un nuevo nivel en la comprensión de los constituyentes elementales de la materia. Una nueva forma de hacer la física de altas energías ha emergido, se han desarrollado grandes aceleradores de partículas, que requieren de enormes instalaciones, sofisticada electrónica y computadoras de gran velocidad, que han tomado el lugar del observador humano. Estos parecen ser los nuevos templos de este siglo y los por venir, que conforman los caminos necesarios a seguir en la búsqueda de las fuerzas básicas que controlan los comportamientos de la materia a distancias infinitamente pequeñas comparadas con las escalas en que se desarrollan los fenómenos habituales de los seres humanos.

Finalmente, un entendimiento más acabado de esas fuerzas a las actuales energías disponibles en los laboratorios y los trabajos teóricos que se realizan, agregarán otros

hitos hacia la comprensión del origen y evolución del Universo. Veremos cómo se edificaron, a grandes rasgos, los conceptos y experimentos que han llevado a la interpretación de los constituyentes básicos del núcleo atómico, el protón y el neutrón y demás partículas que interactúan fuertemente en la materia.

En realidad, la historia del microcosmos comienza en el siglo pasado con otra fuerza básica de la naturaleza, la interacción electromagnética, que se pone de manifiesto cuando los cuerpos adquieren un estado de carga eléctrica estática o en movimiento.

Esto da lugar a lo que se denomina fenómenos eléctricos y magnéticos, cuya descripción queda enmarcada en lo que hoy conocemos como las ecuaciones de Maxwell (1862). Estas ecuaciones dan el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos en conexión con sus fuentes, las cargas eléctricas y las densidades de corriente. La propagación de la luz se entiende como un fenómeno electromagnético y la óptica pasa a ser un capítulo del electromagnetismo.

Hacia 1897, J.J. Thomson determina en forma experimental la relación e/m existente entre la carga y la masa de los rayos catódicos. A las partículas que los formaban las denominó electrones. De esta manera se determinó por primera vez en la historia del hombre lo que hoy se conoce como la partícula más elemental, el electrón. En ella es donde reside el cuanto de carga eléctrica. Su grado de elementalidad se verifica hasta distancias menores de 10^{-18} m, por lo que puede ser considerada como una partícula puntual hasta esas dimensiones.

En 1910, con el propósito de desentrañar la estructura atómica, E. Rutherford observó como eran desviadas las partículas (alfa)

Conferencia pronunciada durante su incorporación como Académico Titular, el día 3 de julio de 1992.

al atravesar láminas metálicas delgadas y concluyó de sus experimentos que la carga positiva de los átomos se encontraba en un volumen muy pequeño (10^{-14} m) que denominó núcleo. El núcleo estaría así rodeado por los electrones y su carga debía ser igual, en valor y signo opuesto, a la carga de los electrones del átomo.

Pero rápidamente se percibió, que un átomo construido como un sistema planetario en miniatura, no era una hipótesis satisfactoria dentro de las leyes clásicas conocidas. Así comienza uno de los capítulos más espectaculares de la física moderna, el nacimiento de la mecánica cuántica, las leyes básicas que gobiernan la mecánica del microcosmos, a distancias menores de 10^{-12} m, que son las distancias características de los átomos.

Estas ideas se desarrollan con gran velocidad durante el primer cuarto de este siglo, comenzando con Max Planck en 1900, con su explicación de la radiación de un cuerpo negro, en donde introduce la hipótesis de que la energía es absorbida y emitida por los cuerpos calientes de un modo discontinuo o de a cuantos. Esta idea es posteriormente extendida por A. Einstein (1905), al campo de la radiación electromagnética introduciendo la hipótesis del fotón o el cuanto de radiación. En 1913, N. Bohr da una explicación del átomo de hidrógeno apelando a la regla de cuantificación del impulso o momento angular, dando lugar a lo que se conoce como estados estacionarios de energía de un sistema atómico. De ahora en más, el impulso angular, que desde un punto de vista clásico era una magnitud vectorial continua, pasa a ser una magnitud que solo toma valores enteros en módulo y con un número finito de proyecciones. Esta introducción de la cuantificación es reformulada poco tiempo después sobre principios más fundamentales de Broglie en 1924 introduce el concepto del comportamiento ondulatorio del electrón, o sea, la dualidad entre onda y partícula para la materia. En otras palabras, esto se debería reflejar en la posibilidad experimental de la difracción de los electrones, como es verificado unos años más tarde.

Schrödinger en 1925, pone todo esto en un marco teórico apropiado que es conocido como la ecuación que lleva su nombre.

En ese mismo año, Pauli introduce el Principio de Exclusión, dos partículas idénticas (dos electrones) no pueden ocupar un estado de energía con los mismos números cuánticos y Goudsmit y Uhlenbeck introducen una nueva variable para el electrón, su impulso angular intrínseco o spin. Con todo este material, se está en condiciones de justificar la tabla periódica de los elementos, las transiciones atómicas y describir los sistemas moleculares. Todo indicaba que se había llegado al final del camino y que no mucho más quedaba por aprender.

Ahora bien, en 1905, Einstein había incorporado un concepto fundamental en la física, la Teoría Especial de la Relatividad.

Esta teoría pone en un pie de igualdad las coordenadas espaciales y temporales. Los hechos de la naturaleza se desarrollan en un espacio tetradimensional. Las hipótesis fueron: la constancia de la velocidad de luz en el vacío y que las leyes de la física son equivalentes para cualquier observador en un sistema inercial de referencia. Esta teoría nos dice que las fuerzas en la naturaleza no pueden propagarse a mayor velocidad que la de la luz y que la materia y la energía son equivalentes.

Es así, que Dirac se propuso construir una teoría del electrón dentro del contexto de la relatividad, y lo logra en 1928 con resultados de profundas consecuencias para comprender la estructura de la materia.

El éxito de su formulación condujo en forma natural hacia la variable de spin previamente señalada, al momento magnético del electrón y a que la relación entre ambas magnitudes era un factor constante de valor 2. Esta relación se conoce como relación giromagnética del electrón y coincide con el valor que se conocía experimentalmente. También su nueva formulación daba lugar a la explicación de la estructura fina en el átomo de hidrógeno.

Pero hasta acá nada era extremadamente sorprendente. Sin embargo, esta nueva teoría contenía dificultades dadas por la presencia de estados de energías negativas que daban lugar a la inestabilidad de la materia. Esto llevó a Dirac a postular la existencia de un mar de electrones que llenaran estos estados, y que un agujero en ese mar debía ser reconocido como una nue-

va partícula con carga opuesta a la del electrón y con su misma masa, dando lugar a la introducción de la antimateria, y la antipartícula del electrón, el positrón. Más aún, las nuevas ideas conducen a la posibilidad cierta de procesos de creación y aniquilación de partículas. Comienza a surgir que el concepto de vacío no es enteramente simple, sino que el mismo está poblado con fluctuaciones de campos electromagnéticos y de materia. Estas ideas abren la posibilidad a lo que será finalmente la Electrodinámica Cuántica que hoy conocemos y que es la herramienta que abrió las puertas hacia las otras interacciones fundamentales conocidas. La teoría se confirma con el resultado experimental de la observación del positrón realizada por C.D. Anderson en 1932 y la medida del antiprotón veinticinco años después.

Pero volvamos un poco atrás, para ver qué sucedía en el lado experimental. J. Chadwick descubre el neutrón. Partícula neutra con masa muy cercana al protón. Con el descubrimiento del neutrón se puso inmediatamente de manifiesto que los núcleos atómicos están formados no sólo por protones, sino por protones y neutrones y en cantidades casi iguales. También se hizo obvio que otra fuerza de la naturaleza debía tener lugar en el núcleo.

Algunas de las características de la nueva fuerza son evidentes.

Primero, como el núcleo se encuentra confinado a un volumen muy pequeño, como ya se mencionó, las fuerzas deben ser muy fuertes para poder sobrellevar la intensa repulsión electrostática que sienten los protones. De allí su nombre de interacciones fuertes

y las energías son medidas en millones de electronvolts, Mev, comparadas con las energías de ligaduras atómicas que son del orden del electronvolt.

El segundo hecho concierne al rango extremadamente corto de las interacciones fuertes, que son del orden del diámetro nuclear. Esto se infiere básicamente de la experiencia de Rutherford que fue la que determinó el tamaño del núcleo.

Finalmente, podemos decir que esta fuerza es independiente de la carga eléctrica que llevan los protones, ya que pueden unir protones y neutrones dentro del núcleo en

forma similar. Esto condujo a Heisenberg, en 1932, a introducir el concepto de isospin o spin isotópico para clasificar al protón y al neutrón como una misma partícula con dos estados posibles de carga eléctrica, el nucleón. Así como el electrón tiene dos estados diferentes de spin, el nucleón tiene dos estados diferentes de isospin. Luego, el isospin es un concepto análogo al spin y es una cantidad conservada por las interacciones fuertes.

Mediciones precisas demostraron que el neutrón era levemente más pesado que el protón, dando la posibilidad de que el primero decaiga en el segundo con la emisión de un electrón. Esto se asemejaba al fenómeno conocido de la radioactividad beta descubierto por los esposos Curie y por Becquerel en los años 1900. Sin embargo, los experimentos que tratan la desintegración beta, mostraron que para mantener el principio de conservación de la energía se necesitaba otro tipo de partícula neutra, que se llevara el exceso de energía. Este nuevo tipo de partícula, que Pauli había ya postulado en 1930, recibió el nombre de neutrino dado por E. Fermi.

Algunas propiedades del neutrino son evidentes de su proceso de decaimiento beta. Debe ser una partícula muy liviana, desde el momento en que se pueden observar electrones compatibles con la máxima energía disponible en la reacción de decaimiento.

Ya que en la reacción se debe conservar el impulso angular, se infiere que es una partícula de impulso angular intrínseco (spin) de valor $1/2$.

Otra particularidad interesante es que los neutrinos actúan muy débilmente con la materia y por consiguiente, en contraposición a las interacciones fuertes, este proceso se denomina interacciones débiles.

Los neutrinos fueron observados recién en 1956 por Reines, a 26 años de su propuesta original, cuando se dispuso de flujos grandes en los reactores nucleares.

Las interacciones débiles, como su contraparte las interacciones fuertes, actúan solo en distancias del orden del tamaño nuclear.

Pero retomemos lo que es nuestro objetivo, las interacciones nucleares. En 1935, H. Yukawa sugiere que los protones y neutrones en un núcleo atómico se unen por

medio del intercambio de campos de fuerzas en forma semejante a como lo hacen los electrones en un sistema atómico. Partiendo de las dimensiones del núcleo, Yukawa estimó la posible masa de la partícula asociada a este campo.

Su orden fue aproximadamente unas 200 veces la masa del electrón.

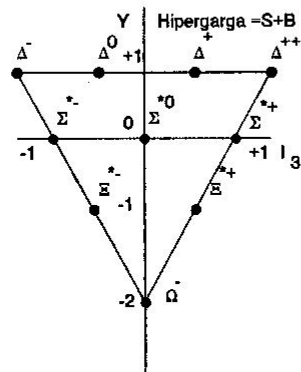
Esta partícula, hoy conocida como el pión o mesón pi, tiene tres estados posibles de carga eléctrica, positiva, negativa y neutra o isospin de valor 1. Su verificación experimental provino de las huellas dejadas en placas fotográficas por las partes cargadas de los rayos cósmicos, que eran los medios disponibles de la época para investigar partículas de tales masas. Sin embargo, la cuestión no fue simple, ya que para el mismo período se determinó la masa de otra partícula, el muón, un electrón pesado cuya masa se encontraba en el orden de la buscada. Esta partícula, a su vez, formaba parte de la cadena de desintegración del pión y ambas reacciones

eran desencadenadas por fuerzas de origen débil, como las que provocaban la transformación del neutrón en el protón. El pión neutro recién fue determinado en experimentos con aceleradores en el año 1950. Su decaimiento es casi de origen puramente electromagnético y recién en 1953 se determinó que el spin de esta partícula es cero.

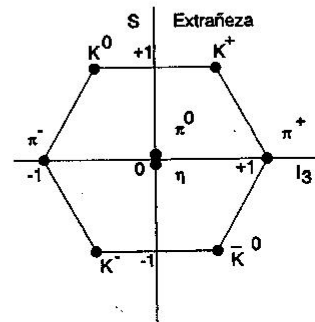
A partir de 1942 comienzan a aparecer en la escena un número muy importante de nuevos personajes, los kaones que son mesones con masas del orden de los 500Mev y nuevos bariones, los hiperones, con masas del orden de los 1200Mev. Tanto los hiperones como los kaones son conocidos como partículas extrañas y su nombre deriva de su presencia inesperada en los datos experimentales (dado que ocurrían en tiempos de transformación característicos de los procesos débiles mientras que en la reacción sólo participaban partículas de características hadrónicas). Su producción se debe a fuerzas de origen fuerte y emergen

Todas las partículas que se representan tienen aproximadamente la misma masa.

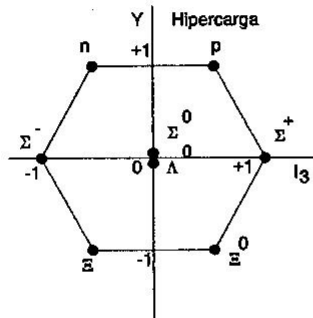
*Decuplete de bariones
Spin = 3/2
B: Número bariónico = 1*



*Octete de mesones
Spin = 0
B: Número bariónico = 0*



*Octete de bariones
Spin = 1/2
B: Número bariónico = 1*



*S: Extrañeza
Q = e (I3 + B/2 + S/2)
Q carga eléctrica
I3 proyección de isospin*

Fig. 1.- Múltiples de SU(3).

en las reacciones de a pares. Esto llevó a Gell-Mann y Nishijima a proponer una nueva ley de conservación. Para ello introdujeron la extrañeza, como un nuevo número cuántico que se agrega a las partículas, como el spin y el isospin. La misma es conservada en todos los procesos en los cuales intervienen fuerzas de origen fuerte. No así para el caso de interacciones débiles.

Digamos que hasta hoy han sido catalogadas unas 300 partículas con masas crecientes y se supone que su número sea ilimitado. Estas partículas, a diferencia del protón, son todas inestables y se desintegran en hadrones muy rápidamente (tiempos 10^{-23} de segundos). Muchas de ellas aparecen en reacciones experimentales como picos en gráficos de la sección eficaz de colisión. Recordemos que la sección eficaz la probabilidad de que las partículas interactúen. Esto corresponde a un área efectiva de la partícula blanco vista por la partícula incidente. Esta sección eficaz es variable con la energía de la partícula en colisión. A los picos se los conoce como partículas resonantes o simplemente, resonancias. Por lo tanto, todo parece indicar que el protón no debería ser un objeto particularmente fundamental, sino uno más de un vasto número, del cual él, es el más estable.

Lo que intentaremos ahora, es describir los progresos que se han logrado en los últimos tiempos en el entendimiento de la existencia de tal variedad de partículas. En especial, trataremos de describir la teoría más promisorio de las interacciones fuertes o hadrónicas, basada en los nuevos constituyentes elementales, los así llamados quarks. También especificaremos la dinámica de sus interacciones, (con analogías y diferencias) usando como paradigma las fuerzas electromagnéticas y a los fines de desarrollar una teoría completa de estas interacciones fundamentales.

Para entender cómo se incorporaron estas ideas al mundo físico actual, analicemos los momentos que las precedieron.

Se consigue elaborar alguna estructura clasificatoria del espectro de masas observado. Con los números cuánticos de isospin y extrañeza en sus manos, Gell-Mann y Yuval Neeman propusieron los multipletes del grupo $SU(3)$ para acomodar algunos de los

hadrones conocidos (ver figura 1). La prueba de que se transitaba por la buena senda fue que el modelo predijo la existencia de una nueva partícula, Omega, un barión que en el año 1964 se determinó experimentalmente, borrando así el escepticismo sobre el modelo $SU(3)$.

Pero era difícil explicar porqué los mesones llenaban ciertas representaciones y los bariones otras. En particular, resultaba muy desagradable que la representación más baja, de dimensión 3, de este grupo clasificatorio no se correspondiera con partículas conocidas (ver figura 2).

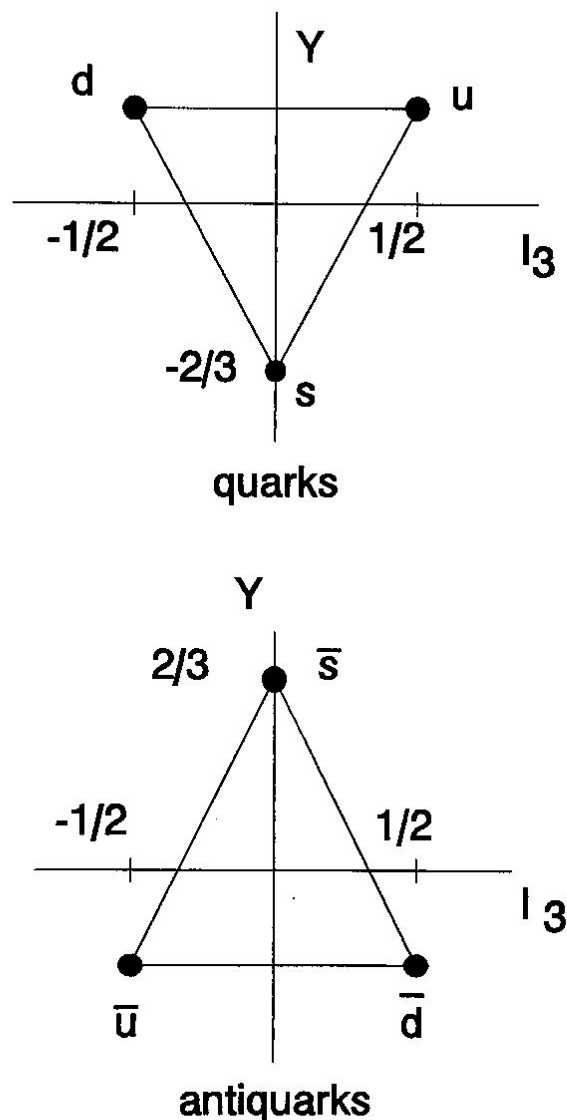


Fig. 2.- Constituyentes básicos de la materia. Representación fundamental del grupo $SU(3)$.

En 1964, Gell-Mann-Zweig proponen que los hadrones se construyen a partir de los ladrillos básicos de la representación fundamental y Gell-Mann denominó a estos objetos quark (palabra que tomó de la novela *Finnegan's Wake*, de James Joyce). Las tres variedades de quarks, o sabores como ahora son llamados, reciben el nombre de quarks up, down y extraño. Sus números cuánticos se representan en la tabla adjunta (ver figura 3).

Por lo tanto, los nucleones (protones, neutrones, etc) como los mesones (piones, kaones, etc) perderían su carácter de elemental para estar constituidos de quarks. Desde este punto de vista, tres quarks forman un barión y un par quark antiquark, un mesón. En los estados donde los constituyentes se encuentran en un estado de movimiento relativo más bajo, todo el impulso angular provendría de la suma de los spines de sus componentes y todo esto conduce a las representaciones que se indica (ver figura 4).

Cómo podemos verificar que el protón, por ejemplo, está constituido de quarks? Una primera forma sería repetir la experiencia que hace 60 años atrás realizó Rutherford para descubrir la estructura del sistema atómico, sólo que ahora se colisionan protones contra protones a muy altas energías. Los resultados se ilustran en la figura 5 y muestran, si se los compara,

un comportamiento similar: un número mayor que el esperado de partículas desviadas a ángulos grandes. Concluimos, lo mismo que en la experiencia de Rutherford, que dentro del protón se encuentran objetos puntuales donde están concentrados los centros dispersores de las partículas en colisión.

Sin embargo, las experiencias fundamentales para observar los constituyentes del protón, son las conocidas como dispersiones profundamente inelásticas, que se realizaron entre los años 1968 y la mitad del año 1970. Consisten básicamente en enviar un haz de electrones o neutrinos muy energéticos en contra de un blanco de protones. El haz incidente es de partículas puntuales con interacciones perfectamente conocidas. De ellas se concluye que el protón está constituido de objetos puntuales denominados por Feynman, partones. Los partones tienen impulso angular intrínseco spin 1/2 y cargas eléctricas fraccionarias, compatibles con los valores de la tabla para los quarks. Todo esto permite identificar a los partones cargados como quarks. Además fue necesario incluir partones neutros invisibles a las fuerzas electromagnéticas y débiles puestas en acción en este tipo de experimentos, a los fines de verificar la regla de que el impulso lineal o cantidad de movimiento que es llevado por el nucleón es la suma de sus elementos constituyentes. Estos partones son

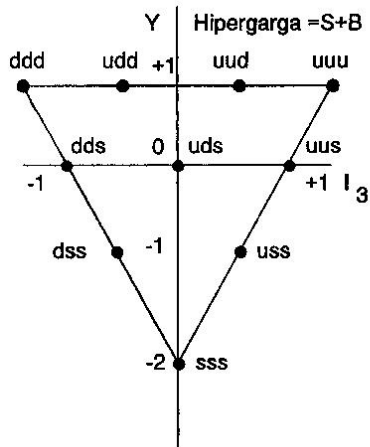
$$\begin{aligned} \text{Mesones} &= q \bar{q} \\ \text{Bariones} &= q q q, \quad (q=u, d, s) \end{aligned}$$

<i>q</i> quarks	carga eléctrica <i>e</i>	extrañeza <i>s</i>	isoespin <i>i</i>	proyección de isoespin <i>i</i> ₃
<i>u</i> (up)	2/3	0	1/2	+1/2
<i>d</i> (down)	-1/3	0	1/2	-1/2
<i>s</i> (extraño)	-1/3	-1	0	0

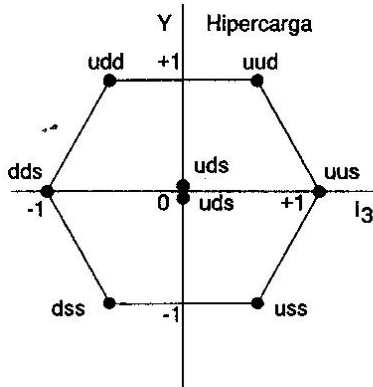
$$\text{Spin} = 1/2 \quad \text{Número bariónico } B = 1/3$$

Fig. 3.- Números cuánticos (sabores) de quarks.

*Decuplete
de bariones
Spin = 3/2*



*Octete de
bariones
Spin = 1/2*



*Octete de
mesones
Spin = 0*

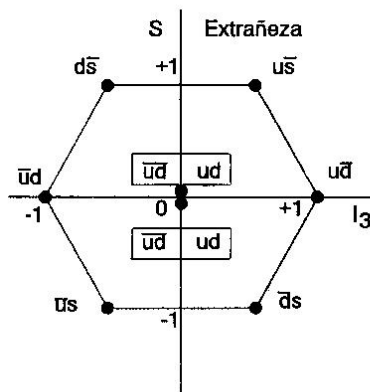


Fig. 4.- Contenido de quarks y antiquarks de las representaciones de SU(3).

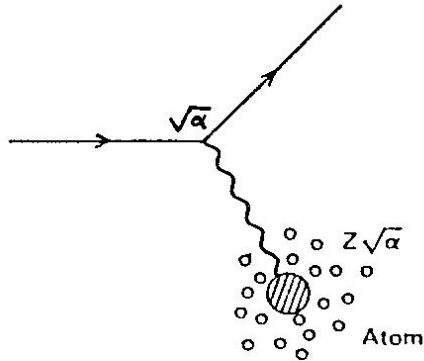
conocidos como gluones. Veremos que son objetos necesarios para formular una teoría de las fuerzas fuertes. En realidad, estos últimos experimentos se asemejan a usar un microscopio de alta resolución, que permite ver con una longitud de onda extremadamente pequeña comparada con el tamaño del protón.

Otras dos consecuencias se desprenden de estos experimentos. La primera se refiere a que las fuerzas de interacción entre quarks dependen de la distancia de una manera peculiar, de tal forma que cuando los quarks se encuentran a distancias pequeñas, la interacción es débil y a esto se lo denomina libertad asintótica. Por otro lado, la fuerza tiende a crecer a medida que la distancia crece y se supone que llega a tal magnitud que se hace imposible poder separar un quark de un protón o neutrón y aislarlo, como es posible hacerlo con los electrones de un átomo. A esta propiedad se la denominó confinamiento. La pregunta es si se puede generar una teoría dinámica entre quarks, que dé como resultado las propiedades anteriormente mencionadas. También será de valor poder deducir a partir de esa teoría las fuerzas entre nucleones y las propiedades que lo caracterizan, muy bien determinadas en trabajos experimentales. Podemos decir que hay una teoría, la Cromodinámica Cuántica, que muestra algunas de las características mencionadas, aunque aún no se conozcan todas las respuestas. Hoy continúa una extensa actividad experimental y teórica de investigación en el tema, con el propósito de determinar la distribución de carga de los patrones con dadas fracciones de impulso lineal total dentro del nucleón. Estas distribuciones están relacionadas a lo que se denomina funciones de estructura del nucleón¹.

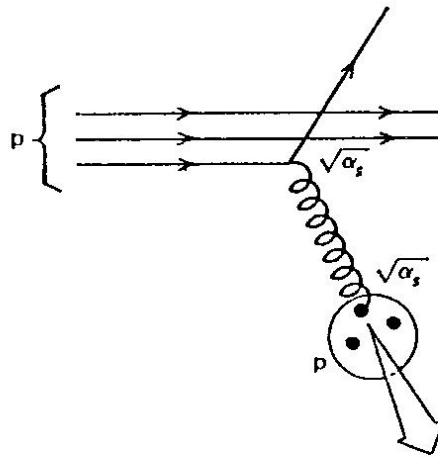
Pero retornemos a los hechos históricos. Poco después de propuesto el modelo de quarks, y si bien tuvo éxito en su primera predicción, se visualizó que algunos de los contenidos de quarks de las partículas entraban en conflicto con el principio de Pauli ya mencionado anteriormente. Como se muestra en la figura 6,a la partícula Omega estaría constituida de tres quarks idénticos, con sus espines alineados en la misma dirección y ocupando su estado de energía más bajo, lo que contradice al principio de Pauli. La solución al problema fue propuesta por Greenberg, Han y Nambu (1964) quienes incorporaron un nuevo número cuántico a los quarks que llamaron Color, en una analogía con la carga eléctrica, figura 6,b.

Por consiguiente, la materia no sólo puede transportar carga eléctrica sino también

Experiencia de Rutherford

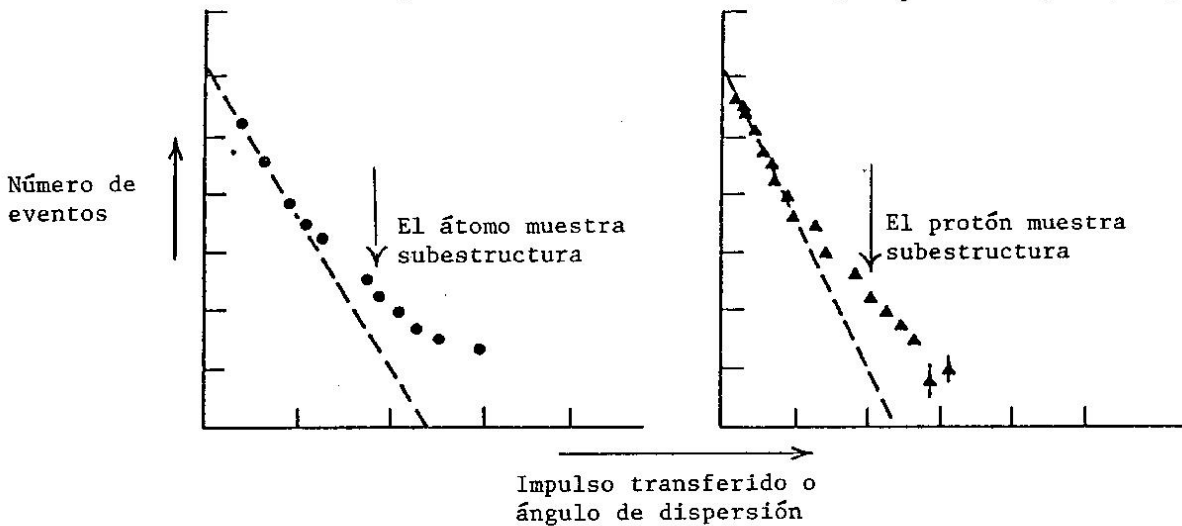


Colisión p-p $\rightarrow \pi^0 + X$



Au target *Phil. Mag.* xxi, 669 (1911)

Proton target *Pbys. Lett.* 46B, 471 (1973)



α Constante de acoplamiento electromagnética
 α_s Constante de acoplamiento fuerte

Fig. 5.- Subestructura de átomos y nucleones.

carga de color que se asocia a la nueva fuerza fuerte de la naturaleza. Esta nueva carga tiene tres valores posibles y frecuentemente se usan los colores rojo, verde y azul para indicarlas. Pero triplicar el número de colores significa también triplicar el número de quarks, cuestión que en cierta forma va en contra del espíritu de reducción del número de objetos básicos necesarios para

la descripción de los hechos físicos. Rápidamente hubo que apelar a la evidencia experimental para soportar su existencia. Una pieza de evidencia se obtiene de la experiencia de colisión entre electrones y positrones, que se realizan en los aceleradores de muy altas energía que actualmente se disponen. Los electrones y positrones se aniquilan para producir un fotón que posteriormente

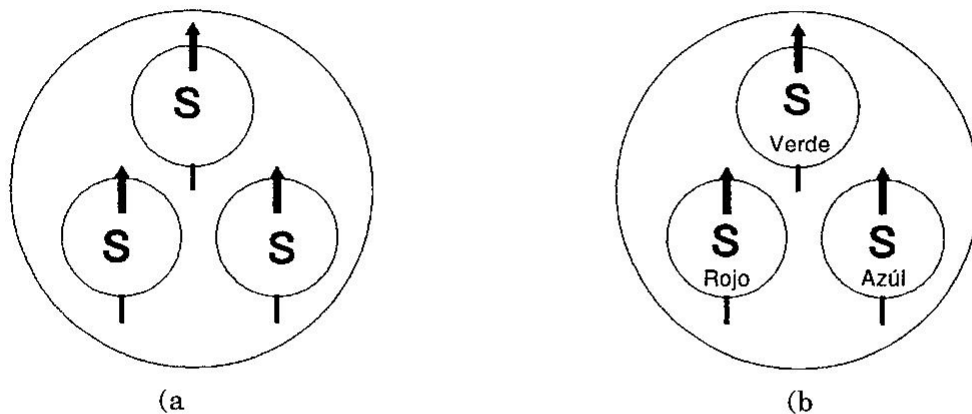


Fig. 6.- Partícula Omega. Hipótesis de los quarks coloreados. Los hadrones están compuestos de quarks con diferentes colores pero ellos son blancos (no tienen color).

se materializa en un par de muones, o dos chorros de hadrones, denominados jets, que provienen del par inicial de quark y antiquark. En estas experiencias se estudia la relación de las secciones eficaces de los dos procesos antes mencionados (ver figura 7). A su vez esta relación es proporcional al cuadrado de las cargas de los quarks y como cada sabor de quark viene en tres diferentes colores se ve que el número tres, supuesto por el modelo, se corresponde con el valor experimental. La otra evidencia la provee el decaimiento del Pión neutro a dos fotones.

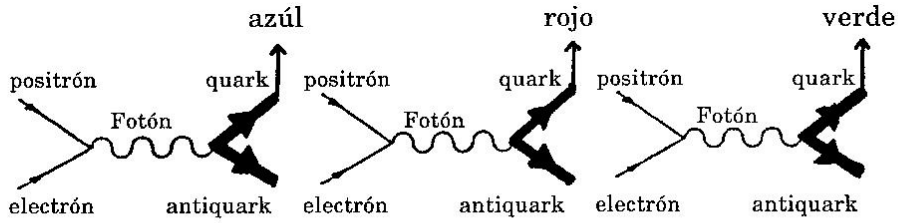
Dos preguntas se desprenden de lo dicho. Primero, ya que el grado de libertad llamado color existe, es posible encontrar en la naturaleza hadrones-como protones, neutrones, piones, etc- que lo transporten? y segundo, dada su existencia, sería su propósito formar parte de la base de una teoría de las interacciones entre quarks?

La respuesta a la primera pregunta, es que no hemos observado en la naturaleza ningún hadron con color, siendo esa una propiedad que excluye muchas configuraciones posibles de hadrones observables y sólo da lugar a configuraciones que son de color blanco. Ha nacido una nueva simetría, la del color, que en el lenguaje matemático especializado se denomina el SU(3) de color. Esto motiva un llamado de atención, para evitar la confusión con la propuesta anteriormente comentada del modelo de SU(3) de Gell-Mann, basado sobre los diferentes

tipos de sabor. El dogma aquí es que en la naturaleza solo se realizan, desde el punto de vista matemático, los singletes de color: los objetos hadronicos que podemos observar son blancos. Pero uno quisiera avanzar un poco más, y tratar de responder a la segunda pregunta. La respuesta se estructura sobre la base de la electrodinámica cuántica. En la nueva teoría el papel de la carga eléctrica lo juega la carga de color. Sin embargo hay una profunda diferencia, la carga eléctrica es una magnitud monovalente y permanece con los fermiones de la teoría (electrones o quarks); en la Cuantocromodinámica, las cargas de color son una magnitud trivalente que se adscribe a los quarks. Se supone que estas cargas son fuentes de los nuevos campos, y que estos son los que propagan la fuerza de unión de los quarks. A estos nuevos campos se los denomina campos de gluones. Su estudio matemático, en el ámbito de la física, se conocía desde hace muchos años: C.Y. Yang y R.L. Mills (1954). Esta teoría, en su forma elemental, se formula sobre la base de un quark con tres colores y ocho campos de gluones que transmiten las fuerzas entre las cargas de color. Se puede decir que a diferencia del campo electromagnético, que no lleva carga eléctrica, el campo de gluones lleva carga de color. Esto hace que la teoría tenga consecuencias sorprendentes. La constante de acoplamiento, que de alguna forma es una medida de la fuerza de interacción entre quarks, decrece cuando la distancia

Aniquilación del par positrón-electrón en hadrones a altas energías

$$e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q} \rightarrow \text{hadrones}$$



$$R(s) = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{hadrones})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)} \sim 3 \times \sum_i e_i^2$$

σ = Sección Eficaz

\sum_i suma sobre sabores
3 número de quarks coloreados

Para energías mayores de 10 GeV

$$R = 3 \times (e_u^2 + e_d^2 + e_c^2 + e_s^2 + e_b^2) = 11/3$$

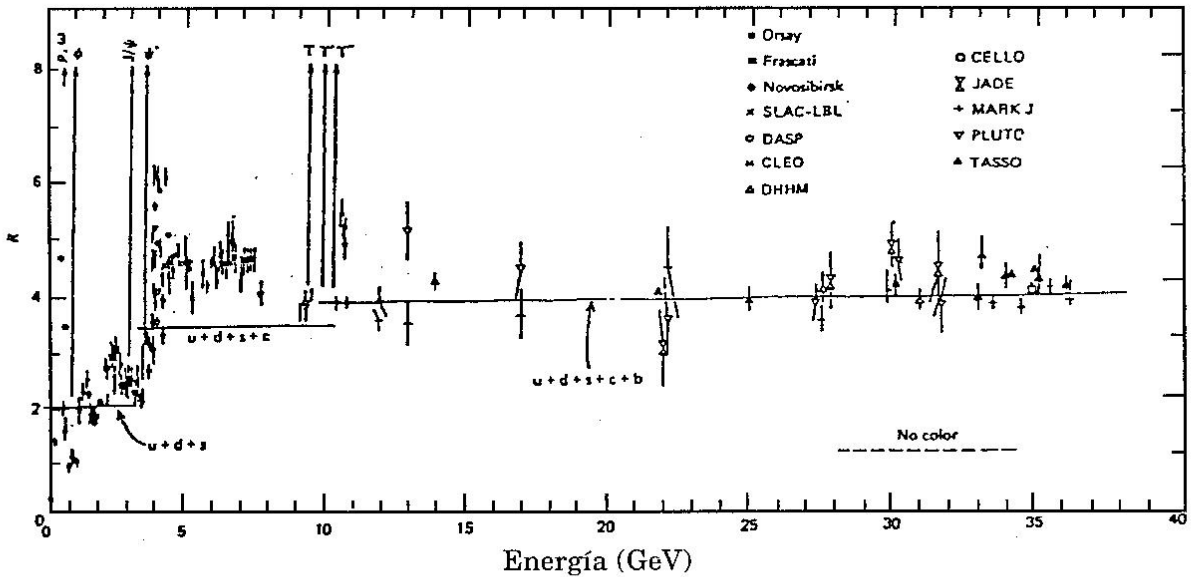


Fig. 7.- Manifestación experimental de color en los quarks.

entre ellos decrece o cuando el impulso transferido crece. Esta propiedad que presenta la teoría se corresponde con la libertad asintótica antes introducida. Esta remarcable propiedad de la Cromodinámica

Cuántica fue obtenida en 1973 por H. Politzer, D. Gross, F. Wilzeck quienes dieron un gran impulso al desarrollo de la misma. Para distancias crecientes, sin embargo, la constante de acoplamiento efectiva no

permanece finita como en la electrodinámica, sino que parece crecer en forma sostenida. Esto daría lugar a la propiedad de confinamiento. Luego hemos llegado a una nueva situación, los constituyentes elementales de la materia, quarks y gluones, pueden sólo existir como estados confinados, nunca como estados asintóticamente libres (partículas libres). Debemos notar que esta paradójica situación deviene de una teoría de campos que es la generalización natural del electromagnetismo, a pesar de que aún la propiedad de confinamiento no haya sido totalmente probada. Solo tenemos indicios a partir de simulaciones numéricas.

Llegado a este punto, podemos preguntarnos si hay evidencias experimentales que confirmen la existencia de los campos de gluones. Al respecto podemos decir que sí las hay. Proviene de la observación en colisiones electrón-positron, de tres chorros (tres jets) de hadrones que se producen en estas reacciones, a energías muy altas. Más aún, la distribución angular de los ejes de los jets, confirman que los gluones son partículas que tienen spin 1 al igual que el fotón.

Si bien existen otras evidencias, es interesante señalar que la presencia de autointeracciones de los campos de gluones, debido a que ellos transportan carga de color, dan la posibilidad de generar una nueva partícula, el gluonio, cuya presencia en la naturaleza aún no está confirmada.

En los últimos años, con poco éxito, se ha explorado la forma de reducir la Cromodinámica Cuántica para obtener los nucleones, los piones, las fuerzas nucleares, etc. a partir de esta teoría fundamental. La razón reside, como ya fue comentado, en no disponer hasta el presente de herramientas teóricas apropiadas para manejar el régimen de confinamiento.

Sin embargo, se han logrado algunos pasos positivos, al percibir la importancia de los grados de libertad de piones². Este punto de vista dio soporte al modelo de Skyrme, una teoría efectiva no lineal de mesones, en donde los nucleones surgen en forma natu-

ral a partir de estos grados de libertad. Realizar este plan de trabajo requiere de una matemática compleja de soluciones clásicas a ecuaciones diferenciales no lineales (solitones) y de conceptos topológicos. En este marco, el grupo de Física Teórica de La Plata, ha realizado contribuciones en el análisis de un viejo problema de la física nuclear, la diferencia de masa entre el protón y el neutrón³.

Finalmente, quisiera puntualizar que hemos dejado de lado en la exposición, lo que ha constituido unas de las teorías más exitosas de los últimos tiempos, la unificación de las fuerzas débiles y electromagnéticas que en conjunto con las fuerzas fuertes constituyen los pilares básicos que tenemos para entender al microcosmos en estos tiempos modernos.

REFERENCIAS

1. FEYNMAN, RP.: Photon-Hadron Interactions, Benjamin, New York, (1972).
MUTA, T.: Foundations of Quantum Chromodynamics, World Scientific Publishing, Singapore (1987).
AMAUDRUZ, P. et (NMC), Phys. Lett. **B66**, 2712 (1991).
AMAUDRUZ, P. et (NMC), Z. Phys. **C51**, 73 (1991).
AMAUDRUZ, P. et (NMC), Nucl. Phys. **B371**, 3 (1992).
EPELE, L.N.; FANCHIOTTI, H.; GARCIA CANAL, C.A.; SASSOT, R.: Phys. Lett. **B275**, 155 (1992).
EPELE, L.N.; FANCHIOTTI, H.; GARCIA CANAL, C.A.; SASSOT, R.: Phys. Lett. **B287**, 247 (1992).
EPELE, L.N.; GARCIA CANAL, C.A.; SASSOT, R.: Mex. Fis. **39**, 1054 (1993).
2. THOOFT, G.: Nucl. Phys. **B72**, 461 (1974).
THOOFT, G.: Nucl. Phys. **B75**, 462 (1975).
WITTEN, E.: Nucl. Phys. **B160**, 57 (1979).
3. EPELE, L.N.; FANCHIOTTI, H.; GARCIA CANAL, C.A.; MENDEZ GALAIN, R.: Phys. Rev. **D39**, 1473 (1989).
EPELE, L.N.; FANCHIOTTI, H.; GARCIA CANAL, C.A.; MENDEZ GALAIN, R.; TIOMNO J.: Festschrift, World Scientific, Singapore (1991).
EPELE, L.N.; FANCHIOTTI, H.; GARCIA CANAL, C.A.: Fourth Mexican School of Particles and Fields, Oaxtepec, World Scientific, Singapore (1991).