

Aproximación a la Teoría de los Quarks

Por Manuel Ramón FERNANDEZ PEREZ (*)

Todos sabemos que la materia es divisible hasta un límite, todavía no bien precisado, designado con el nombre de partícula elemental. Una partícula elemental es, por consiguiente, aquella que carece de estructura interna y que no se puede descomponer en otras partículas constituyentes más sencillas. Ahora bien, si se revisan las diversas teorías que se han ido formulando, a lo largo de la historia, acerca de la estructura de la materia, podemos comprobar que, a medida que, merced a los nuevos descubrimientos experimentales, las partículas consideradas elementales iban adquiriendo un número prohibitivo, surgía una nueva teoría, en seguida comprobada en la práctica, que, especulando sobre la posibilidad de subdivisión de tales partículas en otras aún más simples, hacía decrecer su número considerablemente. Así, según los antiguos filósofos griegos a partir de Empédocles, todas las sustancias eran combinaciones de cuatro elementos: tierra, aire, fuego y agua; pero los descubrimientos sucesivos hicieron que dos milenios más tarde se llegasen a conocer 92 elementos químicos distintos, compuesto cada uno de ellos de un tipo estructuralmente diferente de átomos. Estos 92 átomos distintos pueden considerarse las «partículas elementales» de la materia conocidas por los químicos en los comienzos del siglo actual. Fue entonces cuando el estudio de la estructura interna de los átomos hizo posible explicar su complejidad numérica en función de sólo tres tipos de partículas elementales: protones, neutrones y electrones.

Pero en las últimas décadas se fueron sucediendo los descubrimientos. A medida que la técnica experimental fue disponiendo de aceleradores de partículas más potentes, se fueron detectando cada vez más «partículas elementales», llegando a superar su número las 200. Lógicamente, un número tan elevado de partículas hacía necesaria su clasificación, del mismo modo que los 63 elementos químicos conocidos en 1869 trajeron consigo el Sistema Periódico de Mendelejeff y Lothar Meyer. Primero las partículas se dividieron en dos grandes grupos: hadrones y leptones, según su tipo de interacción (fuerte o débil, respectivamente), y los hadrones, a su vez, en bariones (de spin semiimpar; siguen la estadística de Fermi-Dirac) y mesones (de spin entero o nulo; obedecen la estadística de Bose-Einstein). En 1961, Murray Gell-Mann, del Instituto de Tecnología de California, y Yuval Ne'eman, de la Universidad de Tel Aviv, independientemente uno de otro, dieron a conocer una clasificación de los hadrones en familias, basada en la teoría de grupos y conocida con el nombre de «eightfold way» (camino óctuple). Este esquema de clasificación tiene como grupo asociado el famoso SU (3), y, de acuerdo con ello, todos los hadrones de una misma familia tienen idéntico momento angular

de spin, diferenciándose entre sí las partículas de cada familia mediante dos números cuánticos: el spin isotópico y la hipercarga, los cuales pueden tomar distintos valores y sus posibles combinaciones determinan el número de miembros de cada familia (uno u ocho para los mesones y uno, ocho o diez para los bariones).

El gran éxito de esta clasificación consistió en predecir la existencia de una partícula entonces desconocida, la Ω^- (1), que fue buscada y descubierta en 1964. Pero, sin embargo, a la representación fundamental del SU (3) no correspondía ninguna de las partículas conocidas, y ello motivó que en 1963, de forma independiente, Murray Gell-Mann y George Zweig, ambos del Instituto de Tecnología de California, consideraran necesario, como artificio matemático para la solución del problema, la introducción de unas partículas ficticias, a las que, basándose en un pasaje de la obra *Finnegans Wake*, de James Joyce, en el que se lee: *Three quarks for Musther Mark*, designaron con el nombre de *quarks*. Originalmente, se postularon tres clases o «sabores» de quarks (y sus antiquarks correspondientes), descritos también mediante un grupo de simetría SU (3), y simbolizados mediante las letras «u», «d» y «s», que son respectivamente las iniciales de las palabras un tanto fantásticas «up» (arriba), «down» (abajo) y «sideways» (oblicuo) o «strange» (extraño). El número cuántico de spin de los tres quarks es 1/2, distinguiéndose los tres miembros de cada familia, aparte de por otros números cuánticos, por sus diferentes valores del spin isotópico y de la hipercarga. La carga eléctrica del quark u es + 2/3, mientras que la de los d y s vale - 1/3; por el contrario, el número bariónico de los tres quarks es el mismo: B = + 1/3. En cuanto a la extrañeza, los quarks u y d tienen extrañeza cero, mientras que la del quark s es -1. Los correspondientes números cuánticos de los antiquarks u, d y s son los mismos, pero de signo contrario.

La gran importancia de este modelo de los quarks estriba en que constituye una enorme simplificación de la naturaleza, pues reduce toda la multitud de hadrones conocidos a unos pocos quarks fundamentales. Todos los hadrones están constituidos por quarks: los bariones por tres quarks; los antibariones

(*) Catedrático de Física y Química del I. B. «Calderón de la Barca», de Gijón (Oviedo).

(1) Nótese la semejanza entre esta predicción y la de Mendelejeff, dejando huecos libres en su Sistema Periódico, que más tarde fueron cubiertos al descubrirse los elementos correspondientes.

por tres antiquarks, y los mesones por un quark y un antiquark. Además, todos los números cuánticos de un hadrón se obtienen sumando los correspondientes números cuánticos de sus quarks constituyentes, de forma que todas las combinaciones permitidas de quarks originan hadrones conocidos, sin que ninguna otra combinación sea capaz de hacerlo. Así, el protón está constituido por dos quarks u y un quark d; su carga eléctrica es

$$Q = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1 ;$$

su número bariónico:

$$B = +\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = +1 .$$

y su extrañeza:

$$S = 0 + 0 + 0 = 0 ;$$

mientras que el mesón K^+ está formado por un quark u y un antiquark s (\bar{s}), siendo su carga:

$$Q = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} = +1 ;$$

su número bariónico:

$$B = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0 ,$$

y su extrañeza:

$$S = 0 + 1 = +1$$

Aunque no existe en la actualidad ninguna prueba convincente de la existencia de quarks aislados, es necesario reseñar que, a finales de los años 60, los experimentos de dispersión inelástica de electrones de alta energía por protones, llevados a cabo por Richard E. Taylor, del SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), y Jerome I. Friedman y Henry W. Kendall, del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts), pusieron de manifiesto la existencia de partículas de alrededor de $1/3$ de fermi de radio (probablemente quarks) dentro de los protones.

En 1970, Sheldon Lee Glashow, John Iliopoulos y Luciano Maiani dedujeron teóricamente la existencia de un nuevo quark, «c», llamado quark encantado («charm»), que lleva asociado un nuevo número cuántico, designado con el nombre de encanto («charm»), postulado por vez primera por James D. Bjorken, del SLAC, y Sheldon Lee Glashow, de la

Harvard University, y que se conserva en las interacciones fuertes y electromagnéticas. Este nuevo quark hizo posible la explicación de las corrientes neutras con cambios de extrañeza, detectadas en 1973 por un grupo de investigadores del CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear), a la vez que recibió una brillante confirmación experimental cuando en 1974 Burton D. Richter y sus colaboradores del Stanford Linear Accelerator Center y Samuel C. C. Ting y colaboradores del Brookhaven National Laboratory descubrieron las partículas ψ , que contienen encanto oculto (son estados ligados de encanto y antiencanto) y más tarde con la descripción de partículas con encanto aparente (estados ligados de quarks con encanto y sin encanto).

De esta forma, en 1975 se conocían dos familias de partículas elementales: la primera, compuesta por dos leptones (electrón y neutrino electrónico) y dos quarks (el u y el d), y la segunda también por dos leptones (muón y neutrino muónico) y otros dos quarks (el c y el s), pero en ese mismo año se descubrió el leptón τ (tau), y posiblemente su neutrino asociado, ν_τ (neutrino tauónico), tal vez distinto del neutrino electrónico, a la vez que existen indicios casi irrefutables de la existencia de un nuevo quark, «b», llamado fondo o belleza («bottom»), y ello implica, probablemente, en orden a completar la tercera familia de partículas elementales, la existencia de otro quark, el «t», llamado cima o verdad («top»).

Si bien es grande el parecido entre los leptones y los quarks, en base a que tanto unos como otros son partículas puntuales, sin dimensiones, carentes de estructura interna y con spin igual a $1/2$, no obstante, se diferencian en varios aspectos fundamentales: en primer lugar, mientras los quarks participan en las interacciones fuertes, los leptones interaccionan débilmente; por otra parte, mientras los leptones son incapaces de asociarse unos con otros, los quarks se agrupan de una manera matemáticamente definida (tres quarks, tres antiquarks o un quark y un antiquark), dando origen a los hadrones.

A pesar de todo el innegable atractivo de esta teoría de los quarks, existía originalmente un fallo muy importante, que no se puede dejar sin señalar. Con objeto de que a todos los hadrones les correspondiese el spin correcto encontrado experimentalmente, era necesario asignar a cada quark un número cuántico de spin de $1/2$, con lo cual, al tratarse de partículas de spin semi-impar, deberían obedecer la estadística de Fermi-Dirac, y, por consiguiente, el principio de exclusión de Pauli, de acuerdo con el cual dos partículas idénticas (en este caso, quarks) no pueden ocupar el mismo estado, o, lo que es lo mismo, en un hadrón no pueden existir dos quarks con los mismos números cuánticos.

En los mesones no se presenta problema alguno, al estar formados por un quark y un antiquark, con números cuánticos diferentes; sin embargo, en los bariones (o antibariones), integrados por tres quarks (o tres antiquarks), dos de ellos por lo menos han de tener sus spines alineados de idéntica forma, e incluso en algunos casos los spines de las tres partículas son del mismo sentido, vulnerándose, al menos en apariencia, el principio de exclusión. Con objeto de paliar este inconveniente, O. W. Greenberg, de la Universidad de Maryland, sugirió que los quarks, en vez de obedecer la estadística de Fermi-Dirac, seguían unas normas un tanto especiales, llamadas paraestadísticas de Fermi de orden tres, de acuerdo con las cuales podían hasta tres partículas ocupar un

PROPIEDADES DE LOS QUARKS

Nombre (1)	Símbolo	Carga (Q)	Postulado	(2) Descubierto	Spin	Número bariónico B	Número cuántico interno	Masa (4)
up	u	+2/3	1963	—	1/2	1/3	Spin isotópico (3)	1,5-5 MeV
down	d	-1/3	1963	—	1/2	1/3	Spin isotópico (3)	4-10 MeV
charmed	c	+2/3	1970	1974	1/2	1/3	Encanto	1500-1700 MeV
strange	s	-1/3	1963	1974	1/2	1/3	Extrañeza	200-300 MeV
top	t	+2/3	—	1977	1/2	1/3	Verdad	
bottom	b	-1/3	1977	—	1/2	1/3	Belleza	4500-5000 MeV

(1) Para cada quark existe un antiquark con sus número cuánticos opuestos.

(2) Hasta la actualidad no se ha logrado aislar ningún quark. La fecha de descubrimiento de cada sabor que figura en la tabla indica el año en que fue descubierta una partícula formada exclusivamente por ese sabor.

(3) Los quarks «u» y «d» corresponden cada uno a cada una de las dos direcciones del espacio del spin isotópico.

(4) La masa de los quarks no está bien definida, ya que no se pueden encontrar libres, sino sólo ligados.

mismo estado. Parece, sin embargo, más convincente la solución propuesta por H. Y. Han, de la Universidad de Duke, A. Tawkhelidze, del Instituto de Investigación Nuclear de Rusia, Y. Miyamoto, de la Universidad de Tokio y Yoichiro Nambu, de la Universidad de Chicago. Estos científicos, basándose en la cromodinámica cuántica, atribuyen a cada quark tres posibles estados, distinguibles entre sí por un nuevo número cuántico al que se llamó «color» y para cuyos valores se eligieron los tres colores primarios: rojo (R), verde (V) y azul (A), reservándose para los antiquarks los llamados anticolores, que son los colores complementarios de los primarios: R, V y A. Este nuevo número cuántico es inobservable, de forma que no hay manera de distinguir entre sí quarks idénticos pero de distinto color, lo cual motiva que pueda haber hasta tres quarks, iguales en los demás números cuánticos y sólo discernibles en cuanto a su color, ocupando el mismo estado. Dicho con otras palabras: la hipótesis del color equivale, en lo esencial, a la paraestadística de Fermi. Evidentemente, para que la hipótesis del color resuelva el problema de la estadística de los quarks, es necesario que los tres quarks integrantes de un barión o los tres antiquarks que forman un antibarión tengan colores diferentes entre sí y que el quark y el antiquark de cada mesón sean de colores complementarios, de manera que todos los hadrones, tanto los bariones como los mesones, al ser promedios incoloros de los tres colores, se pueden considerar como «blancos» o carentes de color. Como sólo es posible observar partículas sin color, es lógico que existan solamente en la naturaleza las combinaciones de quarks antes mencionadas, que son las únicas capaces de originar hadrones incoloros. El hecho de introducir la hipótesis del color en la teoría de los quarks no hace aumentar el número de posibles hadrones; sin embargo, como es lógico, triplica el número de quarks, que pasa de esta forma a ser de 18.

Del mismo modo que los «sabores» de los quarks se describen mediante un grupo de simetría SU (3), la introducción del color implica la consideración de un nuevo grupo SU (3), de color, en el que los colores de los quarks vienen caracterizados por otros dos números cuánticos: el spin isotópico de color y la hipercarga de color; pero, al contrario que el sabor, cuya simetría no es perfecta, pues los quarks de distintos sabores tienen masas y cargas eléctricas diferentes, el color es una simetría exacta, dado que su

introducción no origina ninguna diferencia másica, ni de otro tipo, en un sabor de quark.

Los quarks integrantes de un hadrón interaccionan fuertemente entre sí, pues de otro modo tendría que resultar fácil liberarlos, cosa que hasta la fecha no se ha logrado. Se supone que la interacción fuerte se basa en el color de los quarks, de un modo similar a como la carga eléctrica es quien determina la interacción electromagnética, pero mientras esta última se transmite mediante una sola clase de fotones, para explicar las interacciones entre los quarks son precisos ocho campos, así como ocho clases de partículas transmisoras, a las que se da el nombre de *gluones* (del inglés glue = cola de pegar), que pueden considerarse como los cuantos de los campos gluónicos. Los gluones (que, al igual que los fotones, tienen masa nula y número cuántico de spin igual a la unidad) son partículas coloreadas: sus colores son compuestos y se obtienen a través de combinaciones de los tres colores y los tres anticolores fundamentales. Es evidente que el número total de tales combinaciones es nueve, pero como una de ellas, concretamente la RR + VV + AA, es incolora, se prescinde de ella, resultando finalmente ocho gluones coloreados. La interacción de los quarks tiene lugar, por consiguiente, merced al intercambio de gluones, en virtud del cual cambian de color, manteniendo, empero, su sabor característico. Este cambio continuo de color se verifica de acuerdo con las reglas de la probabilidad: no se puede en un determinado momento saber con certeza el color de los quarks; a lo más que se puede aspirar es a conocer la probabilidad de que un quark tenga un color determinado, lo cual se traduce en que, dado que los hadrones carecen de color, las probabilidades para los tres colores serán iguales.

En resumen, se puede considerar, en la actualidad, que los leptones y los quarks son los constituyentes elementales de la materia, en un número total de 6 leptones y 18 quarks (de acuerdo con la hipótesis del color), todos ellos de spin 1/2, agrupados en tres familias (véase cuadro adjunto). Aceptando, como parece ser natural, la existencia de las antipartículas correspondientes, el número total de partículas elementales se eleva a 48, no existiendo ninguna razón teórica que impida el descubrimiento de más familias de partículas elementales. De hecho, hasta 1975 sólo se conocían dos familias de partículas, y sólo en ese año apareció en escena la tercera familia al des-

FAMILIAS DE PARTICULAS ELEMENTALES

	LEPTONES		QUARKS			
Primera familia	e (electrón)	ν_e (neutrino electrónico)	u (up)	$\left\{ \begin{array}{l} R \\ V \\ A \end{array} \right.$	d (down)	$\left\{ \begin{array}{l} R \\ V \\ A \end{array} \right.$
Segunda familia	μ (mu)	ν_μ (neutrino muónico)	c (charmed)	$\left\{ \begin{array}{l} R \\ V \\ A \end{array} \right.$	s (strange)	$\left\{ \begin{array}{l} R \\ V \\ A \end{array} \right.$
Tercera familia	τ (tau)	ν_τ (neutrino tauónico)	t (top)	$\left\{ \begin{array}{l} R \\ V \\ A \end{array} \right.$	b (bottom)	$\left\{ \begin{array}{l} R \\ V \\ A \end{array} \right.$

cubrirse la partícula tau. Es necesario tener en cuenta, además, las partículas W, Z, γ y gluones, todas ellas de spin 1 y responsables de las interacciones entre las demás partículas elementales. En la naturaleza son las partículas de la primera familia las que desempeñan el papel más importante, interaccionando entre sí de la misma forma que lo hacen las cuatro partículas de la familia segunda o tercera (así, en los procesos radiactivos ordinarios un quark «u» se transforma en otro «d» y viceversa), pero estas últimas, que son de vida media mucho más breve, se desintegran, por medio de la interacción débil, originando partículas de la primera familia. Por otra parte, mientras se conocen interacciones entre quarks de distintas familias, no sucede lo mismo con los leptones, así como tampoco se conocen cambios de leptones en quarks, ni de quarks en leptones.

Ahora bien, tras todas estas consideraciones, cabe la posible duda de si los leptones y los quarks son, en realidad, partículas elementales, o si, por el contrario, como ya ha sucedido muchas veces en el transcurso de la historia de la Física, no surgirán nuevos descubrimientos que pongan de relieve la existencia de una subestructura tanto dentro de los quarks como de los leptones. Afortunadamente, la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad descartan por completo tal posibilidad. En efecto, distintos métodos experimentales conducen a un límite superior de diámetro para el electrón de 10^{-15} cm., pudiendo también asignarse este mismo valor límite a los restantes leptones y a los quarks. En el caso hipotético de que quarks y leptones tuviesen partes constituyentes, éstas habrían de encontrarse confinadas en una región del espacio de 10^{-15} cm. de diámetro, conociéndose su posición en cada instante con una indeterminación $\Delta x < 10^{-15}$ cm. De acuerdo con el principio de incertidumbre de Heisenberg, el momento de tal partícula tiene una indeterminación de

$$\frac{h}{\Delta x} = \frac{6,6 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}}{6,28 \cdot 10^{-15} \text{ cm}} > 1 \cdot 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

siendo su energía cinética, según la teoría de la relatividad, mayor que el producto de su momento por la velocidad de la luz. Por consiguiente:

$$E_c > 1 \cdot 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} \\ = 3 \cdot 10^{-2} \text{ erg} =$$

$$= 3 \cdot 10^{-2} \text{ erg} \cdot \frac{1 \text{ MeV}}{1,6 \cdot 10^{-6} \text{ erg}} \cdot \frac{1 \text{ u.m.a.}}{931,2 \text{ MeV}} > 20 \text{ u.m.a.}$$

Esta energía cinética de la partícula constituyente implicaría un aumento de masa de, por lo menos, 20 u.m.a., lo cual es muy poco probable, ya que, de ser así, debería haber una equivalencia total entre la energía de enlace de las partículas constituyentes y su energía cinética, fenómeno sumamente raro en Física. Puede, pues, aceptarse, sin reservas de ningún tipo, que tanto los leptones como los quarks son partículas elementales, desprovistas de toda subestructura.

Hasta la fecha no ha sido posible detectar la presencia de ningún quark aislado. Esto, en principio, puede significar que, aun a pesar de existir libres, no se haya logrado su detección, tal vez por haber sido confundidos con otra partícula ordinaria. Sin embargo, este razonamiento no es convincente, pues los quarks, de existir aislados y al tratarse de partículas con carga eléctrica, se detectarían fácilmente por la ionización producida en los átomos del medio que atraviesan, con la salvedad además de que, al ser su carga fraccionaria, la intensidad de la ionización originada sería distinta de la ocasionada por una partícula cuya carga eléctrica fuese la unidad, pudiendo distinguirse de ella con toda facilidad.

Se ha argumentado (H. Y. Han y Yoichiro Nambu; 1965) la posibilidad de que tanto la carga de los quarks como su número bariónico no sea fraccionaria. Esta suposición, que es enteramente factible, trae como consecuencia la visualización del color de los quarks, ya que los quarks de diferentes colores se pueden distinguir unos de otros por sus diferentes masas, números bariónicos y cargas eléctricas. Dado un sabor de quark, toda la carga eléctrica (+ 1 ó - 1) se asigna a un color, mientras que los otros dos colores quedarán con carga nula: según esto, como los tres colores han de intervenir por igual en la constitución de los hadrones, las cargas obtenidas para éstos coinciden con las encontradas experimentalmente. Si se admite como cierto el modelo de Han y Nambu, dada la similitud de carga entre los bariones y los quarks, podría suceder que los quarks libres (caso de existir) pasasen desapercibidos en las experiencias y fuesen confundidos con los bariones.

Algunos físicos han apuntado también la suposición de que si los quarks no se encuentran aislados no es porque haya imposibilidad intrínseca de que existan fuera de los hadrones, sino porque en la ac-

tualidad no disponemos de aceleradores de partículas de la suficiente energía para liberarlos. Sin embargo, el aceptar esta hipótesis equivale a considerar una gran diferencia de masa entre un quark libre y otro ligado, hasta el punto de hacerse la masa de un quark aislado varias veces mayor que la de un barión. Por otra parte, algunas partículas de los rayos cósmicos sí tienen la suficiente energía para, al menos en teoría, ser capaces de liberar los quarks, y, en efecto, en 1969 varios científicos australianos comunicaron haber detectado corpúsculos de carga fraccionaria entre la lluvia de partículas producidas por los rayos cósmicos; sin embargo, esta información no fue muy tenida en cuenta, a falta de otras confirmaciones posteriores.

Lo cierto es que hasta la fecha, a pesar de todos los intentos experimentales realizados, no ha sido posible probar la existencia de quarks libres, y se postula como explicación de este fracaso el hecho de que los quarks no pueden existir aislados porque hay un mecanismo que los «confina» permanentemente en el interior de los hadrones. Se han formulado en la última década varios modelos de confinamiento de los quarks, entre los que vamos a mencionar los tres siguientes:

a) *Modelo de la esclavitud infrarroja:* Este modelo se basa en la variación de la carga de color del quark con la distancia; ambas magnitudes son proporcionales, de modo que la fuerza entre dos quarks coloreados no obedece, ni mucho menos, a la ley de Coulomb: a medida que la distancia entre ellos aumenta, la fuerza permanece constante, o incluso podría aumentar, de donde se deduce que la energía necesaria para separar dos quarks se hará mayor conforme aumenta la distancia entre ellos, y conseguir su separación exigiría un consumo de energía verdaderamente prohibitivo, superior a la necesaria para la creación de un par quark-antiquark. Si se va incrementando paulatinamente la energía suministrada a un hadrón, se acaba por materializar un par quark-antiquark, pero sucede que el quark recientemente creado ocupa el lugar del extraído, con el cual se une el antiquark formando un mesón, de modo que, en vez de un quark libre, lo que realmente se observa es la creación del mesón correspondiente.

b) *Modelo de la cuerda:* Este modelo, cuyo origen se remonta a las fórmulas matemáticas de Gabriele Veneziano, del Weizmann Institute of Science, se basa en considerar a los hadrones como cuerdas unidimensionales, sin masa, flexibles y extensibles, provistas de un rápido movimiento de rotación, y, por consiguiente, con una cierta energía cinética y potencial. Una de las propiedades intrínsecas de la cuerda es su tensión constante por unidad de longitud, de modo que sus extremos tienden a aproximarse el uno hacia el otro, impulsados por una fuerza constante, siendo neutralizada esta tendencia por la fuerza centrífuga derivada de su movimiento de rotación, teniendo que cumplirse, ya que la cuerda carece de masa, que los extremos de ésta giren con la velocidad de la luz.

Hasta este punto, el modelo se encuentra en perfecto acuerdo con los resultados experimentales alcanzados por el físico italiano Tullio Regge, el cual, al representar gráficamente el momento angular de los hadrones en función del cuadrado de su masa o energía, obtuvo una serie de líneas rectas paralelas, llamadas, en su honor, trayectorias de Regge. En efecto, de las consideraciones preliminares antes

mencionadas se deduce que el momento angular de la cuerda es proporcional al cuadrado de su energía total.

Por otra parte, los quarks se encuentran situados en los extremos de la cuerda, firmemente sujetos a ella, de forma que será completamente imposible hacerles abandonar la situación que ocupan, pudiendo solamente separarlos tensando aún más la cuerda y haciendo aumentar su longitud, a costa de un suplemento de energía cada vez mayor, y que, obviamente, llega a hacerse prohibitivo. Lo que sí puede suceder es que la cuerda se rompa en dos mitades originándose un par quark-antiquark, que, al unirse a los dos extremos de ruptura recientemente formados, da lugar a la creación de un mesón, de una forma en cierto modo análoga a la derivada del modelo de la esclavitud infrarroja.

Este modelo de la cuerda, que fue perfeccionado posteriormente por Holger B. Nielsen y L. Olesen, del Instituto Niels Bohr, de Dinamarca, resulta arbitrario en algunos puntos. Mientras que los mesones se pueden simbolizar por una cuerda con un quark y un antiquark en sus extremos, la estructura posible para los hadrones no parece nada evidente: podría ser un triángulo con un quark fijado en cada vértice, o una estrella de tres puntas con un quark en cada una de ellas. Ahora bien, las trayectorias de Regge para los mesones y los bariones son similares, lo cual sugiere la posibilidad de que su configuración interna sea también análoga, y en virtud de ello una estructura posible para los bariones sería la de una cuerda única con un quark en un extremo y dos quarks en el otro. No obstante, como, en virtud de esta configuración, los colores pueden asociarse a los quarks de tres maneras diferentes no equivalentes entre sí, parece probable que el barión tenga una estructura en resonancia entre estas tres configuraciones.

Por otra parte, la consideración de los números cuánticos spin isotópico de color e hipercarga de color obliga a introducir en el modelo la existencia de dos clases de cuerda, cada una de las cuales transporta el campo asociado con uno de los números cuánticos (véase figura).

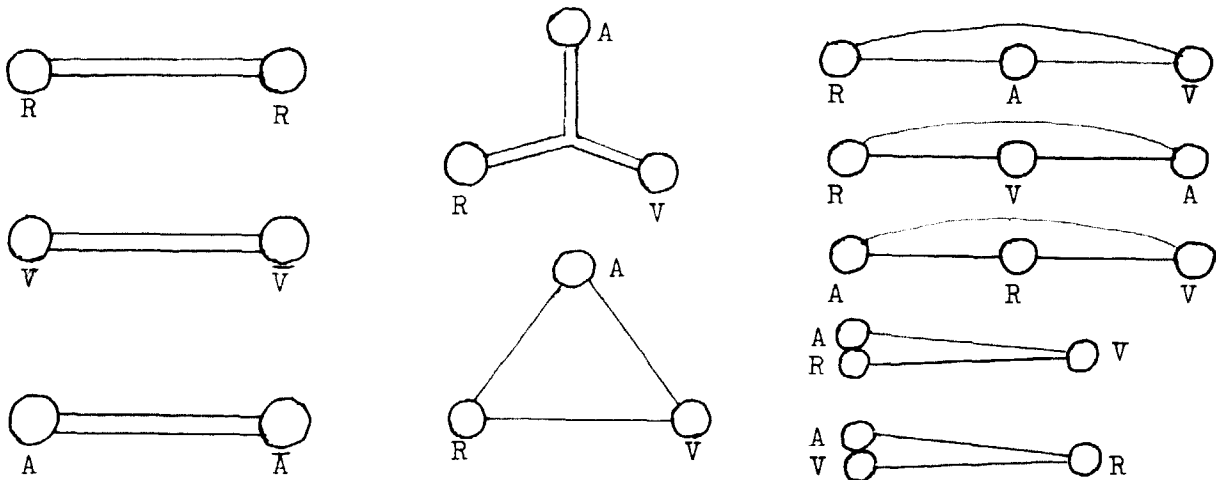
Pero, a pesar de todos los refinamientos que se le han incorporado, el modelo de la cuerda se ve incapaz de explicar los ocho gluones asociados a las interacciones entre los quarks, así como los cambios de color inherentes a tales interacciones, en las cuales no se altera la masa y las demás propiedades del hadrón. Todo esto representa un grave problema, cara a posibles desarrollos futuros del modelo.

c) *Modelo de la bolsa o burbuja:* Este modelo fue propuesto por Kenneth A. Johnson, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y parte de la suposición de considerar a los hadrones como bolsas o burbujas en el espacio, dentro de las cuales se encuentran confinados los quarks, moviéndose libre e independientemente, como las moléculas de un gas, pero sin poder salir al exterior: el hecho de intentar arrancar un quark de la burbuja choca con la interacción de confinamiento. Ahora bien, el movimiento de los quarks origina una presión contra las paredes de la bolsa, que hace aumentar su volumen, estableciéndose el equilibrio cuando la presión de los quarks en el interior de la burbuja es igual a la presión de confinamiento, habiéndose fijado el valor de la constante de la bolsa, B (densidad de energía necesaria para su hinchamiento) en unos 55 MeV/fermi cúbico. Este valor de equilibrio determina el tamaño

CONFIGURACIONES POSIBLES DE LOS HADRONES SEGUN EL MODELO DE LA CUERDA

Mesones

Bariones



En negro se representa la cuerda asociada al spin isotópico de color y en azul la asociada a la hipercarga de color.

de los hadrones, de modo que separar sus quarks constituyentes requerirá cantidades de energía ilimitadamente grandes.

El modelo de la bolsa para el confinamiento de los quarks se encuentra en íntima relación con la cromodinámica cuántica, en el sentido de que el color de un quark es inobservable, porque observar un color equivaldría a ver un quark libre. Las líneas de fuerza de color que unen entre sí a los quarks (de un modo parecido a como las líneas de fuerza de un campo eléctrico conectan entre sí a las cargas) no pueden atravesar la superficie de la bolsa, quedando confinadas en su interior; de este modo, el problema del confinamiento de los quarks queda reducido al confinamiento de color. Así, la cromodinámica, junto con el modelo de la bolsa, son capaces de explicar algunas propiedades de los hadrones hasta ahora incomprensibles, como, por ejemplo, su producción, la autoaniquilación de un electrón y un positrón a muy altas energías, o las diferencias de masa observadas entre los hadrones cuyos quarks tengan spines alineados y aquéllos cuyos spines sean opuestos. El éxito futuro de este modelo depende de su capacidad para explicar otras propiedades de los hadrones, cuando alcance un grado suficiente de desarrollo. Lo que sí parece innegable es la gran semejanza teórica entre el modelo de la cuerda y el de la bolsa: mientras que en el primero el tamaño del hadrón viene determinado por la relación crítica energía/longitud, en el segundo esta relación es energía/volumen. La semejanza se acrecienta aún más si tenemos en cuenta que la bolsa se puede considerar como una cuerda extremadamente gruesa y que sometida a un movimiento de rotación suficientemente rápido se estira cada vez más hasta convertirse en una cuerda unidimensional. Quizás el modelo de la bolsa sea el más adecuado para representar el estado fundamen-

tal de los hadrones, mientras que sus estados excitados y de rotación se explican mejor con el modelo de la cuerda.

Cada uno de estos tres modelos presenta sus ventajas e inconvenientes: todos explican algunas propiedades de los hadrones y dejan otras sin explicar, por lo que ninguno de ellos puede considerarse como ideal. Tal vez suceda aquí como en otros campos de la Física, en que el modelo final se ha obtenido combinando las partes aprovechables de los modelos parciales, y acaso el avance más significativo en esta dirección sea el de Kenneth G. Wilson, de la Universidad de Cornell, que imagina la materia como una red, con celdas del tamaño de hadrones, ocupadas por quarks, unidos por cuerdas, a lo largo de las cuales se propagan los campos gluónicos de color.

He hecho hasta aquí un resumen divulgativo de la teoría de los quarks. Hasta ahora los descubrimientos experimentales no han sido capaces de dar el respaldo definitivo a la teoría, pues si los quarks, en virtud de su confinamiento, no pueden ser aislados, ni siquiera observados, tal vez nunca sea posible demostrar su existencia. Pero, a pesar de ello, puede decirse que la teoría de los quarks ha sido aceptada universalmente. No obstante, ha habido (y sigue habiendo) científicos de gran relieve, como, por ejemplo, Werner Heisenberg, contrarios por entero a ella. Dice Heisenberg (transcribo textualmente dos párrafos tomados de su ensayo: *¿Qué es una partícula elemental?*, ponencia presentada en el Congreso de la Sociedad Alemana de Física el 5 de marzo de 1975 y publicada en *Die Naturwissenschaften* 63, págs. 1-7 (1976) Springer (1976): «... temo que la hipótesis de los quarks no sea tomada en serio por sus autores. El problema de la estadística de los quarks, de las fuerzas que los mantienen unidos, de las partículas a que corresponden esas fuerzas, de los motivos

por los que los quarks nunca se presentan como partículas libres, de la producción de pares de quarks en el interior de la partícula elemental... todos esos problemas permanecen más o menos en tinieblas. Si se quisiera tomar verdaderamente en serio la hipótesis de los quarks, habría que hacer un Ansatz matemático preciso de su dinámica y de las fuerzas que los mantienen unidos y habría que demostrar que ese planteamiento es capaz de explicar, al menos cualitativamente, los muchos y diversos rasgos que se conocen hoy en física de partículas. No debe haber ningún problema de la física de partículas al que no se pudiera aplicar tal planteamiento. No conozco ningún intento de esa índole, pero me temo que cualquier ensayo en tal sentido, formulado en lenguaje matemático preciso, cabría refutarlo de inmediato. Formularé por tanto mis objeciones en forma de pregunta: Tras la hipótesis de los quarks, ¿no se esconderá la idea, refutada experimentalmente hace tiempo, de que es posible distinguir partículas simples y compuestas?... «En la vertiente teórica habrá que intentar establecer hipótesis precisas acerca de la dinámica subyacente de la materia; de esa dinámica se trata. Lo demás sería una especie de sopa de palabras en torno a tabulaciones, con el riesgo de que éstas fuesen más ricas en contenido que la sopa». Para Heisenberg son más importantes las simetrías fundamentales que las estructuras. Y así afirma (1):... «Lo que realmente hace falta es un cambio en los conceptos fundamentales. Tendremos que abandonar la filosofía de Demócrito y el concepto de partícula elemental. Y en lugar de ello deberíamos aceptar el concepto de simetrías fundamentales que deriva de la filosofía de Platón» (debemos recordar que frente a la concepción de Demócrito, según el cual la división de la materia acaba por conducirnos a los átomos, de los cuales se componen todas las sustancias, Platón opinaba que en el intento de dividir indefinidamente se llegaba a formas matemáticas: los cuerpos regulares de la estereometría, que pueden definirse por sus propiedades de simetría, y los triángulos con los que puede formar aquéllos. Aunque estas formas no sean materia la conforman. Así, bajo el elemento tierra subyace la forma del cubo, bajo el elemento fuego la del tetraedro). «Así como Copérnico y Galileo abandonaron en su método la ciencia descriptiva de Aristóteles y tomaron la ciencia estructural de Platón, también es probable que en nuestros conceptos tengamos que abandonar el materialismo atómico de Demócrito y recurrir a las ideas de simetría de la filosofía platónica.» Y vuelve a recalcar sobre el mismo tema en una conferencia pronunciada ante la Academia de Ciencias de Estocolmo el 24 de abril de 1974, titulada: «El papel de la física de partículas elementales en el desarrollo actual de la ciencia» (fue publicada en Documenta de la Academia de Estocolmo, 1974): ...«Volviendo al tema de si en la física de partículas se han descubierto estructuras fundamentales de la naturaleza, mi opinión es que se han hallado las simetrías fundamentales. Con la expresión "simetría fundamental" queremos decir que la ley natural de la cual dependen el

espectro de partículas y sus interacciones es invariante bajo determinados grupos de transformaciones. Estos grupos definen el espacio total en el cual se da el mundo real. Los grupos más importantes son probablemente el grupo de Lorentz, que define el espacio y el tiempo; el grupo SU (2), que dice en relación con los fenómenos electromagnéticos; y el grupo escalar, que es responsable del comportamiento asintótico a energías extremadamente altas. Es esta estructura de grupos lo que realmente investigamos en la física de partículas y lo que es fundamental. Un cambio tan radical en el sistema de conceptos de la ciencia —pasar de las partículas elementales a las simetrías fundamentales— no es aceptado tan fácilmente; porque de preguntas como "¿de qué se compone en último término la materia?" o "¿los protones pueden escindirse mediante colisiones muy energéticas?" es arduo deshacerse. Pero pienso que los experimentos han demostrado de una vez por todas que esas preguntas carecen de sentido, aunque parezca muy abstracto. Sólo se obtendrán respuestas definitivas cuando los abundantes detalles de los fenómenos se investiguen tanto experimental como teóricamente; y eso es lo que se hace en los grandes laboratorios de la física de partículas. La conclusión final en lo que toca al papel de esta rama de la física en la ciencia moderna parece ser ésta: la física de partículas nos informa realmente acerca de estructuras fundamentales de la naturaleza, no acerca de partículas fundamentales...»

¿Debemos dar crédito a Heisenberg o, por el contrario, la teoría de los quarks irá adquiriendo cada vez mayor consistencia, dirigiéndose hacia la búsqueda de las simetrías fundamentales, con una explicación cada vez más profunda de la constitución de la materia? La respuesta a esta pregunta está fuera de los límites de este trabajo, a la vez que rebasa mis conocimientos sobre el tema.

BIBLIOGRAFIA

- CLINE, DAVID B., MANN, ALFRED K., y RUBBIA, CARLO: «La búsqueda de nuevas familias de partículas elementales». *Revista Investigación y Ciencia*, mes de octubre de 1976; págs. 20-31.
- NAMBU, YOICHIRO: «El confinamiento de los quarks». *Revista Investigación y Ciencia*, mes de enero de 1977; págs. 52-65.
- SCHWITTERS, ROY, F.: «Partículas fundamentales con encanto». *Revista Investigación y Ciencia*, mes de diciembre de 1977; págs. 32-48.
- YNDURAIN, FRANCISCO JOSÉ: «Teorías unificadas de las interacciones fundamentales». *Revista Investigación y Ciencia*, mes de marzo de 1978; págs. 6-15.
- JOHNSON, KENNETH A.: «El modelo en bolsa del confinamiento de los quarks». *Revista Investigación y Ciencia*, mes de septiembre de 1979; págs. 76-86.
- HEISENBERG, WERNER: «Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos». Alianza Editorial; 1979.

(1) «La tradición en la ciencia», conferencia pronunciada el 24-4-1973 en Washington, en el Simposio de la Smithsonian Institution y la National Academy of Sciences, publicada en Science and Public Affairs-Bulletin of The Atomic Scientists 29, N.º 10, pág. 410 (1973) y en The Nature of Scientific Discovery, editada por O. Gingerich, Smithsonian Institution Press 1975.