

LA FÍSICA DE LOS QUARKS Y LA EPISTEMOLOGÍA¹ (Quark physics and epistemology)

Marco Antonio Moreira
Instituto de Física de la UFRGS
Código Postal 15051
91501-970 Porto Alegre, RS
moreira@if.ufrgs.br
www.if.ufrgs.br/~moreira

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar, conceptualmente, la Física de los Quarks como un asunto accesible y motivador que ilustra, de manera inequívoca, la relación entre teoría y experimentación en Física. Se cuenta la historia de los quarks y se utiliza esa historia para que sirva de ejemplo de cuestiones epistemológicas. A lo largo de este trabajo, en ningún momento se hace uso de imágenes de partículas elementales porque se cree que, en esa área de la Física, las imágenes solamente refuerzan obstáculos representacionales mentales que, prácticamente, impiden el aprendizaje significativo.

Palabras-clave: Física de los quarks, epistemología, enseñanza de Física.

Abstract

The purpose of this paper is to present, conceptually, the physics of quarks as an accessible and motivating subject that shows unequivocally the relationship between theory and experimentation in physics. The quarks' story is told and this story is used to exemplify epistemological issues. Throughout this narrative images are never used because of the author's belief that in this area of physics the use of images may just reinforce mental representational obstacles that can almost hinder meaningful learning.

Keywords: quark physics, epistemology, physics education.

Introducción

Por lo que sabemos hoy, *leptones* y *quarks* son las partículas fundamentales que constituyen la materia.

Leptones son partículas de *espín*² $\frac{1}{2}$, sin *color*³, que pueden tener carga eléctrica o no (*neutrinos*). El *electrón* es el leptón más familiar. Los demás leptones son el *muón*, el *tau* y los tres neutrinos (*neutrino del electrón*, *neutrino del muón* y *neutrino del tau*). Serían,

¹ Publicado en la *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(2):1-13, 2007.

² Espín es el momentum angular intrínseco de una partícula. El espín de las partículas elementales es siempre un número entero (0, 1, 2, 3,...) o medio entero ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$) de \hbar ($\frac{h}{2\pi}$ donde $h \cong 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s es la llamada constante de Planck).

³ Color es una propiedad de la materia, así como la carga eléctrica también es una propiedad de la materia. No tiene nada que ver con el significado de color en Óptica o en el cotidiano. Algunas partículas tienen esa propiedad, otras no. Los leptones no tienen color, son "blancos".

entonces, seis los leptones, pero para cada uno de ellos existe un *anti-leptón*⁴, de modo que el número total de leptones debe ser igual a doce.

Leptones parecen ser partículas verdaderamente elementales, es decir, aparentemente no tienen estructura interna. Las partículas que tienen estructura interna se llaman *hadrones* (viene del griego, de *hadros* que significa masivo, recio, fuerte). Esa estructura interna está constituida por *quarks*. Hay dos tipos de hadrones: los *bariones*, formados por tres quarks o tres antiquarks, y los *mesones*, formados por un quark y un antiquark. Protones y neutrones son ejemplos de bariones.

Así como los leptones, quarks parecen ser partículas verdaderamente elementales. Por eso dijimos, al principio, que la materia está constituida fundamentalmente por leptones y quarks.

Quarks tienen carga eléctrica fraccionaria, $(+ 2/3)e$ para algunos tipos y $(- 1/3)e$ para otros, pero nunca fueron detectados libres, están siempre confinados en los hadrones. Además, las combinaciones posibles de quarks y antiquarks para formar hadrones son tales que la carga de la partícula resultante es siempre un múltiple entero de carga eléctrica (e) del electrón. Es decir, el quantum de la carga eléctrica continúa siendo la carga del electrón (e) aun cuando los quarks tengan carga fraccionaria.

Pero los quarks tienen otras propiedades y una historia muy interesante desde el punto de vista epistemológico. El objetivo de este trabajo es presentar tales propiedades y contar un poco de esa historia.

Antes de los quarks: muones, mesones y otros hadrones

En el inicio de los años treinta del siglo pasado, la estructura del átomo estaba bien establecida y la estructura del núcleo estaba siendo muy investigada. Se creía que los componentes básicos de la materia serían electrones, protones, neutrones y neutrinos (postulados por Wolfgang Pauli, en 1931, para explicar una pérdida anómala de energía en el decaimiento⁵ de neutrones, y detectados directamente apenas en 1956). El neutrón, detectado en 1932, había sido sugerido un poco antes para explicar la masa nuclear. Antes, se pensaba que el núcleo podría estar constituido por protones y electrones, con exceso de protones para explicar su carga positiva. Sin embargo, mediciones del espín nuclear descartaron esa posibilidad.

En el caso del núcleo de nitrógeno, por ejemplo, serían necesarios 14 protones para dar la masa nuclear y 7 electrones para dar la carga líquida de ese núcleo. Pero ese número total impar de partículas es incoherente con el número par necesario para explicar el espín entero resultante de las mediciones. Sin embargo, si 7 electrones y 7 protones fuesen sustituidos en

⁴ Anti-leptón es la antipartícula del leptón. Una antipartícula tiene la misma masa y el mismo espín de la partícula en cuestión, pero carga opuesta. No son, por lo tanto, partículas completamente diferentes. El antielectrón, por ejemplo, es el positrón o electrón positivo, tiene la misma masa y el mismo espín que el electrón, pero su carga eléctrica es positiva. Análogamente, quarks y antiquarks no son partículas totalmente diferentes.

⁵ Decaimiento puede ser interpretado como el paso de un estado inestable para otro más estable.

ese modelo por 7 neutrones, la masa y la carga serían las mismas que antes y el espín entero sería explicado si el espín del neutrón fuese $\frac{\hbar}{2}$ idéntico al del protón (Close, 1986, p. 21).

Pero la hipótesis y la detección del neutrón plantearon el problema de la estabilidad del núcleo: siendo éste compuesto de protones y neutrones, ¿cómo reconciliar la existencia de un gran número de protones, particularmente en los elementos pesados, en un espacio tan pequeño? La repulsión eléctrica entre ellos sería tan grande que llevaría el núcleo a estallar.

Mientras tanto, en 1935, Hideki Yukawa propuso la existencia de una nueva partícula que sería la mediadora de la interacción que mantendría neutrones y protones cohesionados en el núcleo. La interacción entre protones y neutrones debía ser mediada por alguna partícula, o sea, protones y neutrones interactuarían cambiando una partícula. Esta partícula fue denominada *mesón π* , o *pión*. Un pión podría ser emitido por un neutrón y absorbido por un protón, o viceversa, haciendo que el neutrón y el protón ejerciesen una fuerza uno sobre el otro. Ésa otra fuerza fue llamada *fuerza nuclear* y la correspondiente interacción fue llamada *interacción fuerte*.

Por la previsión teórica de Yukawa, el pión sería más pesado que el electrón y más leve que el protón. Por tanto, al pasar a través de una cámara de burbujas donde hubiese un campo magnético, debería tener una trayectoria menos curvada que la de un electrón, pero más curvada que la de un protón.

En 1936, los físicos C.D. Anderson y S.H. Neddermeyer encontraron tal trayectoria en una cámara de burbujas, sin embargo la partícula que la había dejado no era exactamente la prevista por Yukawa y no era mediadora de la fuerza entre protones y neutrones (fuerza fuerte). Se trataba de otra partícula, que fue llamada de *muón*, bastante semejante al electrón, pero 200 veces más pesada. La detección de esa partícula fue un tanto inesperada y permaneció sin ser explicada durante cerca de 40 años (Close, 1983, p. 51). El mismo físico C.D. Anderson había detectado en el *Caltech* (California Institute of Technology), en 1932 (el mismo año de la detección del neutrón), juntamente con P. Blackett, en Inglaterra, la primera antipartícula, el positrón, o antielectrón. Antipartículas habían sido previstas por Paul Dirac en 1928. Anderson y Blackett ganaron el Premio Nobel algunos años después.

La partícula de Yukawa, el mesón π o pión, fue finalmente detectada, en 1947, con la masa por él prevista, en un laboratorio en la Universidad de Bristol, en emulsiones fotográficas sobre las cuales incidían partículas cósmicas. En 1948, mesones π^+ y π^- fueron producidos en aceleradores de partículas, en la Universidad de Berkeley, y en 1950 fue producido el mesón π^0 , también en choques provocados en aceleradores.

El brasileño César Lattes (1924-2005) tuvo un papel destacado en el hallazgo del mesón π . Para los brasileños, fue él quien descubrió el pión, en Bristol, en 1947. Pero para otros (por ejemplo, Close, 1983, p. 51) fue C.F. Powell, físico inglés, jefe del laboratorio donde Lattes hacía sus experimentos. También la producción artificial de mesones π en el acelerador de la Universidad de Berkeley, el año siguiente, fue obra de Lattes junto con el norteamericano Eugene Gardner. Pero quien ganó el Premio Nobel por el pión, en 1949, fue Yukawa que lo previó correctamente años antes. De cualquier forma, Lattes es el brasileño que ya estuvo más cerca de la conquista del Premio Nobel de Física.

En esa época, entonces, eran conocidas las siguientes partículas: electrones, protones, neutrones, neutrinos, positrones, muones y piones. Sin embargo, a medida que continuaron las pesquisas con rayos cósmicos y aceleradores de partículas, el número de partículas proliferó y empezaron las tentativas de organizarlas en familias con propiedades comunes.

Una de esas clasificaciones es la mencionada en el inicio de este texto: la de los *leptones* (como los electrones y los neutrinos) que no experimentan la interacción fuerte (fuerza nuclear) y los *hadrones* que la experimentan; hadrones se subdividen en dos subcategorías, la de los *mesones* (como el pión) y la de los *bariones* (como el protón). En esta clasificación se puede considerar que el criterio básico es el peso. Las partículas más pesadas, como el protón y el neutrón, son llamadas hadrones, subdivididas en bariones y mesones (peso medio) y las más leves, como el electrón, son denominadas leptones (del griego, *leptos* que significa leve, fino, delgado).

Tal criterio, sin embargo, es anacrónico. No es exactamente el peso lo que distingue hadrones y electrones, sino el hecho de que experimenten o no la interacción fuerte, como se dijo en el inicio del párrafo.

Pero, la población de partículas continuó creciendo y fue necesaria una nueva manera de organización.

La clasificación octal

En 1960-61, Murray Gell-Mann, un físico del *Caltech*, y Yuval Ne'eman, un físico del *Imperial College* de Londres, desarrollaron, independientemente, una clasificación que fue considerada el primer intento con éxito de evidenciar la conexión básica existente entre partículas de diferentes familias.

Verificaron que muchas partículas conocidas pudieron ser agrupadas en familias de ocho partículas con características análogas. Todas las partículas dentro de una familia tenían espín y número bariónico⁶ iguales, y todas tenían aproximadamente la misma masa. Muchos hadrones pudieron ser agrupados en conjuntos de ocho. Esa manera de clasificar partículas fue llamada de *clasificación octal* (Brennan, 2000, p. 239).

De cierto modo, hicieron para las partículas elementales lo que Mendeleev hizo cerca de un siglo antes para los elementos químicos: crearon una tabla periódica.

Antes de que pasemos a un ejemplo de esa clasificación, es necesario hablar de *extrañeza*. En los estudios con rayos cósmicos, la velocidad de decaimiento de ciertas partículas no correspondía a las previsiones teóricas y, además, tales partículas tenían la peculiaridad de ser siempre producidas en pares. Eran consideradas partículas *extrañas*⁷.

⁶ Número bariónico es el número total de bariones presente en un sistema menos el número total de antibariones (Fritzsch, 1983, p. 275).

⁷ El adjetivo "extrañas" para esas partículas era debido a que, siendo hadrones, eran producidas por procesos de interacciones fuertes, entonces sus decaimientos serían también debido a esa interacción. Pero, en ese caso su vida media debería ser muy pequeña, del orden de los 10^{-24} segundos, que es el tiempo característico de las interacciones fuertes. Éstas también eran producidas a los pares. Para explicar este último hecho, primero se introdujo el concepto de la "producción asociada" y después el esquema de la extrañeza (que también explica la no observación de otros decaimientos). Experimentalmente se medía una vida media 10^{14} a 10^{16} veces mayor.

Murray Gell-Mann, el mismo físico que más tarde propondría la clasificación octal, sugirió, en 1953, que ciertas partículas subatómicas tenían una propiedad llamada *extrañeza*. Es una propiedad que gobierna la velocidad con que decaen esas partículas subatómicas.

La extrañeza es una propiedad de la materia, análoga a la carga eléctrica, que unas partículas tienen y otras no.

Extraño tal vez sea el nombre extrañeza. Pero es apenas una cuestión de nombre. Podría ser otra la palabra que representase tal propiedad. Carga eléctrica también es una propiedad que no se sabe exactamente qué es, pero se sabe que algunas partículas tienen carga eléctrica y otras no⁸. Pero admitiendo que existe tal propiedad, es posible explicar, modelar, prever varios procesos físicos. Análogamente, hay otras propiedades de la materia que no sabemos exactamente qué son, pero admitiendo su existencia los físicos pueden, por ejemplo, prever el resultado de ciertos procesos.

La suposición de la extrañeza les permitió a los físicos prever, con éxito, si determinadas partículas serían producidas en ciertas reacciones, si decaerían en determinado tiempo. (El color, o carga color, concepto que se retomará más adelante en este trabajo, es también una propiedad de la materia que la tienen algunas partículas y otras no. También en este caso, es una cuestión de nombre; el significado no es el del cotidiano).

Veamos ahora un ejemplo de la clasificación octal, como indica la Figura 1. A la izquierda hay un sistema de ejes, donde la extrañeza está en el eje de las ordenadas y la carga eléctrica en el eje de las abscisas. A la derecha, el mismo sistema lleno de mesones k (kaons) y mesones π (piones). Debajo, en la misma Figura 1, una familia octal de bariones constituida por el neutrón, por el protón y por las partículas Λ , Σ y Ξ . En este caso, fue añadida una unidad en el eje de la extrañeza.

Si prescindimos del hecho de que en el patrón de los mesones hay sólo una partícula en el centro y en el de los bariones hay dos, los patrones serían idénticos. Para que fuesen idénticos sería necesario un mesón con carga y extrañeza cero. Ese mesón llamado eta (η^0), con masa de 550 MeV, sin carga y sin extrañeza, fue descubierto en 1961. Ese patrón, una especie de tabla periódica para las partículas elementales es llamado de *camino óctuple*.

El camino óctuple fue propuesto por Gell-Mann y Ne'eman, poco más de diez años después del hallazgo de la primera partícula extraña, usando métodos matemáticos conocidos como teoría de grupos.

Quarks

Con el objetivo de refinar la clasificación octal, o los patrones del camino óctuple incorporando no solo octetos, sino múltiplos de un modo general, Murray Gell-Mann y otro físico llamado George Zweig concluyeron, independientemente, que tales patrones resultarían

Después quedó claro que los decaimientos eran producidos por las interacciones débiles y que éstas violaban la extrañeza.

⁸ Hay que tener cuidado con esa analogía, es decir, la extrañeza no es exactamente un análogo de la carga eléctrica, pues ésta está asociada a una de las interacciones fundamentales (la interacción electromagnética) y la extrañeza no.

naturalmente si algunas de las partículas fundamentales del átomo fuesen formadas por partículas aún más fundamentales que son conocidas como *quarks*⁹.

Hoy se acepta que los quarks, así como los electrones, son las partículas verdaderamente elementales de la materia, una especie de ladrillos básicos para la construcción de toda la materia, incluso de los neutrones y protones.

Pero en 1964, cuando los quarks eran aún entidades hipotéticas propuestas por Gell-mann y Zweig la conjetura era osada y poca gente la tomó en serio. Según parece, el propio Gell-Mann no confiaba mucho, tanto es que no intentó publicar el artículo que proponía esa partícula elemental hipotética en el periódico más reconocido del área. Lo publicó en otro periódico que tal vez no fuese tan exigente (Brennan, 2000, p. 243).

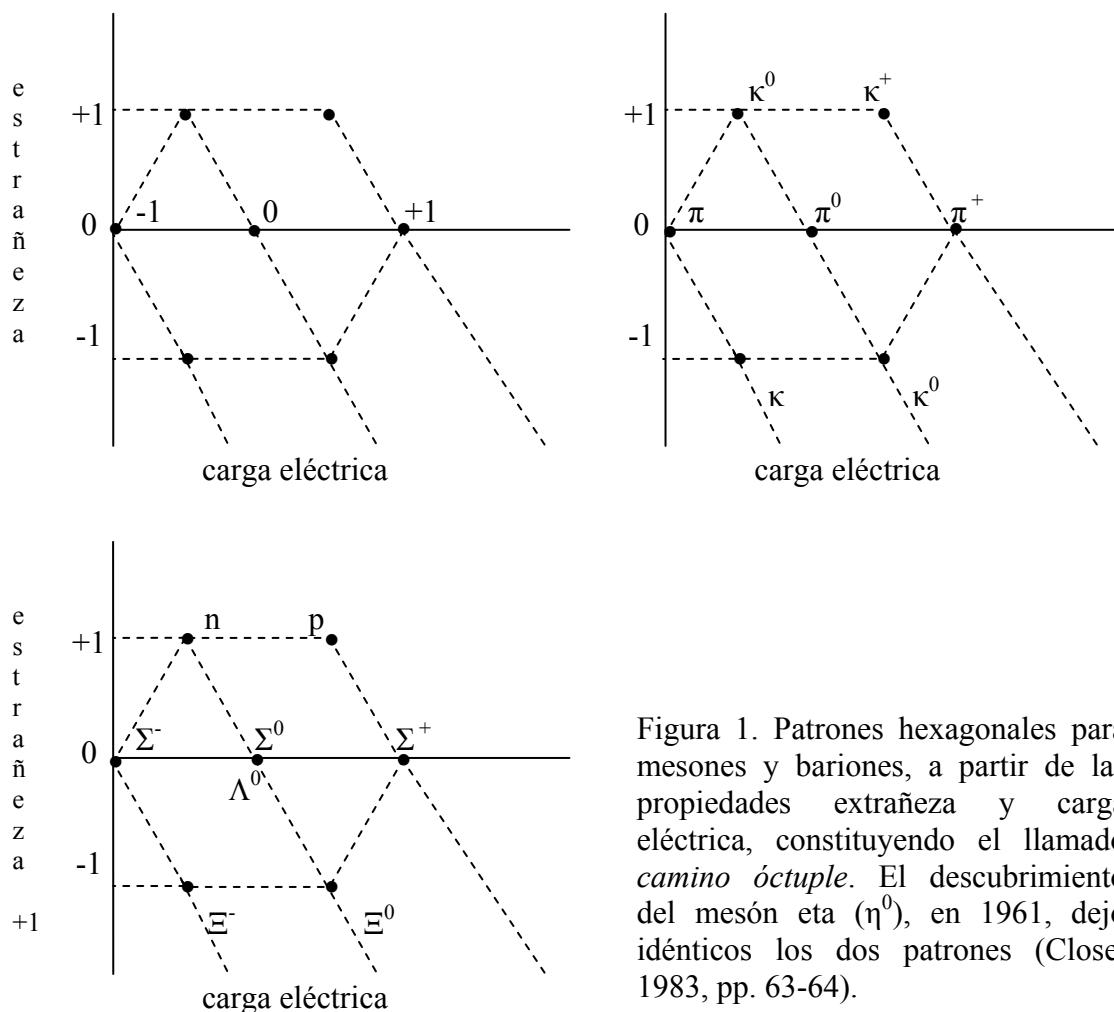


Figura 1. Patrones hexagonales para mesones y bariones, a partir de las propiedades extrañeza y carga eléctrica, constituyendo el llamado *camino óctuple*. El descubrimiento del mesón eta (η^0), en 1961, dejó idénticos los dos patrones (Close, 1983, pp. 63-64).

⁹ Zweig llamó esas nuevas partículas de *ases*, pero el nombre dado por Gell-Mann, aparentemente tirado de un romance de Jame Joyce, fue el que se popularizó.

Con la teoría de los quarks, el problema era que tales partículas tenían propiedades muy peculiares, por no decir misteriosas: su carga eléctrica sería fraccionaria ($\pm 1/3e$, $\pm 2/3e$), no existirían como partículas libres, y constituirían los hadrones siempre en pares quarks-antiquarks ($q\bar{q}$, mesones) o en tríos de quarks (qqq , bariones). ¿Por qué no existirían combinaciones qq (diquarks) o $qqqq$ (tetraquarks), por ejemplo?

Por otro lado, comparando el mundo de los hadrones y el de los leptones, se notaba que había sólo seis leptones y muchos hadrones. Eso reforzaba la hipótesis de que éstos serían partículas compuestas de otras más elementales.

La teoría original de los quarks preveía la existencia de tres tipos, o *sabores*, de quarks: el quark *up* (u), el quark *down* (d) y el quark *extraño* (s). Los quarks u y d serían suficientes para construir la materia común – el protón estaría constituido por dos quarks u y un quark d y el neutrón estaría hecho de un quark u y dos quarks d . Hay que observar que la carga del protón continuaría siendo $+e$, pues el quark u tendría carga $+2/3e$ y el quark d tendría carga $-1/3e$ (luego, $2/3e + 2/3e - 1/3e = +e$, carga del protón), mientras que el neutrón continuaría desprovisto de carga ($2/3e - 1/3e - 1/3e = 0$).

El *quark extraño* fue propuesto para incluir el número cuántico de la extrañeza, explicando, así, por qué ciertas partículas creadas en colisiones provocadas en aceleradores de alta energía tendrían la extraña propiedad de existir durante períodos de tiempo más largos que los previstos teóricamente.

La evidencia experimental de los quarks fue considerada convincente sólo en la década de 1970, la llamada década de oro de la Física de Partículas, a través de reacciones de altas energías en aceleradores/colisionadores de partículas como el acelerador Lineal de Stanford, el Tevatron del Fermilab, en Batavia, Illinois y el Gran Colisionador Electrón-Positrón del CERN (Centro Europeo de Física de Partículas).

En los aceleradores/colisionadores, las partículas primero son aceleradas, alcanzando energías muy elevadas y velocidades próximas a la de la luz, y después son llevadas a colisionar frontalmente con otras partículas que se desplazan en dirección opuesta. De ese choque, o explosión, pueden resultar partículas exóticas que pueden ser analizadas y cuyas propiedades, en ciertos casos, pueden ser comparadas con las propiedades previstas teóricamente de modo a detectarlas. (Claro que, en la práctica, las cosas no son tan simples, pero la idea es ésta).

Pero los quarks no fueron detectados como partículas libres, así como no fueron descubiertos hadrones que no estuviesen formados por tres quarks (bariones) o por un par quark-antiquark (mesones), tal como preveía la teoría original.

Volviendo a la década de 1960: un segundo neutrino, el *neutrino del muón*, fue detectado experimentalmente, en 1962, confirmando la previsión teórica. Había, entonces, cuatro leptones: el electrón (e^-), el *muón* (μ), el neutrino del electrón (ν_e) y el neutrino del *muón* (ν_μ).

¿Por qué no cuatro quarks también? Los físicos están siempre buscando simetrías en la naturaleza, o intentando explicar las asimetrías. Si de hecho había una cierta analogía entre quarks y leptones, como partículas verdaderamente elementales, la asimetría tres quarks

versus cuatro leptones no tenía sentido. La manera más simple de resolver eso era suponer la existencia de un cuarto tipo de quark con carga $(2/3)e$.

Ese cuarto quark, denominado *quark c* o *quark charme*, fue descubierto experimentalmente en 1976, indirectamente, a través del hallazgo de un hadrón llamado partícula *psi* que era una combinación de quark y antiquark de tipo enteramente nuevo.

Pero antes, en 1975, físicos experimentales en el Acelerador Lineal de Stanford observaron ciertos efectos que serían incomprensibles sin la existencia de un quinto leptón cargado y con masa prácticamente doble a la del protón. Ese leptón fue llamado *tau*. En 1978, resultados experimentales sugirieron que el leptón tau estaría asociado a un nuevo neutrino, el neutrino del tau¹⁰ (Fritzsch, 1983, p. 62). Había, entonces, seis leptones.

En 1977, investigadores del Fermilab anunciaron el descubrimiento del quinto quark: el *quark bottom*. El sexto quark, el *quark top*, postulado por los físicos teóricos hace mucho tiempo, sólo fue encontrado por los físicos experimentales, también del Fermilab, en 1995. El equipo que descubrió el *quark top* incluía brasileños, bajo el liderazgo de Alberto Santoro, físico que continúa liderando un equipo de investigadores del CBPF, de la UERJ y de otras universidades brasileñas que colaboran en experimentos del CERN y del Fermilab (Oliveira, 2005, p. 66). Además, cabe registrar que los hallazgos de los años 70 en adelante introdujeron una nueva forma de organización de las investigaciones en esa área, pues pasaron a ser realizadas por grandes equipos de físicos, de varias nacionalidades, ya que el procesamiento de datos científicos es realizado cada vez más en un formato computacional que permite ese tipo de colaboración.

Se completó, así, una búsqueda de aproximadamente 30 años, desde la propuesta de Gell-Mann y Zweig, en 1964, hasta el hallazgo del *quark top* en 1995.

Recapitulando, hay seis leptones (electrón y neutrino del electrón, muón y neutrino del muón, tau y neutrino del tau) y seis quarks (*up*, *down*, *extraño*, *charme*, *bottom* y *top*), cada uno tiene la antipartícula correspondiente. La Tabla 1 presenta, a título de ejemplo, algunos hadrones (mesones y bariones) y su estructura de quarks.

Tabla 1. Algunos bariones y mesones y su estructura de quarks.

Bariones	Estructura	Mesones...	Estructura
p (protón)	<i>uud</i>	π^+ (pi más)	$\bar{d}u$
n (neutrón)	<i>udd</i>	π^0 (pi cero)	$\bar{u}u / \bar{d}d$
Ω^- (omega menos)	<i>sss</i>	π^- (pi menos)	$\bar{u}d$
Σ^+ (sigma más)	<i>uus</i>	J/ ψ (jota psi)	$\bar{c}c$
Σ^0 (sigma cero)	<i>uds</i>	κ^- (κ menos)	$\bar{u}s$
Σ^- (sigma menos)	<i>dds</i>	κ^0 (κ cero)	$\bar{s}d$

Pero esta historia no acaba con el hallazgo del quark top. Al contrario, aún va a llegar lejos. Veremos que los quarks se presentan en tres "colores" posibles y que, para explicar cómo se mantienen confinados en el interior de los hadrones, fue necesario suponer una nueva

¹⁰ El neutrino del tau fue observado directamente sólo en 2000 en el FERMILAB.

interacción fundamental – *la interacción fuerte* – y, por consiguiente, una nueva partícula mediadora – el *gluón*. La interacción fuerte mediada por gluones es llamada *fundamental* mientras que la mencionada antes, aquélla mediada por mesones, es considerada *residual*.

Pero antes, hagamos una breve digresión epistemológica.

Quarks y epistemología

Muchas veces se piensa que las teorías físicas son elaboradas para explicar observaciones. Parece lógico: se observa, se hacen registros (mediciones, por ejemplo) que generan datos y de éstos se induce alguna teoría, alguna ley.

Puede parecer lógico, pero no es así. Hay una interdependencia, una relación dialéctica, entre teoría y experimentación. Una alimenta la otra, una dirige la otra. La Física de Partículas, en particular la teoría de los quarks, es un bello ejemplo de eso.

Lo que llevó a Gell-Mann y Zweig a postular la existencia de los quarks fue una cuestión de simetría – el camino óctuple – y lo que reforzó la aceptación de su propuesta fue una cuestión de asimetría – ¿por qué tan pocos leptones (partículas leves) y tantos hadrones (partículas pesadas)?

Pero cuando Gell-Mann propuso el concepto de extrañeza, lo hizo para explicar el comportamiento experimental extraño de ciertas partículas.

Los neutrinos fueron postulados por Pauli, en 1931, para explicar resultados experimentales anómalos en el decaimiento de neutrones, y fueron detectados experimentalmente en 1956.

Yukawa propuso el pión (mesón π) en 1935 y su evidencia experimental fue obtenida en 1947. Los quarks charme y top fueron previstos teóricamente y descubiertos años después.

La Física de Partículas está llena de ejemplos de la interdependencia entre teoría y experimentación. Por un lado, se postulan nuevas partículas para explicar resultados experimentales imprevistos, por otro, se buscan experimentalmente ciertas partículas previstas teóricamente. Se construyen máquinas (aceleradores/colisionadores) para detectar experimentalmente partículas previstas en la teoría de las partículas. Se espera, por ejemplo, detectar hasta 2010 una partícula prevista teóricamente llamada Bosón de Higgs. Eso porque solamente en 2010 estará en pleno funcionamiento en el CERN una máquina capaz de detectarla, si de hecho existe. Si no existe, la teoría tendrá que ser modificada (Schumm, 2004, p. 121).

Otra cuestión que podrá llevar a una modificación de la teoría es la asimetría materia-antimateria. La teoría prevé que para cada partícula hay una antipartícula y eso ha sido confirmado experimentalmente, pero en el universo (por lo menos lo que es de nuestro conocimiento) hay mucho más materia que antimateria y eso la teoría aún no lo ha explicado (op. cit., p. 14).

La hipótesis de los quarks hecha por Gell-Mann y Zweig, en 1964, es lo que Karl Popper (1982) llamaría de conjetura audaz. Popper es el epistemólogo de las conjeturas y

refutaciones. Para él las teorías científicas son conjeturas, productos del intelecto humano, necesariamente refutables. Según él, se puede aprender mucho más de la confirmación (siempre provisional) de conjeturas audaces que de la corroboración de conjeturas prudentes. La conjetura de Gell-Mann y Zweig fue audaz y los resultados experimentales que, por ahora, la corroboran trajeron enormes avances en la comprensión de la constitución de la materia.

Además, la conjetura fue tan audaz que, como ya se dijo, Gell-Mann creyó que su trabajo podría no ser aceptado en la revista de Física de mayor prestigio y lo encaminó a otra. Zweig, a su vez, cuenta la reacción de la comunidad de físicos teóricos de la siguiente manera (Fritsch, 1983, p. 75):

La reacción de la comunidad de físicos teóricos al modelo de un modo general no fue buena. Publicar el trabajo en la forma que yo quería fue tan difícil que acabé desistiendo. Cuando el departamento de Física de una importante universidad estaba considerando mi contratación, el físico teórico más senior de ese departamento, uno de los más respetados físicos teóricos, vetó la contratación en una reunión de departamento diciendo que el modelo que yo había propuesto era trabajo de un charlatán. La idea de que los hadrones estaban formados por partículas aún más elementales parecía demasiado rica. Esa idea, sin embargo, es aparentemente correcta.

Lo que Zweig y Gell-Mann enfrentaron en 1964 es lo que el epistemólogo Stephen Toulmin (1977) llama de foro institucional. Ese foro está constituido por los periódicos científicos, por las asociaciones científicas, por los grupos de referencia y por eminentes científicos como el que vetó la contratación de Zweig. El foro institucional desempeña un papel importante en la consolidación de una disciplina, pero funciona como filtrador y puede bloquear, contrariar, restringir la difusión de ideas nuevas como la de Gell-Mann y Zweig.

Zweig perdió el empleo por aquel entonces, pero acabó viendo su hipótesis confirmada y ciertamente consiguió otras posiciones en buenas universidades.

Gell-Mann fue más feliz. Ya era profesor del Caltech desde 1956 y no fue dimitido por sus hipótesis audaces (extrañeza, clasificación octal, quarks). Al contrario, ganó el Premio Nobel, en 1969, a los cuarenta años, cuando los quarks aún eran apenas hipotéticos, demostrados sólo matemáticamente, pero no detectados experimentalmente.

La Física de los quarks puede también ser usada para, tentativamente, ilustrar conceptos propuestos por Thomas Kuhn (2001), tal vez el más conocido epistemólogo de la ciencia en el siglo XX: paradigma y ciencia normal.

Según Kuhn (2001, p. 13), paradigmas son *realizaciones científicas universalmente reconocidas que, durante algún tiempo, suministran problemas y soluciones ejemplares para un comunidad de practicantes de una ciencia*. Kuhn cita (op.cit., p. 30) la Física de Aristóteles, la Astronomía de Ptolomeu, la Mecánica y la Óptica de Newton y la Química de Lavoisier como ejemplos de paradigmas porque *servieron, durante algún tiempo, para definir implícitamente los problemas y métodos legítimos de un campo de investigación para generaciones posteriores de practicantes de la ciencia*. Y así fue porque compartían dos características esenciales: sus realizaciones fueron suficientemente sin precedentes como para atraer un grupo duradero de partidarios y, al mismo tiempo, suficientemente abiertas como para dejar una variedad de problemas para que los resolviera ese grupo.

Según parece, la Física de los quarks es un buen ejemplo de lo que Kuhn llama paradigma. Probablemente otro paradigma vendrá, no tan revolucionariamente como propondría Kuhn, sino de manera evolutiva. La cuestión es que las teorías físicas nunca son definitivas, están siempre evolucionando. Ciertamente nuevas ideas, nuevas conjeturas, surgirán en el campo de la Física de Partículas.

La teoría de los quarks también sirve de ejemplo, de modo tentativo, para lo que Kuhn llama *ciencia normal*: es la actividad en la cual la mayoría de los científicos emplea, inevitablemente, casi todo su tiempo, basada en el presupuesto de que la comunidad científica tiene teorías y modelos confiables sobre cómo es el mundo (op. cit., p. 24). Según Chalmers (1999, p. 129), *el científico normal trabaja con confianza dentro de un área bien definida, dictada por un paradigma. El paradigma le presenta un conjunto de problemas definidos juntamente con los métodos que cree que son adecuados para su solución.*

¿No fue eso lo que los físicos experimentales hicieron al construir máquinas cada vez más potentes para detectar partículas previstas teóricamente? El método que creían que era adecuado es el de los choques en aceleradores/colisionadores de alta energía. Y continúan creyéndolo porque, como ya se dijo, están construyendo un nuevo acelerador y están buscando obstinadamente una nueva partícula, llamada bosón de Higgs, prevista teóricamente en 1963.

Por otro lado, físicos teóricos también han hecho ciencia normal al intentar resolver problemas de naturaleza teórica del paradigma buscando una mejor articulación de él con el objetivo de mejorar su correspondencia con la naturaleza.

Según Kuhn, la emergencia de otro paradigma llevará a otro período de ciencia normal. Pero dejemos, por ahora, la visión epistemológica y volvamos a la Física de los quarks.

Quarks tienen color

Partículas con espín $\frac{1}{2}$ como los electrones, protones, neutrones y quarks obedecen el Principio de la Exclusión de Pauli, según el cual dos partículas del mismo tipo no pueden ocupar el mismo estado cuántico, o sea, el mismo estado de energía y espín. Eso significa que dos o más quarks del mismo sabor (tipo), o sea, idénticos no pueden ocupar el mismo estado.

Por tanto, según esa regla una partícula constituida, por ejemplo, por tres quarks idénticos no podría existir. Pero una partícula llamada Ω^- (omega menos), prevista teóricamente por Gell-Mann y Ne'eman, en 1962, como elemento faltante de una familia de diez (es decir, las familias no eran sólo de ocho miembros como las de la clasificación octal) fue más tarde descubierta y estaba constituida por tres quarks extraños idénticos. O sea, no podría existir con esa constitución, pero existía.

Para resolver ese problema, un físico llamada Oscar Greenberg sugirió que los quarks poseían otra propiedad, bastante análoga a la carga eléctrica, pero que tendría lugar en tres variedades en lugar de dos (positiva y negativa). Aun no teniendo nada que ver con el significado de color en la Óptica, o en el cotidiano, esa propiedad fue llamada *color*, o *carga color*, y las tres variedades fueron denominadas rojo, verde (o amarillo) y azul. Quarks tienen

colores positivos y antiquarks tienen colores negativos o anti-colores (anti-rojo, anti-verde y anti-azul).

Entonces, color es una propiedad de la materia, así como la carga eléctrica es también una propiedad de la materia. Algunas partículas tienen color, otras no. Leptones no tienen color, son “blancos”. Quarks tienen color, son “coloridos”¹¹.

El número total de quarks es, entonces, 36: los seis quarks (up, down, extraño, charme, bottom y up) pueden, cada uno, presentar tres colores totalizando 18, pero hay también seis antiquarks, y cada uno puede tener tres anti-colores, sumando también 18, de modo que el número total de posibilidades es 36¹².

El concepto de color, como una propiedad que tienen los quarks, resuelve el problema de la existencia de partículas formadas por quarks idénticos, pues al existir tal propiedad en más de una variedad, dejan de ser idénticos.

Pero surge otro problema teórico: se sabe en la electrodinámica que tres electrones nunca formarán un estado ligado, un sistema estable, pero tres quarks pueden formar un estado de ese tipo, como el hadrón Ω . ¿Cómo resolver eso? Debe haber una fuerza atractiva entre los quarks de modo que puedan formar hadrones.

Esa fuerza es llamada *fuerza fuerte*¹³ y la teoría de las interacciones entre quarks es la Cromodinámica Cuántica, así como la Electrodinámica Cuántica es la teoría de las interacciones entre electrones. Pero hay una diferencia fundamental: electrones pueden ser observados como partículas independientes, sin embargo quarks no. ¿Cómo sería, entonces, la fuerza entre los quarks?

Interacciones fundamentales

Objetos, cuerpos, cosas, ejercen influencia unos sobre los otros produciendo campos de fuerza alrededor de sí. Hay una interacción entre ellos. El campo de un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro cuerpo y viceversa.

En la naturaleza hay distintas interacciones consideradas fundamentales, o distintos campos fundamentales, o, también, distintas fuerzas fundamentales. No muchas, como veremos.

Empecemos con la conocida *interacción gravitacional*. Un cuerpo con masa crea alrededor de sí un campo gravitacional y ejerce una fuerza gravitacional sobre otro cuerpo masivo, y viceversa.

¹¹ No se debe imaginar, sin embargo, quarks como bolitas, y mucho menos coloridas como aparecen en los libros didácticos. Esa imagen dificulta la comprensión de lo que es un quark.

¹² Consideraciones teóricas, fuera del objetivo de este texto, limitan ese número de posibilidades.

¹³ No se debe pensar aquí que quarks sienten sólo la fuerza fuerte; sienten también las demás fuerzas, pues tienen la carga eléctrica y la débil y son una forma de materia-energía. Pero, experimentan tales fuerzas en intensidades muy diferentes.

Hay también otra interacción bastante conocida, la *electromagnética*. Un cuerpo cargado eléctricamente produce alrededor de sí un campo eléctrico y ejerce una fuerza eléctrica sobre otro cuerpo electrizado, y viceversa. Si ese cuerpo está en movimiento aparece también un campo magnético y una fuerza magnética. Es decir, en verdad el campo y la fuerza son electromagnéticos y la interacción es electromagnética.

O sea, la interacción entre cuerpos con masa es la gravitacional y la interacción entre cuerpos con carga eléctrica es la electromagnética. Carga eléctrica y masa son propiedades fundamentales de la materia. Los quarks también tienen una propiedad fundamental, el color. Como ellos están siempre confinados, debe haber, entonces, una fuerza atractiva entre ellos, debe haber un campo de fuerzas que los mantiene unidos en los hadrones. Es la llamada *interacción fuerte* que se manifiesta a través de la fuerza fuerte, o fuerza nuclear fuerte. Esa interacción, como ya se dijo, tiene origen en la propuesta de Yukawa, en 1935.

Hay aún una cuarta interacción fundamental, la *interacción débil*. Así como hay una fuerza nuclear débil y un campo débil.

Ésta es la más oscura de las interacciones fundamentales de la naturaleza. Se manifiesta principalmente en el decaimiento beta, un proceso en el cual núcleos atómicos inestables se transforman a través de la emisión de un electrón y un neutrino. (Por ser tan oscura, tal vez sea la más interesante de todas para la investigación en Física de Partículas).

Resumiendo, las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza son: gravitacional, electromagnética, fuerte y débil. Cada una de ellas se debe a una propiedad fundamental de la materia: masa en el caso gravitacional, carga eléctrica en la interacción electromagnética, color en la interacción fuerte (quarks) y, en el caso de la interacción débil, una propiedad llamada carga débil. Es más, ¿por qué no llamar estas cuatro propiedades de cargas: carga gravitacional (o carga masa), carga eléctrica, carga color y carga débil?

Habría entonces en la naturaleza cuatro interacciones fundamentales, cuatro fuerzas fundamentales y cuatro cargas (propiedades fundamentales).

Sólo cuatro. Y tal vez menos, pues teóricamente ya se interpreta la fuerza electromagnética y la fuerza débil como manifestaciones de solamente una, que es la electrodébil, y se busca una unificación aún mayor. Pero nos quedamos con las cuatro y nos preguntamos: ¿Quién media esas interacciones? o ¿Quién transporta esas fuerzas? ¿Habría también cuatro agentes mediadores? Sí, hay. Son las partículas mediadoras o partículas de fuerza o, también, partículas mensajeras.

Partículas virtuales

Ya se dijo, más de una vez, que leptones y quarks son, según la teoría actual, los constituyentes básicos de la materia. O mejor, los seis leptones y seis quarks (cada uno con sus tres colores) y sus antipartículas.

Pero para construir otras partículas a partir de éstas, llamadas verdaderamente elementales, es necesario mantenerlas juntas de alguna manera, y ahí entran las fuerzas y la idea de partículas de fuerza o partículas mediadoras: fotones, gluones, W y Z, y gravitones.

Los fotones son las partículas mediadoras de la interacción electromagnética. Supongamos un electrón y un protón interactuando. Sabemos que tienen cargas eléctricas de señales contrarias, el electrón es negativo y el protón positivo, por tanto, hay una atracción entre ellos, una fuerza de atracción, aunque en esa interacción sean sólo desviados de sus trayectorias. Eso se llama dispersión y en ese proceso hay una transferencia de energía y momentum que puede ser descrita de la siguiente manera: una de las partículas, el electrón, digamos, emite un fotón y la otra, el protón, absorbe ese fotón (Okun, 1987, p. 55).

Es decir, la interacción electromagnética puede ser explicada en términos de cambio de fotones. A rigor, cada partícula cargada interactúa con el campo electromagnético, pero éste es un campo de fotones. Entonces, una partícula cargada interactúa con el campo sufriendo una fuerza. Pero ¿quién son los “portadores”, o los “mensajeros” de esa fuerza? Son los fotones. Por otro lado, la partícula cargada también ejerce una fuerza en la otra partícula o, si queremos, esta partícula también interactúa con el campo sufriendo una fuerza que es transmitida por fotones.

Repitiendo, es como si hubiese un cambio de fotones y en ese sentido los fotones son partículas mediadoras de la interacción electromagnética, o partículas portadoras de la fuerza electromagnética, o, también, partículas mensajeras de esa fuerza.

En esa línea de raciocinio, debe haber, entonces, partículas mediadoras de las demás interacciones fundamentales. Sí, existen, o deberían existir; son los gravitones en la interacción gravitacional, las partículas W^+ , W^- y Z^0 en la interacción débil y los gluones en la interacción fuerte.

Esas partículas mediadoras son llamadas de *cuantos* de los campos correspondientes. Así como los fotones son los cuantos del campo electromagnético, las partículas W^+ , W^- , Z^0 son los cuantos de la interacción nuclear débil, o del campo de la fuerza nuclear débil. Los índices +, - e 0 se refieren a su carga eléctrica. Las tres fueron detectadas por primera vez, en 1983, en el colisionador protón/antiprotón del CERN. En 1984, Carlo Rubia y Simon Van der Meer ganaron el Premio Nobel por tales descubrimientos (Schumm, 2004, p. 120).

El cuanto del campo gravitacional, o sea, la partícula mediadora de la interacción gravitacional sería el gravitón, sin embargo su existencia es, aún, puramente especulativa. El gravitón aún no fue detectado. Sería una partícula sin masa, con espín 2. Pero aún no hay, ni siquiera una teoría cuántica de la gravedad, es decir, una teoría que haga uso del gravitón para calcular fuerzas gravitacionales. Pero, es verdad, que hay muchos físicos teóricos que lo están intentando (op. cit., p. 121).

En el caso de la interacción fuerte, la partícula mediadora es el gluón. Hay ocho tipos de gluones. Son los que median la fuerza fuerte, la fuerza que mantiene los quarks ligados y confinados en los hadrones. De cierta forma, los gluones son la cola de la materia. El campo de la fuerza fuerte es un campo gluónico.

La existencia de los gluones fue confirmada, en 1979, en un colisionador electrón/positrón, en Hamburgo, Alemania. En aquella época, ese colisionador era el único con energía suficiente para detectar tales partículas. Gluón es el término genérico para los ocho tipos existentes. Así como los quarks, gluones tienen color, y, así como ellos, están siempre agrupados, de modo que nunca se sabe cuáles de los ocho posibles cuantos del campo

de la fuerza fuerte participan de una determinada interacción. Gluones son partículas sin masa, con espín 1.

Puede parecer raro que esas partículas mediadoras puedan no tener masa. De todas, sólo las partículas W y Z tienen masa. Pero es necesario recordar que hay una equivalencia entre masa y energía; masa es una forma de energía. O sea, pueden no tener masa, pero tienen energía, o son pulsos de energía.

Se dice, entonces, que las partículas mediadoras son reales o virtuales. Las partículas reales pueden desplazarse de un punto para otro, obedecen a la conservación de la energía y hacen “clics” en detectores Geiger. Partículas virtuales no hacen nada de eso. Son una especie de constructo lógico. Pueden ser criadas tomando energía “prestada” del campo y la duración del “empréstito” es gobernada por el Principio de la Incertidumbre de Heisenberg según el cual $\Delta E \Delta t \geq \hbar$, lo que significa que cuanto mayor la energía (ΔE) “prestada”, menor el tiempo (Δt) que la partícula virtual puede existir para disfrutarla (Lederman, 1993, p. 278).

Las partículas mediadoras pueden ser partículas reales, sin embargo más frecuentemente aparecen en la teoría como partículas virtuales, de modo que muchas veces los dos términos son tomados como sinónimos (ibid.). Son virtuales las partículas que llevan el mensaje de la fuerza entre partículas reales. Pero es necesario tener cuidado con esa terminología pues, si no interactúa con otras partículas, una partícula virtual puede ser real. Fotones, por ejemplo, pueden ser reales si están siempre libres.

Resumiendo, según lo que sabemos hoy, hay cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza (gravitacional, electromagnética, débil y fuerte) debidas a cuatro propiedades (cargas) fundamentales atribuidas a la materia (carga gravitacional/masa, carga eléctrica, carga débil y carga color), cuatro campos de fuerza (campo gravitacional, campo electromagnético, campo de la fuerza débil y campo de la fuerza fuerte), cuatro fuerzas fundamentales (gravitacional, electromagnética, débil y fuerte) y cuatro tipos de partículas virtuales mediadoras (gravitones, fotones, W y Z, gluones), aunque los gravitones aún son especulación teórica.

El Modelo Standard

El modelo que intenta describir la naturaleza de la materia, o de qué está hecho el universo y cómo se aglutinan sus partes, en términos de cuatro fuerzas, cuatro partículas (virtuales) mediadoras y doce partículas fundamentales es el llamado *Modelo Standard*.

Las doce partículas fundamentales son los seis leptones y los seis quarks; las cuatro partículas mediadoras son los fotones, los gluones, las partículas W y Z y los gravitones; las cuatro fuerzas son la electromagnética, la fuerte, la débil y la gravitacional.

Las partículas fundamentales, o *partículas de materia*, son llamadas de *fermiones*. Leptones y quarks son, por tanto, subclases de fermiones. Los leptones no son influenciados por la fuerza nuclear fuerte, no están encerrados dentro de partículas mayores y pueden viajar por cuenta propia. Electrones, muones y neutrinos son leptones. Quarks sufren la fuerza fuerte y están siempre confinados en partículas mayores (hadrones).

Las partículas virtuales que transmiten las cuatro fuerzas de la naturaleza son llamadas *bosones*. Mientras que los *fermiones* son partículas de materia, los bosones son *partículas de fuerza*.

Para completar el modelo, falta aún la *antimateria*: partículas con masa y espín idénticos a los de la materia común, pero con cargas opuestas. Para cada partícula existe la antipartícula correspondiente. El antiprotón es la antipartícula del protón, el antineutrino es la antipartícula del neutrino, etc. La antimateria está constituida por antiprotones, antineutrinos y antielectrones (positrones). Partículas neutras como los fotones y los mesones π^0 , son iguales a sus propias antipartículas (Fritsch, 1983, p. 275).

Hay en la naturaleza una asimetría materia-antimateria. Aunque ya haya sido producida experimentalmente, la antimateria es raramente encontrada en la naturaleza. Explicar esta asimetría es una de las dificultades de la Física Contemporánea. Por consiguiente, es una dificultad del Modelo Standard, que es la actual explicación de la Física para la constitución del universo.

La Tabla 2 esquematiza la constitución de la materia según el Modelo Standard. Ahí están las doce partículas fundamentales, las cuatro fuerzas y las cuatro partículas de fuerza. Hadrones son partículas compuestas. En el universo hay una asimetría entre materia y antimateria o entre partículas y antipartículas.

Tabla 2. Una visión esquemática de la constitución de la materia según el Modelo Standard

MATERIA			
PARTÍCULAS DE MATERIA			
LEPTONES (Fermiones)		QUARKS (Fermiones)	
Electrón	Neutrino del electrón	Quark up (u)	Quark down (d)
Muón	Neutrino del <i>muón</i>	Quark charm (c)	Quark extraño (s)
Tau	Neutrino del tau	Quark bottom (b)	Quark top (t)
		HÁDRONS	
		BARIONES	MESONES
		tres quarks	pares quark-antiquark
FUERZAS (INTERACCIONES) FUNDAMENTALES			
Electromagnética	Débil	Fuerte	Gravitacional
Electrodébil			
PARTÍCULAS DE FUERZA (Bosones)			
Fotones	W & Z	Gluones	Gravitones (no detectados)
PARTÍCULAS DE ANTIMATERIA (asimetría)			
ANTIMATERIA (asimetría)			

Dificultades del Modelo Standard

El Modelo Standard de las partículas elementales no es un simple modelo físico, es un referencial teórico que incorpora la Cromodinámica Cuántica (la teoría de la interacción fuerte) y la Teoría Electrodébil (la teoría de la interacción electrodébil que unifica las interacciones electromagnética y débil). Y ahí aparece una gran dificultad del Modelo Standard, tal vez la mayor: no consigue incluir la gravedad porque la fuerza gravitacional no tiene la misma estructura de las otras tres fuerzas, no se adecua a la teoría cuántica, la partícula mediadora hipotética – el gravitón – aún no ha sido detectada.

Otro problema del Modelo Standard es el bosón de Higgs. En el modelo, interacciones con el campo de Higgs (al cual está asociado el bosón de Higgs) harían que las partículas tuviesen masa. Sin embargo, el modelo no explica bien esas interacciones y el bosón de Higgs aún no ha sido detectado (Kane, 2003, p. 62; Kane, 2005).

La asimetría materia-antimateria tampoco es explicada por el Modelo Standard. Cuando el universo empezó, en el *big bang*, la energía liberada debería haber producido cantidades iguales de materia y antimateria. ¿Por qué, entonces, actualmente, prácticamente todo está hecho de materia? ¿Por qué la antimateria es raramente encontrada en la naturaleza? (Collins, 2005, p. 59).

Además de éstas, hay otras dificultades. Algunas son resultantes de las limitaciones del modelo. Como toda teoría física, ese modelo no puede explicarlo todo. Hay cosas que el modelo nunca explicará. Otras, como la del bosón de Higgs, pueden llevar a modificaciones en la teoría. Si la partícula, prevista teóricamente por el modelo para explicar la masa de las partículas, no es detectada, la teoría tendrá que ser modificada.

Lo importante aquí es darse cuenta de que el Modelo Standard de la Física de Partículas es la mejor teoría sobre la naturaleza jamás elaborada por el hombre, con muchas confirmaciones experimentales. Por ejemplo, el modelo previó la existencia de las partículas Z y W , del gluón, de los quarks *charm* y *top* que fueron todas posteriormente detectadas, con las propiedades previstas. Pero no por eso es una teoría definitiva. Ciertamente será sustituida por otra que responderá a algunas de las dificultades apuntadas, podrá tener algunas confirmaciones espectaculares, pero tendrá sus propias dificultades. Las teorías físicas no son definitivas, aunque tengan mucho éxito como el Modelo Standard.

Otra vez los quarks: el pentaquark

Por lo que vimos, las partículas elementales podrían ser caracterizadas como *constituyentes* (leptones y hadrones) y *mediadoras*. Los hadrones hasta ahora conocidos están formados, como máximo por tres quarks. La novedad es que, recientemente, varios grupos de físicos experimentales han anunciado evidencias de la existencia de una nueva partícula con cinco quarks (más precisamente, cuatro quarks y un antiquark, o sea, un *pentaquark* que recibió el nombre de θ^+ (*teta más*) (Scoccola, 2004).

No se trata, sin embargo, de una nueva dificultad para la teoría, en ese caso la Cromodinámica Cuántica, pues no hay en ella nada que impida la existencia de partículas no tan simples como las formadas por tres quarks (bariones) o por un par quark-antiquark

(mesones). En realidad, era hasta extraño que desde la década de los setenta no hubiesen sido detectadas partículas más exóticas que los bariones y mesones.

Para que una partícula sea “catalogada” como tal, debe tener una vida media (tiempo medio que dura antes de desintegrarse) suficientemente grande como para que dé lugar a efectos que puedan ser observados y medidos en los experimentos (op. cit., p. 39). Pues bien, además del pentaquark teta más, nuevos resultados experimentales sugieren la existencia de otros pentaquarks (lo que sería de esperar, pues hay varias combinaciones posibles de quarks y antiquarks). Sin embargo, no todos los investigadores están convencidos de la existencia de los pentaquarks, pues hay varios experimentos que no encontraron evidencias de esas partículas (op. cit., p. 40). De cualquier manera, la respuesta definitiva sobre si existen o no pentaquarks deberá venir de los datos experimentales (ibid.).

Problemas conceptuales y problemas empíricos

Para el epistemólogo Larry Laudan (1986), la ciencia es, esencialmente, una actividad de resolver problemas y las teorías científicas son, normalmente, tentativas de resolver problemas empíricos específicos acerca del mundo natural (op. cit., p. 39). Para él, si los problemas constituyen las preguntas de la ciencia, las teorías constituyen las respuestas.

Sin embargo, las teorías pueden tener dificultades internas, inconsistencias. Laudan considera tales debilidades como *problemas conceptuales*.

El modelo de Laudan aconseja preferir la teoría que resuelve el mayor número de *problemas empíricos* importantes al mismo tiempo, que genera el menor número de problemas conceptuales y anomalías (problemas no resueltos por la teoría, pero resueltos por una teoría rival) relevantes.

Una vez más podemos usar la Física de los Quarks, o el propio Modelo Standard, como ejemplo de cuestiones epistemológicas. Se trata, siguiendo la línea de Laudan, de una excelente teoría porque resolvió muchos problemas empíricos; todas las partículas previstas fueron detectadas en rayos cósmicos o en aceleradores/colisionadores. Excepto el bosón de Higgs. Sin embargo, los físicos continúan buscando la que continúa siendo buscada como partícula mediadora de un nuevo campo, el campo de Higgs, que explicaría por qué las partículas tienen masa. Se están construyendo máquinas para detectar el bosón de Higgs y la masa es hoy un tópico de rutina de investigación en Física de partículas (Kane, 2005, p. 57). Quién diría, la masa que en el espectro epistemológico de Bachelard (1971) empieza como una apreciación cuantitativa grosera y ávida de la realidad y puede llegar hasta la masa negativa¹⁴ es ahora objeto de investigación en Física de Partículas para saber su propio origen. Un problema empírico fascinante, un gran desafío para el Modelo Standard.

Pero, ¿y el gravitón? ¿Sería también un problema empírico serio para el Modelo Standard? Bien, ahí el problema parece ser más conceptual que empírico porque en ese caso la teoría no consigue incluir la gravedad, es decir, la fuerza gravitacional, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la Naturaleza, aún no está integrada a la teoría cuántica. Es verdad

¹⁴ Lo que Bachelard llamaba masa negativa, siguiendo la teoría relativística del electrón formulada por Dirac, fue interpretado ulteriormente como el positrón, la primera de las antipartículas.

que el gravitón hasta hoy no fue detectado, pero el problema parece que no es meramente empírico.

Obstáculos epistemológicos y nociones-obstáculo

Podemos aprovechar el Modelo Standard para ilustrar también otra faceta epistemológica, con profundas implicaciones pedagógicas: los *obstáculos epistemológicos* y las *nociones-obstáculo*, de Bachelard (op. cit.).

Para él, el problema del conocimiento debe ser planteado en términos de obstáculos epistemológicos. El propio conocimiento actual debe ser interpretado como un obstáculo para el progreso del conocimiento científico. La experiencia nueva debe decir no a la experiencia antigua. Sin embargo, esa *filosofía del no* surge no como una actitud de rechazo, sino como una postura de reconciliación. En la perspectiva de Bachelard, ciertamente una nueva teoría de partículas surgirá diciendo no al Modelo Standard, rompiendo con él, pero dialécticamente, sin rechazarlo, sin negarlo.

La idea de obstáculo epistemológico cuando particularizada lleva al concepto de *noción-obstáculo*. Destacaremos aquí dos nociones-obstáculo: el “*cosismo*” y el “*choquismo*”.

El “*cosismo*”, la inclinación que tenemos de cosificar los conceptos nos lleva a considerar las partículas elementales como corpúsculos, cuerpos muy pequeños, ocupando un espacio muy pequeño, con una masa muy pequeña. Sin embargo, partículas elementales no son corpúsculos, no son cuerpos muy pequeños. Según Bachelard, no se le pueden atribuir dimensiones absolutas al corpúsculo, solamente se le puede atribuir un orden de grandeza, la cual determina más una zona de influencia que de existencia. O más exactamente, el corpúsculo sólo existe en el espacio en el que actúa (1971, p. 64); correlativamente, si no podemos atribuir dimensiones al corpúsculo, tampoco podemos atribuirle forma, pero, en ese caso, tampoco podemos atribuirle un lugar muy preciso.

En la microfísica, el corpúsculo pierde individualidad, pudiendo, incluso, anularse. Esa anulación consagra la derrota del “*cosismo*”. Es necesario sacar de la cosa sus propiedades espaciales. Es necesario retirar el exceso de imagen asociado al “*cosismo*” (ibid.)

Partículas elementales no son corpúsculos, no son cosas, no son las imágenes de “*bolitas coloridas*” que aparecen en los libros didácticos. Ese “*cosismo*” vistoso, esa representación de partículas elementales, quarks por ejemplo, como corpúsculos (bolitas, esferitas), funciona como obstáculo epistemológico para la comprensión de qué son partículas elementales.

Representar partículas elementales como corpúsculos coloridos sólo refuerza el “*cosismo*” que, naturalmente, ya funciona como obstáculo epistemológico para conceptualizar qué es un quark, o, de un modo general, una partícula elemental. Quarks no son las “*bolas*” que aparecen en los libros didácticos. Como diría Bachelard, el espíritu científico debe decir no a ese tipo de representación. Quarks podrían ser “*cuerdas*”, “*membranas*”, o nada de eso. Pero eso es todo imagismo, otro obstáculo epistemológico que nos lleva a querer imaginar cosas que no son imaginables. ¿Será que es necesario imaginar, o cosificar, un quark para entender qué es tal partícula?

Asociado al “cosismo” que se le atribuye a las partículas elementales, hay otro obstáculo epistemológico: el “choquismo”. Las representaciones didácticas de los choques entre partículas son de choques elásticos entre bolas (mejor bolitas) de billar. Una representación, por lo menos grosera de lo que ocurre en un acelerador/colisionador de partículas. Para dar significado a la creación y aniquilación de partículas en un acelerador/colisionador es necesario decir no al choque elástico, como el de las bolas de billar. Sin embargo, los libros didácticos y los aplicativos refuerzan esa imagen equivocada.

En resumen, para aprender significativamente el Modelo Standard es necesario decir no a las representaciones pictóricas clásicas tan presentes en los libros, en las revistas de divulgación científica y en las clases de Física. Las partículas elementales no son corpúsculos y las reacciones y choques entre partículas no son choques elásticos o inelásticos clásicos entre cuerpos muy pequeños.

Conclusión

Este trabajo, así como otros sobre Física de Partículas, publicados recientemente en *Física en la Escuela* – Ostermann, 2001; Moreira, 2004; Abdalla, 2005 y Helayël-Neto 2005 – procuran presentar ese tema de forma accesible a profesores y alumnos.

Pero ¿será que es posible enseñar/aprender Física de los Quarks en la Enseñanza Secundaria? ¿En la Enseñanza Primaria? ¿En la Enseñanza Superior?

¡Claro que sí! En cualquier nivel, siempre que en la enseñanza no se refuercen los obstáculos epistemológicos naturales del espíritu humano y se diga no a tales obstáculos en el aprendizaje. Y que se tenga en cuenta que el aprendizaje significativo es progresivo.

En realidad, no tiene sentido que, en pleno siglo XXI, la Física que se enseña en las escuelas se limite a la Física (clásica) que va solamente hasta el siglo XIX. Es urgente que el currículo de Física en la educación básica sea actualizado de modo que incluya tópicos de Física Moderna y Contemporánea, como la Física de los Quarks abordada en este trabajo. El argumento de que tales tópicos requieren habilidades y/o capacidades que los estudiantes de enseñanza primaria y secundaria aún no tienen es insostenible, pues otros tópicos que se enseñan, como la Cinemática, por ejemplo, requieren tantas o más capacidades/habilidades cognitivas que las Partículas Elementales.

Bibliografía

Abdalla, M.C.B. (2005). Sobre o discreto charme das partículas elementares. *Física na Escola*, 6(1): 38-44.

Bachelard, G. (1971). *Epistemología*. Barcelona, Editorial Anagrama.

Brennan, R. (2000). *Gigantes da Física. Uma história da Física Moderna através de oito biografias*. Rio de Janeiro, Jorge Zahar Ed.

Chalmers, A.F. (1999). *O que é ciência afinal?* São Paulo, Editora Brasiliense.

- Close, F. (1986). *The cosmic onion*. USA, American Institute of Physics.
- Collins, G.P. (2005). Making cold antimatter. *Scientific American*. June: 57-63.
- Fritzsch, H. (1983). *Quarks: the stuff of matter*. New York, Basic Books/Harper Collins Publishers.
- Helayël-Neto, J.A. (2005). Supersimetria e interações fundamentais. *Física na Escola*, 6(1): 45-47.
- Kane, G. (2003). The dawn of physics beyond the standard model. *Scientific American*, June: 56-63.
- Kane, G. (2005). The mysteries of mass. *Scientific American*, July: 30-37.
- Kuhn, T. (2001). (6^a ed.). *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo, Editora Brasiliense.
- Laudan, L. (1986). *El progreso y sus problemas. Hacia una teoría del crecimiento científico*. Madrid, Encuentro Ediciones. Tradução para o espanhol do original *Progress and its problems*, University of California Press, 1977.
- Lederman, L. (1993). *The God particle*. New York, Dell Publishing/Bantam Doubleday Dell Publishing.
- Moreira, M.A. (2004). Partículas e interações. *Física na Escola*, 5(2): 10-14.
- Okum, L.B. (1987). *A primer in particle physics*. Reading, UK, Harwood Academic Publishers.
- Oliveira, M. (2005). Altas energias. As ferramentas dos pesquisadores brasileiros para participar do gigantesco estudo das partículas subatômicas. *Pesquisa FAPESP*, outubro: 64-69.
- Ostermann, F. (2001). Um pôster para ensinar Física de Partículas na escola. *Física na Escola*, 2(1): 13-18.
- Popper, K. (1982). *Conjecturas e refutações*. Brasília, Editora da Universidade de Brasília.
- Schumm, B.A. (2004). *Deep down things: the breathtaking beauty of particle physics*. Baltimore & London, The Johns Hopkins University Press.
- Scoccola, N.N. (2004). Pentaquark. Nova partícula subatômica? *Ciência Hoje*, v. 35, n. 210: 36-40.
- Toulmin, S. (1977). *La comprensión humana – Volumen I: El uso colectivo y la evolución de los conceptos*. Madrid, Alianza Editorial.

Agradecimiento

El autor le agradece a los Profesores Eliane Angela Veit y Olival Freire Jr. por la revisión crítica de una versión preliminar de este trabajo. Agradece también valiosas sugerencias del árbitro de la RBEF que lo revisó.