

Los componentes básicos de la materia

PATRICIO CORDERO S.

Pedimos al autor, profesor-investigador del Departamento de Física, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (UCH), que nos introdujera en el conocimiento actual de la composición de la materia. La exploración fascinante del microcosmos suscita muchas preguntas y abre perspectivas incalculables para el avance de las ciencias

Desde la antigüedad ha existido la inquietud por comprender la composición última de la materia. Sin embargo, sólo en este siglo se ha alcanzado un nivel en el avance de la ciencia y la tecnología suficiente para intentar un estudio sistemático de los componentes y los componentes de los componentes de la materia. En estos últimos años ha surgido un cuadro inesperado y cada vez más consistente de aquellos objetos subnucleares que, en la etapa actual, aparecen como los "ladrillos fundamentales". Los átomos, que en algún momento parecieron ser las partículas más fundamentales, fueron definitivamente comprendidos como compuestos de un núcleo con carga eléctrica positiva y electrones (negativos) a su alrededor. También se sabe ahora que el núcleo de cada átomo está compuesto de protones y neutrones. En aquella etapa del conocimiento se pensó que estas tres partículas constituirían los elementos últimos de nuestra realidad material y hasta hace muy poco tiempo se creía que protones y neutrones eran partículas realmente elementales. Sin embargo como explicaremos en este artículo, el esquema que actualmente está emergiendo indica que hay partículas más fundamentales aún y que llamaremos **partículas básicas**.

El cuadro Nº 1 contiene una lista de las diferentes variedades de partículas básicas. A esto hay que agregar que por cada tipo de partícula existe un correspondiente tipo de antipartícula. Por ejemplo, por cada tipo de quark existen antiquarks, al electrón le corresponde el positrón, etc.

Antes de entrar a describir lo que se sabe sobre las partículas básicas conviene saber cómo y qué partículas se han descubierto principalmente en las tres últimas décadas.

Es bien sabido que la materia se puede convertir en energía. Un caso dramático es el de las bombas nucleares: un gramo de materia puede producir una energía equivalente a 30 millones de kilowatts-hora. Lo que no es tan conocido es que también la energía se puede convertir en materia. Así, por ejemplo, del choque de un electrón y un positrón veloces, pueden resultar dos electrones y dos positrones mucho menos veloces lográndose a convertir energía de movimiento en masa! Los modernos aceleradores de partículas pueden imprimir a un electrón una energía más de 30 mil veces su masa y hacerlo chocar con un positrón moviéndose en sentido contrario con igual

energía.

La principal herramienta que se usa en el estudio de física de partículas son estos aceleradores, los que permiten crear, y así descubrir, nuevas partículas. Ellos son aparatos que utilizan intensos campos eléctricos para dar altas velocidades a las partículas. (1) Mientras más potentes son los aceleradores de partículas, más masivas (más pesadas) pueden ser las partículas que se producen (2). Pero los aceleradores no sólo sirven para descubrir nuevas partículas, sino también para estudiar sus propiedades, sus posibles estructuras y las fuerzas que existen entre ellas. Así se ha podido descubrir tres tipos diferentes de fuerzas: nucleares, electromagnéticas y débiles.

Los cientos de partículas descubiertas en las tres últimas décadas caen en dos categorías: los **hadrones** (protón, neutrón y muchas otras) que son sensibles a las llamadas fuerzas nucleares; y los **leptones** (electrón, muón y otras) que no lo son. No se ha podido detectar ninguna estructura en los leptones. En cambio, veremos que los hadrones presentan una curiosa estructura explicable principalmente en base a los quarks.

Terminamos esta introducción indicando que las herramientas teóricas empleadas para comprender el microcosmos de las partículas elementales y básicas han sido

(1) PETRA es el nombre del acelerador que produce mayor energía de choque en este momento. Está en Hamburgo, Alemania Federal. Consiste principalmente de un tubo anular hueco y al vacío, construido con gran precisión y que tiene 2,3 kilómetros de circunferencia. Para su funcionamiento requiere ser provisto de una potencia eléctrica de 15 a 20 mil kilowatts de electricidad y su costo de construcción, incluyendo los enormes detectores, ha sido de algo más de 80 millones de dólares.

(2) La gran mayoría de las partículas así descubiertas son inestables, teniendo tiempos de vida increíblemente cortos. Sin embargo, basta que una de ellas viva la mil millonésima parte de un segundo para que, viajando a una velocidad cercana a la de la luz, alcance a recorrer varios centímetros en los detectores. Técnicas indirectas permiten detectar partículas con tiempos de vida que son la billonésima de la billonésima parte de un segundo.

-- QUARKS
 -- GLUONES
 -- LEPTONES
 -- BOSONES INTERMEDIARIOS
 -- HIGGSSES

Cuadro Nº 1. Al parecer existen tan sólo cinco tipos de partículas básicas que son las que aquí se enumeran.

la relatividad y la física cuántica, desarrolladas en el primer tercio de nuestro siglo.

Quarks, gluones y hadrones

Los quarks, partículas sugeridas independientemente por M. Gell-Mann y G. Zweig en 1963, se clasifican según dos características que se ha dado en denominar **sabor y color** (3). Hasta ahora se conocen cinco o seis sabores diferentes designados con las letras u, d, s, c, b y posiblemente t. Los colores son exactamente tres y los llamaremos rojo, amarillo y azul. Existen, entonces, tantos tipos diferentes de quarks como tres veces el número de sabores. Si los sabores son seis hay 18 tipos de quarks que llevan nombres como (u azul), (d rojo) etc. A los anti-quarks se les asigna sabores \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} , etc. y colores complementarios: verde, violeta y anaranjado respectivamente.

La experiencia parece indicar que los quarks tienen la peculiaridad de no existir en forma aislada. Se unen en grupos de tres quarks o bien en un par quark-anti-quark. Estos sistemas compuestos son los hadrones que por muchos años fueron considerados partículas elementales. En el cuadro N° 2 se dan ejemplos de la estructura de algunos hadrones en base al sabor

(3) Sabor y color son propiedades sin análogo en el mundo cotidiano, pero que tienen un claro significado físico para el especialista. Todo quark tiene propiedades como masa, carga eléctrica, sabor, color y otras.

protón	= uud
neutrón	= udd
lamda cero	= uds
omega menos	= sss
pión más	= u \bar{d}
Kaon más	= u \bar{s}
J/psi	= c \bar{c}
upsilonon	= b \bar{b}

Cuadro N° 2. Composición de sabor de algunos hadrones.

de sus quarks componentes. Por ejemplo, el protón está compuesto de dos quarks u y un quark d.

Los colores de los quarks componentes se mezclan de tal modo que resultan hadrones 'cromáticamente' neutros, los que podrían llamarse partículas 'blancas'.

Si los quarks no se detectan libres y los hadrones son blancos ¿cómo puede haberse descubierto esa propiedad que estamos llamando color? La respuesta es que existen efectos indirectos debido a la existencia del color cuya comprobación experimental refuerza la razón teórica original que hizo suponer su existencia en 1964. Por ejemplo, el tiempo de vida de ciertos hadrones se calcula teóricamente y resulta correcto gracias a un factor que proviene de la existencia de tres colores. Además, existen en colisiones electrón-positrón observaciones que comparan la probabilidad de producir un par de leptones (muón-antimuón) con la probabilidad de producir cualquier tipo de hadrones. Estas observaciones resultan consistentes con los cálculos teóricos si en la teoría se utilizan tres colores.

¿Qué fuerzas mantienen unidos a los quarks? ¿Por qué no es posible detectarlos individualmente? Es una característica de la física cuántica relativista que las fuerzas entre partículas se deban al intercambio de otras partículas básicas. Así, por ejemplo, las fuerzas electromagnéticas a nivel microscópico han podido ser descritas en forma extraordinariamente exitosa y precisa en base al intercambio de fotones.

Los quarks se mantienen unidos formando los hadrones debido a las fuerzas que se crean por el intercambio de ciertas partículas llamadas gluones. Este es el único papel que se le conoce a los gluones en la naturaleza, ya que como los quarks, jamás se presentan en forma aislada. Los gluones son ocho y tienen colores que son mezclas tipo rojo-violeta, azul-verde etc. El intercambio de gluones produce una poderosa fuerza que impide que objetos con color se

puedan separar mucho tal como si existiera una membrana elástica o "bolsa" en torno al grupo de quarks que forman un hadrón. Esta especie de bolsa creada por los gluones impide, entonces, que los hadrones se desintegren en sus quarks componentes, pero ella no es obstáculo para que los quarks se muevan casi totalmente libres en su interior. Por esto se ha comparado a los hadrones con burbujas en un líquido: las moléculas del gas de la burbuja, nuestros quarks, se mueven libremente dentro de ella pero no pueden escapar.

La compleja teoría físico-matemática que plantea lo que aquí hemos estado describiendo se denomina **Cromodinámica Cuántica** y aún está en una incipiente etapa de desarrollo. A pesar de las dificultades no superadas, aún es posible obtener muchas predicciones que pueden compararse con los datos experimentales. Es así como desde hace unos cinco años se tiene evidencia experimental bastante directa de la existencia de los quarks, aun cuando ellos no salen libres del interior de un hadrón. También a mediados de 1979 se obtuvo por primera vez resultados experimentales muy nítidos que eran esperados en base a la hipótesis de la existencia de los gluones.

En esta teoría las interacciones nucleares pierden su carácter fundamental. Ellas son un efecto secundario producido por las fuerzas entre los quarks que describe la Cromodinámica Cuántica del mismo modo como las interacciones entre átomos son efectos secundarios causados por las fuerzas electromagnéticas entre las partículas que componen a cada átomo (ver figura 2).

Leptones y bosones intermedarios

El más conocido de los leptones es el electrón, que además es la primera partícula subatómica de la que se tuvo conocimiento. Su descubrimiento fue en 1897. Los leptones que se conocen hasta

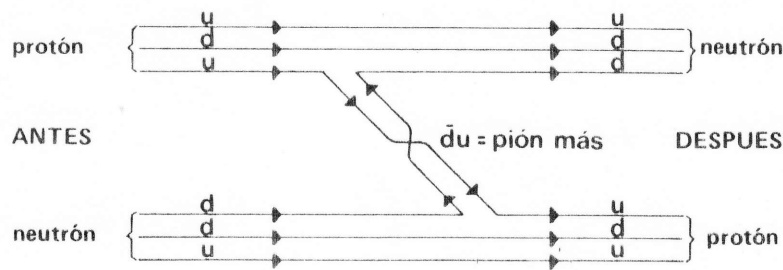


Figura 2. Desde el punto de vista de los quarks componentes las fuerzas nucleares entre un protón y un neutrón son explicadas en forma consistente con la explicación original dada en los años 30 por Yukawa: se trata de un intercambio de piones. En el diagrama se puede apreciar "lo que ocurre" según los quarks componentes: la fuerzas nucleares son un efecto secundario de la dinámica de quarks, la cromodinámica cuántica.

ahora son tan sólo seis y aparecen en parejas (4): electrón, neutrino-e; muón, neutrino-mu; tau, neutrino-tau, utilizando el mismo tipo de lenguaje que para los quarks se dice que los leptones no tienen color y por lo tanto son insensibles a los gluones. Cada leptón define un tipo de sabor leptónico y al parecer la coincidencia entre el número de leptones y de sabores de quarks (seis) no es una coincidencia.

Las fuerzas entre leptones o entre un quark y un leptón se debe al intercambio de otras partículas básicas llamados **bosones intermedios**. Estos últimos son al menos los siguientes: el fotón y tres partículas aún no observadas que se denominan W^+ , W^- y Z^0 . Como se dijo antes, el intercambio de fotones es responsable de las fuerzas electromagnéticas. Las partículas W y Z^0 son las responsables de otras interacciones llamadas débiles. Las interacciones débiles son conocidas desde hace bastante tiempo, ya que ellas originan procesos como la desintegración del neutrón (radiación beta), la creación de muones en la alta atmósfera (fenómeno que se observó por primera vez en los años 40) y la conversión de hidrógeno en helio, que es el principal proceso por el cual las estrellas brillan.

(4) Salvo el electrón (e) a los demás leptones se les designa con letras griegas por lo que los seis leptones son: $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$.

Uno de los grandes avances logrado en los últimos años ha sido poder comprender que las interacciones electromagnéticas y débiles son realmente manifestaciones diferentes de un solo fenómeno: las **interacciones electrodébiles**, causadas por todos los bosones intermedios. Esta teoría propuesta independientemente por S. Weinberg y A. Salam (premios Nobel 1979), en el año

"Lo que no es tan conocido es que también la energía se puede convertir en materia".

1967, toca una cuestión muy profunda sobre unificación de fenómenos aparentemente distintos (5). Tal éxito sólo puede ser comparado a la unificación que logró J.C. Maxwell, el siglo pasado, de las fuerzas eléctricas y magnéticas en un todo indisoluble llamado electrodinámica. La versión actual de la teoría de Weinberg y Salam extendida a todos los leptones y quarks se denomina **Dinámica Cuántica de Sabor**.

Sobre la existencia de los W y Z^0 se tendrá más información con experimentos que actualmente se están llevando a cabo, aun cuando una detección directa de ellas deberá esperar, tal vez, un par de

(5) El primer avance sustancial hacia lo que llegó a ser la teoría de Weinberg y Salam fue publicado en 1961 por el tercer ganador del premio Nobel de Física 1979, S. Glashow.

años. Sin embargo, son muy pocos los que, a estas alturas, dudan que ellas existan. Se espera que sean bastante pesadas: alrededor de 80 a 90 veces la masa del protón, lo que las hace más pesadas que ninguna partícula descubierta hasta ahora. Esto no sorprende sino que, al revés, resulta natural para el experto, porque las fuerzas que origina una partícula intercambiada son más débiles mientras más pese ella, y su peso ino se manifiesta en el peso del sistema interactuante! Está es otra de las curiosas características de las fuerzas en física cuántica relativista.

Los higgses y las teorías de gauge

La Dinámica Cuántica de Sabor y la Cromodinámica Cuántica son teorías físico-matemáticas de una estructura matemática similar y que caen en la categoría de las llamadas "teoría de gauge" o bien, "teorías de campos de Yang-Mills-Higgs". Estas teorías son formula-

ciones que se basan muy fuertemente en el concepto matemático de simetría, y cada una de ellas posee un conjunto particular de simetrías lo cual les da una hermosa y compleja estructura. La propia idea de estas teorías conlleva la existencia de dos tipos de partículas: los **higgses** (6) y las partículas de gauge. Estas últimas son los gluones en el caso de la Cromodinámica Cuántica y son los bosones intermedios en el caso de la Dinámica Cuántica de sabor. Ellas —las partículas de gauge— son las que originan las fuerzas dominantes que predice la correspondiente teoría. Los higgses, por otro lado, se piensa que son

(6) En honor del físico irlandés P. W. Higgs, quien descubrió un mecanismo físico-matemático que liga la existencia de estos higgses a la masa de las partículas de gauge.

muy pesados como para que puedan ser descubiertos en el futuro cercano.

Teoría unificada

Una de las grandes aspiraciones actuales, que implicaría una comprensión más profunda de la estructura y dinámica básica de la materia, es lograr incorporar en un solo marco teórico todas las fuerzas básicas que se conocen. La formulación de "teorías de gauge" asociadas a **sabor y color** representa un enorme avance en este sentido. Pero se piensa que no se tendrá un cuadro teórico satisfactorio hasta que, por lo menos, estos **dos tipos de fuerzas** puedan ser unificados en uno solo (7).

Existen muchos misterios que se espera que la teoría unificada resuelva. Por ejemplo, se cree que se podría llegar a comprender por qué existen tantas partículas que hoy parecen no jugar ningún papel esencial en la naturaleza. En efecto, los fenómenos más comunes del mundo cotidiano (físicos, químicos, biológicos) pueden ser explicados en base a los quarks de sabores u y d, los electrones y los neutrinos-e. Esta familia se denota (u, d, e, ν_e). (Se parte de la ~~base~~ ^{base} que siempre existen las 'partículas de gauge' o sea, los gluones y bosones intermedarios). Sin embargo en la naturaleza existen por lo menos dos réplicas adicionales de esta familia y que son: (c, s; μ , ν_μ) y (t, b; ζ , ν_ζ). Estas familias difieren de la familia base por las masas y en el hecho que definen nuevos sabores, pero no se sabe

(7) La gravitación, por el momento, no es considerada en física de partículas por dos razones básicas. Primero, porque no existe tecnología imaginable que permita medir los pequeñísimos efectos que esta interacción tendría a nivel de una pocas partículas del tipo de las que estamos hablando en este artículo. La segunda razón es que no se sabe cómo hacer una teoría microscópica —y por lo tanto cuántica— de la gravitación. Aun así, hay ciertas formulaciones con las que se está intentando incorporar gravitación en una "superunificación" de todas las interacciones conocidas.

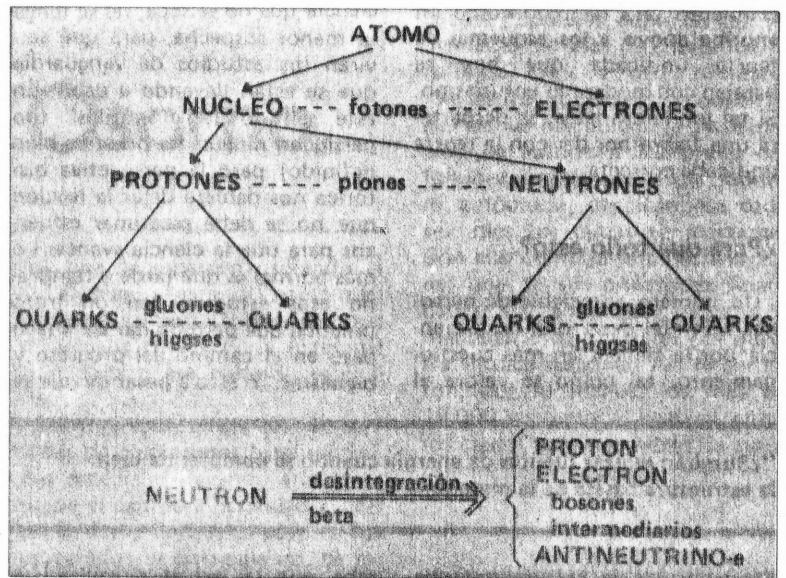


Figura 1. En este árbol cada objeto (átomo, protón etc.) está compuesto de las partículas que le siguen hacia abajo por medio de flechas sólidas (—————>). Los componentes de cada objeto están cohesionados por fuerzas que se deben predominantemente a la existencia de las partículas que aparecen en la correspondiente línea punteada. Aunque parezca paradójal, las partículas que producen las fuerzas de cohesión (fotones, piones etc.) no están "realmente presentes" en aquel objeto y por lo tanto no deben ser contadas como componente. Neutrinos o antineutrinos no aparecen en el árbol de composición del átomo pero un neutrón libre (fuera del núcleo de un átomo) se desintegra en la forma que indica la figura y ahí sí aparece un antineutrino. Otra peculiaridad del mundo subnuclear es que los productos de una desintegración no son componentes del objeto desintegrado.

para qué existen. Se espera que al surgir una teoría unificada se resolverá esta interrogante.

Mencionemos tangencialmente que el tercer ganador del Premio Nobel de Física 1979, S. Glashow, postuló la existencia del cuarto sabor c, en 1970, con lo que completó la segunda familia. La existencia de c fue ratificada en 1974 al descubrirse el hadrón J/psi que aparece en el cuadro N° 2. En 1976 el mismo autor y sus colaboradores postularon la existencia de los sabores b y t debido al descubrimiento de los leptones tau en 1975. El sabor b quedó confirmado en 1977 al descubrirse la partícula upsilon.

Se piensa que de existir una teoría unificada ella debe ser una teoría de gauge, pero basada en una simetría que abarque toda la simetría de la Cromodinámica Cuántica y de la Dinámica Cuántica de Sabor. Para abarcar ambas simetrías es necesario que existan nuevas simetrías que hagan de ne-

xo entre las dos teorías que se tiene actualmente. Por razones técnicas esto implica que debe existir toda una rica variedad de nuevos tipos de partículas básicas y de fuerzas. Sin embargo, no hay el menor indicio experimental de ellas, por lo que la gran unificación no es más que una mera especulación por el momento. La única explicación de por qué esas nuevas partículas —o efectos indirectos de ellas— no hayan sido detectados es que sean partículas ultrapesadas. La esperanza actual de poder avanzar en este sentido, reside en ciertos cálculos preliminares basados en posibles teorías unificadas. Estos cálculos predicen un efecto que puede ser detectado con tecnología presente. El nuevo efecto sería que el tiempo de vida del protón no sería infinito, como siempre se ha creído y aceptado, sino que sería enorme, pero finito y detectable. De llegarse a tener pruebas experimentales de la inestabilidad del protón, el descu-

brimiento será recibido como un enorme apoyo a los esquemas de teoría unificada que hoy se barajan con moderado entusiasmo. Si tal momento llega, se despertará una fiebre por dar con la teoría unificada correcta.

¿Para qué todo esto?

Un número apreciable de personas valora el desarrollo de la ciencia por la ciencia sin más cuestionamiento, tal como se valora el

ciencia que no se sepa, no se tenga la menor sospecha, para qué servirán los estudios de vanguardia que se están llevando a cabo. En este sentido son "inútiles" (no persiguen ningún fin práctico bien definido) pero la perspectiva histórica nos debiera dejar la lección que no se debe escatimar esfuerzos para que la ciencia avance. Lo más normal es que tarde o temprano esos estudios den un fruto práctico que permita dar un nuevo paso en el camino del progreso y bienestar. Y esto a pesar de que se

También sería muy largo explicar la incidencia potencial o real de la investigación científica en nuestras universidades, sobre la educación escolar y sobre el desarrollo cultural de todo el país. Sería también necesario contrastar nuestra modesta tradición histórica en investigación en diversas áreas con la menguada o inexistente (en ciertos casos) actividad actual en investigación. El tema es tan largo y toca aspectos tan diferentes que tal vez un solo artículo totalmente dedicado a esta problemática no sería suficiente.

Volviendo a la pregunta original que nos planteamos, respondamos claramente: no se sabe qué fin práctico podrá tener comprender la estructura básica de la materia. Pero, ¿ha existido algún pueblo civilizado que haya renunciado al anhelo de comprender los misterios fascinantes de nuestro universo?

"¿Surgirán nuevas fuentes de energía cuando se comprenda bien la estructura básica de la materia?"

desarrollo de la cultura por ella misma sin buscar rentabilidad u otro tipo de utilitarismo. Pero no podemos borrar de una plumada la cuestión. La pregunta sobre la utilidad práctica de lo que estamos haciendo es un tema siempre recurrente, por lo que este es una buena oportunidad para ensayar un boceto de respuesta. ¿Para qué Ticho Brahe gastó su vida midiendo la posición de los planetas en el cielo? Esos datos fueron fundamentales para que Kepler formulara sus leyes del movimiento planetario y para que

sabe que la industria militarista mundial es de las más ágiles para aprovechar los avances científicos en cualquier área (desde las ciencias sociales hasta las más básicas ciencias naturales), y los científicos (40 ó 50% de ellos en el mundo (8)) no son ajenos a este ingrato papel.

El párrafo anterior es una pequeña parte de lo que podría ser una respuesta a la pregunta que nos hemos planteado. No nos es posible, en un artículo de esta longitud, hablar sobre otros aspectos como el papel social que cumple

"...¿ha existido algún pueblo civilizado que haya renunciado al anhelo de comprender los misterios fascinantes de nuestro universo?"

luego Newton planteara su teoría gravitacional. Brahe no lo sabía. ¿Para qué se estudió por generaciones los fenómenos eléctricos y magnéticos? ¿era posible anticipar en ese entonces la utilidad que tendría en este siglo la era eléctrica primero y electrónica después? ¿Sabían que el electromagnetismo iba a ser fundamental para comprender la estructura atómica? No lo sabían ¿Surgirán nuevas fuentes de energía cuando se ~~comprueba~~ ^{comprenda} bien la estructura básica de la materia? Tal vez, quién sabe... Es muy común en

la investigación en un país como Chile. Sería demasiado extenso, por ejemplo, hablar sobre la importancia de tener estudios originales del más alto nivel, en las más variadas materias, como parte de la lucha por salir del subdesarrollo. O indicar la compleja relación que existe entre ciencia, tecnología y desarrollo, particularmente, en casos como los que se presentan en países latinoamericanos.

(8) H. Alfvén, "Science, progress and destruction" en The Bulletin of the Atomic Scientist, marzo, 1979.

comprenda