

## Ese rompecabezas llamado protón



Los experimentos a muy altas energías que se realizan en los grandes aceleradores de partículas muestran que el protón se comporta como un rompecabezas que no es fácil desarmar. ¿Por qué?

Jesús Guillermo Contreras Nuño

Los rompecabezas me han fascinado desde la primera vez que jugué con uno. Al armarlos siempre he sentido que estoy contándome a mí mismo una historia desconocida, que pieza a pieza va descubriendo, formando y transformando su propia trama hasta crear una historia nueva.

Cuando era niño, alguien me platicó acerca de los atomistas griegos. Aquellos pensadores que decían que todo el universo estaba formado de pequeñas piececitas indivisibles. Inevitablemente esta idea cautivó mi imaginación: cada cosa a mi alrededor no es más que un rompecabezas fantásticamente complejo y, sin embargo, como todo rompecabezas, increíblemente sencillo. ¿Cuántas piezas hay?, ¿cómo se juntan?, ¿estará el rompecabezas del universo ya totalmente terminado, o todavía está en construcción?, ¿cuál será la historia

que cuente cuando todas las piezas estén finalmente en el lugar que les corresponde?

Las analogías con mi entretenimiento favorito parecían no acabar, y algunas de ellas me llevaban a pensamientos fascinantes: ¿quién diseñó el rompecabezas?, ¿quién hizo las piezas?, ¿quién las une? Y aún más: ¡yo soy parte de este rompecabezas! ¿Qué pieza seré? ¡Y qué curioso que una pieza se pueda hacer este tipo de preguntas! Qué juguete tan divertido pareciera ser el mundo.

Algún tiempo después me enteré que el espíritu atomista seguía vivo en la descripción moderna de lo que nos rodea. Bosques de árboles, árboles hechos de madera y ésta a su vez formada de moléculas. Los átomos —por fin encontraba a mis recién conocidos—, las piezas con las que se arman moléculas. Y todos esos diferentes átomos, muchos de los cuales ya conocía desde antes —oro, plata, carbono, cobre, aluminio, oxígeno— en fin, todos esos átomos estaban constituidos por protones, neutrones y electrones.

La idea de que aparentemente el mundo podía verse como un rompecabezas me impresionó desde aquel entonces por su

simplicidad y belleza. Y nuestra descripción de la naturaleza todavía tiene otros giros sorprendentes e inesperados. Al mirar más a fondo se encuentra que el protón mismo tiene una estructura interna, pero a diferencia de los rompecabezas tradicionales, donde las piezas, una vez que se encuentran en su lugar, se quedan ahí quietecitas, en el protón no ocurre esto. Sus componentes, llamados *quarks* y *gluones*, están en movimiento incesante. Además, también aparecen y desaparecen todo el tiempo y, sin embargo, como por arte de magia, a pesar de este ir y venir, ser y no ser, el protón no pierde su identidad.

No sólo eso: este rompecabezas es tan raro que, una vez terminado, no puede uno desarmarlo. Si uno lo intenta, lo más que consigue es transformar este rompecabezas en otros diferentes, pero no lo puede desarmar: las piezas que lo forman no pueden existir en el mundo actual en forma independiente. Se cree que hace mucho tiempo, al inicio del universo, se formaron los protones, neutrones y partículas similares y desde entonces no existen quarks y gluones libres en la naturaleza. A esta propiedad se le llama “confinamiento”. ¿Cómo es posible que el protón tenga este comportamiento? La explicación cuantitativa es muy complicada, pero las ideas pueden entenderse cualitativamente con relativa facilidad. Para esto se requiere entender los siguientes conceptos: quarks, neutralización del color, gluones e interacciones. Todos ellos se explican a continuación.

## QUARKS

Hay seis tipos diferentes de quarks a los cuales se les han dado los siguientes nombres (o “sabores”, en la terminología de los físicos): arriba, abajo, extraño, encanto, cima y fondo, o por sus nombres originales en inglés: *up* (u), *down* (d), *strange* (s), *charm* (c), *top* (t) y *bottom* (b). El uso de la palabra “sabor” no tiene nada que ver con el significado cotidiano de la palabra; es sólo una etiqueta arbitraria. Al igual que el electrón, cada quark tiene su masa y su carga eléctrica. Las asignaciones correspondientes a cada sabor se encuentran en el cuadro 1.

Además de la carga eléctrica, existe una nueva carga, a la que se ha llamado “color”. A diferencia de la carga eléctrica, de la cual sólo hay una, hay tres tipos diferentes de cargas de color a las cuales se les asignan normalmente los nombres *roja*, *azul* y



Se cree que hace mucho tiempo, al inicio del universo, se formaron los protones, neutrones y partículas similares y desde entonces no existen quarks y gluones libres en la naturaleza. A esta propiedad se le llama “confinamiento”

**CUADRO 1.**

Asignaciones de carga eléctrica y masa para los diferentes sabores de masa:  
 1 megaelectronvolt =  $1.78 \times 10^{-30}$  kilogramos.

Sabor	Abreviatura	Carga eléctrica	Masa (megaelectronvolts)
<i>up</i>	u	+2/3	4
<i>down</i>	d	-1/3	8
<i>strange</i>	s	+2/3	150
<i>charm</i>	c	-1/3	1300
<i>top</i>	t	+2/3	178 000
<i>bottom</i>	b	-1/3	4 000

Una nota curiosa es que los antiquarks no solamente tienen la carga de color opuesta a la de sus quarks correspondientes, sino que también tienen la carga eléctrica opuesta

*verde*. Al igual que con el término sabor, este nombre es sólo una etiqueta, aunque en este caso sí hay una analogía con el uso común de la palabra, como se verá más adelante. Como ocurre en el caso de la carga eléctrica, cada carga de color puede tomar valores positivos y negativos. El electrón tiene carga eléctrica -1. Un quark *u* dado tiene una de las cargas de color, digamos roja, y tiene una unidad positiva de esta carga: +1 roja. Como los quarks siempre tienen sólo una unidad de carga, normalmente se omite el +1 y se dice quark *u* rojo (o quark *u* verde o quark *u* azul, según corresponda).

En forma similar al electrón, cuando la carga eléctrica cambia de signo no se habla de un electrón con carga eléctrica +1, sino que se le da un nuevo nombre a la partícula; en este caso, *positrón*. Así, no se dice que un quark *u* tiene carga -1 roja, sino que se habla de un antiquark *u* y su carga de color es *antirroja*. Una nota curiosa es que los antiquarks no solamente tienen la carga de color opuesta a la de sus quarks correspondientes, sino que también tienen la carga eléctrica opuesta. De esta manera un quark *u* rojo tiene carga eléctrica +2/3, y el antiquark *u* de color antirrojo tiene carga eléctrica -2/3.

**NEUTRALIZACIÓN DE COLOR**

Como en el electromagnetismo, la suma de cargas opuestas neutraliza la carga. Por lo tanto un átomo de hidrógeno es eléctricamente neutro, ya que está formado por un protón con carga eléctrica +1 y un electrón con carga eléctrica -1, dando una carga total de +1-1 = 0. De la misma manera se puede neutralizar el color. Esto es, si se tiene un quark rojo y uno antirrojo, el sistema compuesto es neutro, sin color. Realmente no se utiliza la expresión “de color neutro”; en lugar de ello se dice que

el sistema es “blanco”. A diferencia del caso electromagnético, donde la única forma de obtener un sistema neutro es tener el mismo número de cargas positivas que negativas, hay dos formas de obtener un sistema blanco. La primera ya la mencionamos: tener el mismo número de cargas de color positivas y negativas, el mismo número de quarks rojos que antirrojos, verdes que antiverdes, azules que antiazules. La segunda forma de obtener un sistema blanco es con la misma cantidad de cargas rojas que de verdes y de azules (o antirrojas, antiverdes y antiazules). Por ejemplo, si se tiene un sistema de tres quarks de los cuales uno es verde, otro es rojo y el tercero es azul, entonces el sistema en su conjunto es blanco.

Esta segunda forma de neutralizar la carga recuerda el disco de Newton, el cual está dividido en tres secciones del mismo tamaño, cada una de ellas pintada con uno de los colores primarios. Al hacer girar el disco, el ojo no percibe cada uno de los colores, sino una mezcla de ellos y por lo tanto lo que se ve es un disco blanco. Es por ello que a la carga que portan los quarks se le llama color; a cada una de sus manifestaciones se le asigna un color básico y a su mezcla en proporciones iguales se le dice blanco. Hay una regla de la naturaleza que exige que todas las partículas tienen que ser blancas. Nadie entiende el origen de esta regla, pero es claro que implica por un lado que no se pueden ver quarks independientes, pues éstos no son blancos y, por otro lado, que los protones y neutrones que forman los núcleos atómicos tienen que estar formados de una combinación de quarks y antiquarks tal que la suma genere una partícula blanca.

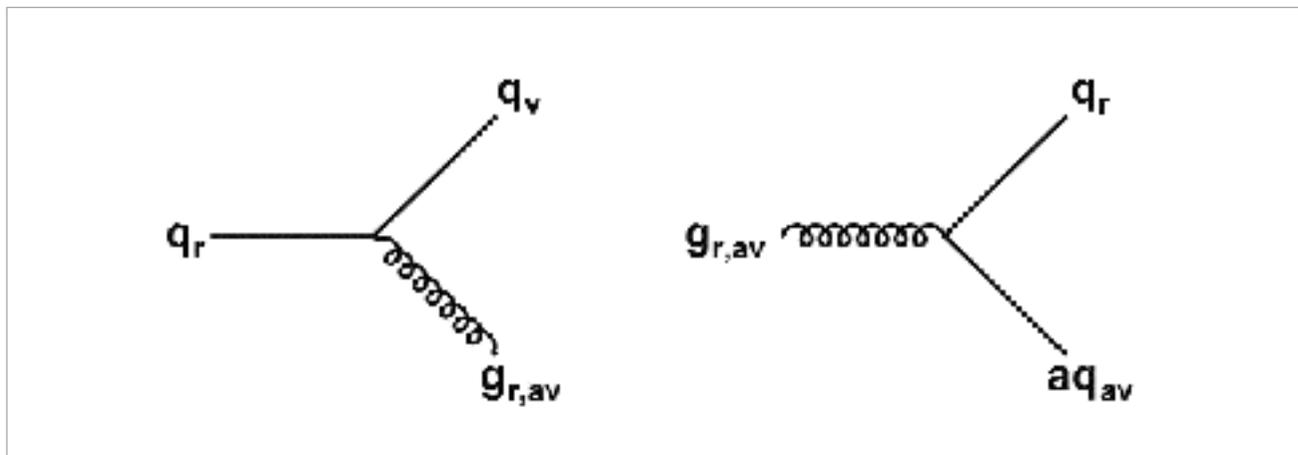
## GLUONES E INTERACCIONES

Pero ésta no es toda la historia, pues además están los gluones: hay ocho diferentes y ninguno tiene masa ni carga eléctrica, pero todos tienen cargas de color. Para ser más precisos, tienen una carga que es una combinación de cargas de color. Tenemos gluones con las siguientes seis cargas: roja-antiverde, roja-antiazul, verde-antirroja, verde-antiazul, azul-antirroja y azul-antiverde. Los dos gluones restantes tienen combinaciones de carga que involucran a todos los colores, ya que son una mezcla de rojo-antirrojo, verde-antiverde y azul-antiazul tal, que la combinación total en un gluón dado no es blanca. Esto es, tienen todos los colores, pero no en las mismas proporciones. Como tanto los quarks como los gluones tienen color, interactúan entre ellos. Los dos tipos de interacción básica más sencillos son:

1. Un quark emite un gluón y al hacerlo cambia su energía y su color: por ejemplo, un quark rojo se convierte en un gluón rojo-anti-verde y otro quark de color verde. La energía del quark rojo es la suma de las energías del gluón y del quark verde. Nótese que las cargas eléctrica y de color también se conservaron. Esta interacción es completamente equivalente a la emisión de luz por un electrón.

2. Un gluón emite un par quark antiquark. Por ejemplo, un gluón rojo-antiverde emite un quark rojo y un antiquark antiverde. Esta interacción corresponde a la creación de un par electrón-positrón a partir de un fotón.

Además están los gluones:  
hay ocho diferentes  
y ninguno tiene masa  
ni carga eléctrica,  
pero todos tienen  
cargas de color



**Figura 1.** Diagramas de los dos procesos básicos mencionados en el texto. La  $q$  se refiere a quark, la  $g$  a gluón, los subíndices se refieren a los colores y la letra  $a$  a "anti".

Asimismo, existen los procesos opuestos: un quark puede absorber a un gluón y también un par quark antiquark se puede recombinar para producir un gluón. Una representación gráfica de lo antes descrito se muestra en la figura 1. Además, hay interacciones que involucran a tres o a cuatro gluones. Estas últimas interacciones no tienen contraparte en el electromagnetismo, y son las causantes de que la interacción de color sea de corto alcance y no sea perceptible directamente en la naturaleza en las escalas cotidianas de un humano. Finalmente, cabe resaltar que el conjunto de estas interacciones tiene además la propiedad de producir confinamiento, y que este fenómeno es el responsable de que el protón no pueda ser desarmado. Este extraño comportamiento se analizará más adelante.



### ARMANDO EL PROTÓN

Ahora sí estamos listos para entender cualitativamente cómo un protón puede estar compuesto de partículas que cambian de color, que van y vienen, que aparecen y desaparecen y sin embargo mantiene siempre su identidad. La primera característica que queremos reproducir es su carga eléctrica de +1. Para obtener este número, y revisando el cuadro 1, notamos que necesitamos al menos tres quarks o un quark y un antiquark (recuerde que los antiquarks tienen la carga eléctrica opuesta al quark del mismo sabor). Por otro lado, sabemos que el protón es relativamente ligero en comparación con otras partículas que se han detectado experimentalmente, así que probaremos construirlo a partir de los quarks  $u$  y  $d$ .

Resulta que existe una partícula que se puede construir con carga eléctrica +1 y usando quarks y antiquarks  $u$  y  $d$ . Se le llama *pión*. Así que tomemos la otra opción y empecemos con un protón formado solamente de tres quarks a los que, para simplificar, les asignaremos la misma energía, correspondiente a un tercio de la energía total del protón original. Por ejemplo, un quark  $u$  verde, uno  $d$  rojo y uno  $u$  azul. La carga eléctrica da uno, y el color es blanco; exactamente como se necesita.

Ahora imaginemos que el quark verde emite un gluón verde-antiazul. Si vemos en este momento al protón, éste no estará formado ya de tres quarks, cada uno de un color, sino de tres quarks y un gluón; además, dos de los quarks serán azules. Y sin embargo la carga total sigue siendo uno y el color blanco. No sólo eso; la energía ya no estará distribuida igual en cada quark, pues el nuevo quark azul tiene menos energía que el quark verde original y la diferencia en energía la lleva el gluón.

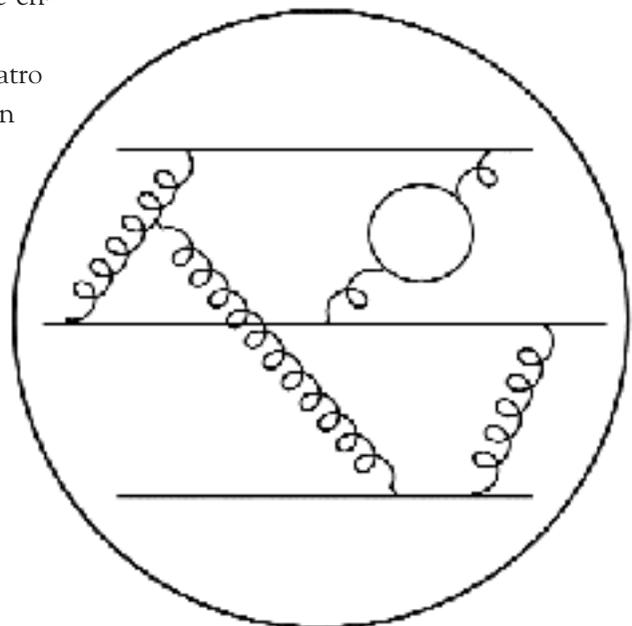
Ahora imaginemos que ese gluón emite un par quark-antiquark, y que en ese momento vemos al protón. Ahora lo que vemos son cuatro quarks y un antiquark, pero ni la energía total, ni las cargas totales de color y eléctrica han cambiado. Esto es, sigue siendo la misma partícula. Además nótese que este par quark-antiquark puede ser  $u$ -anti- $u$  o  $d$ -anti- $d$  o incluso  $s$ -anti- $s$  o de cualquier otro sabor. Sólo que los sabores más pesados son más difíciles de producir, por lo que normalmente sólo se encuentran en el protón los sabores más livianos.

Esta combinación de cinco quarks (o más bien de cuatro quarks y un antiquark) se ha descubierto recientemente en varios laboratorios; es muy parecida a los protones, pero más pesada. Se les ha dado el nombre de *pentaquarks*. Es claro que este juego se puede extender y complicar tanto como uno quiera al incluir este tipo de comportamiento en los tres quarks originales a la vez y repetir muchas veces el razonamiento anterior. Una configuración posible del protón se muestra en forma esquemática en la figura 2, usando los diagramas de la figura 1.

### DESARMANDO AL PROTÓN

Se mencionó anteriormente que la fuerza de color produce el fenómeno llamado confinamiento. Una forma pictórica de explicar este comportamiento es imaginarse lo que pasa con la cuerda, la cual es jalada desde ambos extremos a la vez. Al inicio, y si los extremos están más cercanos que la longitud de la cuerda misma, uno puede jalarlos sin grandes contratiempos. Una vez que

la separación es del tamaño de la cuerda empiezan los problemas y por más que uno jala no pasa nada, los extremos no se separan más. Pero, ¿qué pasa si alguien realmente fuerte jala? Eventualmente el jalón será tan fuerte que la cuerda se romperá y nos quedaremos con dos pedazos de cuerda, cada uno con sus dos extremos. Los extremos originales están separados, pero hay extremos de cuerda nuevos que siguen estando cercanos. Esto es, uno no puede obtener un extremo de la cuerda aislado, separado de la cuerda y del otro extremo. Así es el confinamiento cuando uno intenta sacar una pieza del protón: otras piezas nuevas aparecen.



**Figura 2.** Un esquema de la dinámica de los componentes básicos que forman al protón construido con los diagramas básicos mencionados en el texto.

Veamos un ejemplo sencillo. Supongamos que jalamos un quark  $u$  del protón. Como el quark está “amarrado” al protón, necesitaremos energía para poder sacarlo. El problema es que se necesita muchísima energía, pero ya a inicios del siglo XX Einstein había notado que la energía se puede convertir en masa, y por ende en partículas. La energía que uno necesita para separar este quark  $u$  es tan grande que se convierte en un par quark-antiquark, digamos  $u$ -anti- $u$ . Entonces tendremos que el nuevo anti- $u$  se puede unir al  $u$  inicial para formar un pión neutro, y el quark  $u$  nuevo se queda en el protón, por lo que al final quedamos con un protón y un pión neutro.

Otro ejemplo: si en lugar de producir un par  $u$ -anti- $u$ , se produce un par  $d$ -anti- $d$ , y el anti- $d$  se une al  $u$  inicial, se forma un pión con carga eléctrica  $+1$ , y el nuevo quark  $d$  queda en lugar del quark  $u$ . Si uno suma la nueva carga eléctrica de la partícula que quedó en lugar del protón, se formó un neutrón y además nos quedamos con un pión positivo extra.

Imagínese tener  
un rompecabezas  
que al querer desarmarlo  
para ver cómo está hecho,  
produzca otros  
rompecabezas nuevos  
para mantenerlo  
a uno entretenido

Es claro que este juego también puede extenderse y complicarse como uno quiera. Si hay muchísima energía disponible y se jalan todos los quarks a la vez, puede producirse gran cantidad de partículas. Esto no son solamente ideas: todo ha sido comprobado experimentalmente.

En resumen, se necesita tanta energía para desarmar un protón que esta energía primero crea más quarks y estos quarks nuevos —junto con los que ya existían en el protón— se distribuyen para formar partículas, de manera que no queda ni un quark aislado. Imagínese tener un rompecabezas que al querer desarmarlo para ver cómo está hecho, produzca otros rompecabezas nuevos para mantenerlo a uno entretenido. Suena divertido, ¿no?

## EPÍLOGO

Con este tipo de ideas, que además son aplicables a la descripción de otras partículas como los piones y neutrones, vemos que al menos en forma cualitativa podemos entender una naturaleza en la cual el protón es indesarmable y donde el número de quarks y gluones que lo forman cambia continuamente al igual que cambia también el sabor, color y la energía de cada uno de ellos. Y, sin embargo, a pesar de este incesante devenir, nunca pierde su identidad este rompecabezas fascinante al que llamamos protón.

Para el lector más interesado en explorar estos temas con mayor detalle, sugiero las siguientes direcciones electrónicas:  
H1: <http://www-h1.desy.de/general/home/home.html>  
<http://particleadventure.org/particleadventure/>

---

**Jesús Guillermo Contreras Nuño** es investigador titular del Departamento de Física Aplicada de la Unidad Mérida del Centro de Investigación y Estudios Avanzados. Obtuvo su doctorado en Ciencias en la Universidad de Dortmund, Alemania. Su especialidad es la física experimental de altas energías, y participa desde hace varios años en la Colaboración H1, que realiza sus experimentos en el laboratorio alemán DESY. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.  
[jgcn@amapola.mda.cinvestav.mx](mailto:jgcn@amapola.mda.cinvestav.mx)