

El descubrimiento de la libertad asintótica: el premio Nobel de Física 2004

Jesús Guillermo Contreras

La fuerza electromagnética es la base de nuestra tecnología, y como tal su uso se encuentra en todos los rincones de nuestras casas, desde un foco hasta una computadora; desde un imán en la puerta del refrigerador al láser en el reproductor de discos compactos. Todos éstos, y muchos más, son los frutos que nuestra sociedad ha recogido por haber logrado entender esta fuerza en su nivel más fundamental. Este entendimiento está basado en la existencia de una teoría, llamada electrodinámica cuántica, que permite a los científicos calcular el comportamiento de sistemas electromagnéticos con gran precisión.

Sin embargo, la electromagnética no es la única fuerza de la naturaleza. Hasta donde se sabe hoy, hay cuatro fuerzas básicas: la gravitación, el electromagnetismo y las fuerzas débil y fuerte. El premio Nobel de Física 2004 reconoce la aportación hecha por David Gross, del Instituto Kavli de Física Teórica, en la Universidad de California, en Santa Barbara; David Politzer, del Instituto Tecnológico de California, en Pasadena; y Frank Wilczek, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, en Cambridge, Estados Unidos, al entendimiento de la fuerza fuerte. Gracias a su descubrimiento de la libertad asintótica ha sido posible construir una teoría exitosa de esta interacción. A esta teoría se lo conoce como cromodinámica cuántica.

LA FUERZA FUERTE ANTES DE 1950: PRIMEROS INTENTOS Y FRACASOS

Los experimentos de Rutherford a inicios del siglo XX demostraron que los átomos tienen un núcleo muy pequeño y muy pesado. Para la década de los treinta ya se había descubierto que el núcleo atómico está formado por protones y neutrones. Al tener los protones carga eléctrica positiva –recordemos que cargas iguales se repelen– surge de manera natural la pregunta de qué es lo que mantiene unido al núcleo y evita que los protones se separen. A esta fuerza, la cual tiene que ser mucho más poderosa que la repulsión electromagnética, se le llamó fuerza fuerte.

En 1935 el físico japonés Hideki Yukawa (premio Nobel de Física 1949) propuso una teoría de la fuerza fuerte que tenía varias características muy atractivas, entre otras la predicción de una partícula nueva, hoy conocida como pión y que fue descubierta en 1947 por Cecil Powell, trabajo por el cual recibió el premio Nobel de Física de 1950. A pesar de sus virtudes, la teoría propuesta por Yukawa tenía un gran defecto: no podía utilizarse consistentemente para describir los datos experimentales.

El problema es el siguiente: en general, las ecuaciones postuladas por una teoría cuántica de campos no pueden ser resueltas en forma exacta. En estos casos, lo que se busca es la solución a un problema que sea si-

milar al problema original, pero más sencillo. Se dice entonces que se tiene una aproximación. Una de las formas de hacer la aproximación es desarrollar la teoría original en una suma infinita de términos elevados a potencias cada vez más grandes. Si se puede garantizar que cada término es menor que la unidad, entonces los términos elevados a potencias grandes no contribuyen mucho a la suma total y pueden despreciarse. Normalmente este tipo de expresiones se organizan de forma que la suma se pueda escribir como $\sum \alpha^n S_n$, donde α es la carga y representa qué tan fuerte es la interacción. Para la teoría de Yukawa, $\alpha > 1$, por lo que la suma diverge.

LA FUERZA FUERTE DE 1950 A 1970: QUARKS, COLOR Y ESCALAMIENTO

Durante los primeros años de este periodo se descubrieron muchísimas partículas que interactuaban a través de la fuerza fuerte, por lo que el problema se complicó. Ya no sólo había que explicar qué pasaba en los núcleos atómicos, sino también todas las reacciones entre las nuevas partículas.

A inicio de los sesenta se descubrió que muchas de estas nuevas partículas eran estados excitados. Esto implica que estas partículas son compuestas, y que los orígenes de la fuerza fuerte tenían que buscarse en esos entes más fundamentales que las constituyen.

Murray Gell-Mann, premio Nobel de Física 1969, y George Zweig propusieron en 1964 que todas las partículas que interactúan a través de la fuerza fuerte están formadas ya sea por tres quarks o por un par quark-antiquark. Este modelo tuvo un éxito fenomenal, pues consiguió ordenar todas las partículas conocidas en aquel entonces dentro de este esquema. Poco tiempo después, y para resolver un problema de una potencial violación al principio de exclusión de Pauli, se llegó a la conclusión de que los quarks tenían tres tipos diferentes de carga. A éstas se les dio los nombres de *verde*, *azul* y *roja*, mientras que a la carga de la fuerza fuerte se le llamó en general *color*. Este modelo trata a los quarks como componentes estáticos de las partículas. La carrera por generalizar estas ideas y encontrar así una teoría dinámica de la fuerza fuerte estaba abierta.

En 1967, en el acelerador SLAC de Standford, empezaron a realizarse una serie de experimentos que hi-

cieron historia (premio Nobel de Física 1990 para Friedmann, Kendall y Taylor). En ellos se realizaban colisiones entre un electrón y un protón a altísimas energías, de manera que la estructura del protón quedaba al descubierto. La planeación y realización de estos experimentos impulsó a los físicos teóricos a intentar entender este tipo de procesos en la forma más general posible. Fue así que en 1969, J. D. Bjorken, extendiendo trabajo previo de Callen y Gross, propuso la idea de escalamiento.

El escalamiento dice que la descripción del choque entre el electrón y el protón a altas energías no debe depender de dos variables, sino solamente de una. En el mismo año, Richard Feynman (premio Nobel de Física 1965) explicó el escalamiento como la colisión de un electrón con un componente puntal del protón al cual él llamó partón, y que más adelante se identificaría con los quarks. El escalamiento fue comprobado por los experimentos de SLAC, convirtiéndose así en el ingrediente faltante para el nacimiento de la cromodinámica cuántica.

En 1967, en el acelerador SLAC de Standford, empezaron a realizarse una serie de experimentos que hicieron historia. En ellos se realizaban colisiones entre un electrón y un protón a altísimas energías

LA FUERZA FUERTE DE 1970 A 1973: FUNCIÓN BETA Y LIBERTAD ASINTÓTICA

Así, el reto en 1970 era encontrar una teoría dinámica de la fuerza fuerte que pudiera explicar el escalamiento. En ese año, Symanzik demostró que sólo aquellas teorías que tuvieran una función beta negativa eran capaces de describir el escalamiento. La función beta está relacionada con el cambio en el valor numérico de la carga con la distancia.

Anteriormente se mencionó que en la suma $\sum \alpha^n S_n$, α representa la carga. Sin embargo, en teorías cuánticas de campos la carga no es constante, sino que es una función de la distancia entre la carga a medir y la carga de prueba. El origen de este comportamiento es que en este tipo de teorías el vacío es dinámico. Esto es, el vacío está lleno de fluctuaciones cuánticas que hacen que continuamente aparezcan y desaparezcan cargas alrededor de la carga a medir, y por tanto la carga de prueba detecta una carga efectiva que es la superposición de la carga original y las fluctuaciones del vacío. En el electromagnetismo, la función beta es positiva, y eso quiere decir que el valor de la carga electromagnética disminuye con la distancia. Esto tiene sentido, pues como se mencionó anteriormente, la carga representa qué tan fuerte es la interacción, y sabemos que mientras más distantes están dos cargas electromagnéticas, la fuerza entre ellas es menor.

La sorpresa es que una función beta negativa quiere decir exactamente lo contrario: la fuerza se debilita al acercarse las cargas de color. Esto es similar al comportamiento de una banda elástica: si no está estirada, no hay una fuerza entre sus extremos. Como en teorías cuánticas las distancias pequeñas corresponden a altas energías, este comportamiento corresponde a que mientras más alta es la energía del proceso que detecta a la fuerza fuerte, menos fuerte es esta fuerza. Esto implica que para energías altas α es menor que la unidad y por tanto la suma $\sum \alpha^n S_n$ puede ser aproximada por los primeros términos únicamente. En el límite de energía infinita, la fuerza fuerte no existiría y las cargas de color serían libres. De ahí el nombre de libertad asintótica.

Los grupos líderes en esta área de la física se dieron a la tarea de buscar teorías estables donde la función beta fuera negativa. Durante un congreso en 1972, y a pregunta expresa de Symanzik, t'Hooft (premio Nobel de Física 1999) escribió en el pizarrón una función beta negativa; sin embargo ninguno de los dos dio seguimiento a este punto, ni lo publicó, por lo que el resto de la comunidad no se enteró de este avance. En 1973 dos grupos encontraron que las teorías basadas en grupos no abelianos cumplían los requisitos, y ambos publicaron simultáneamente sus resultados. David Pulitzer, estudiante de doctorado de Sidney Coleman, en Harvard, fue el autor de una de estas publicaciones (Coleman no fue coautor). El otro artículo fue firmado por David Gross y su estudiante Frank Wilczek, ambos en ese entonces en Princeton. Poco después estos trabajos se extendieron y por fin nació una teoría aceptable de la fuerza fuerte: la cromodinámica cuántica.

LA FUERZA FUERTE EN NUESTROS DÍAS

Durante los 30 años que han transcurrido desde entonces a la fecha, las técnicas para calcular parámetros observables en cromodinámica cuántica y los experimentos para medirlos han avanzado muchísimo. Ya hay casos donde el acuerdo teoría/experimento alcanza unas partes por cada mil o incluso por cada diez mil. El cambio en el valor de la carga de color se ha medido en un intervalo de poco más de dos órdenes de magnitud y coincide perfectamente con el predicho por el cálculo de la función beta. En nuestros días, la cromodinámica cuántica es una teoría madura y exitosa que nos ha llevado a entender más a fondo la estructura de la materia y que ha abierto nuevos horizontes en la búsqueda de una teoría que abarque todos los fenómenos de la naturaleza.

Jesús Guillermo Contreras.
Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-Mérida