

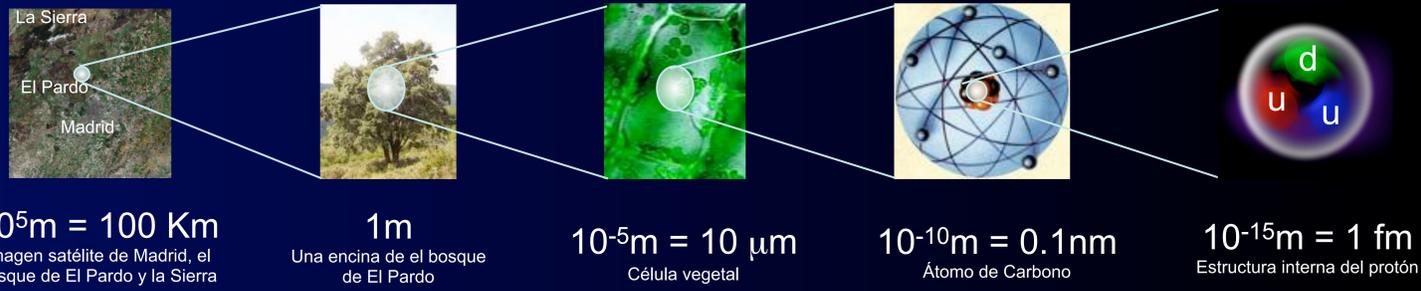
¿De qué estamos hechos?

Todo lo que nos rodea está formado por átomos, compuestos de núcleos (formados por protones y neutrones), alrededor de los cuales orbitan los electrones.

Los protones y neutrones están a su vez formados por partículas más pequeñas, los quarks. Los quarks y los electrones son ejemplos de partículas elementales, ya que no están compuestas de otras más pequeñas (hasta donde se ha podido explorar experimentalmente).

Existen 6 tipos de quarks (denominados u, d, c, s, t, b), pero basta con los quarks u y d para formar los protones (con un tríu uud) y los neutrones (udd).

Con sólo tres partículas: electrones, quarks u y quarks d se construyen todos los átomos

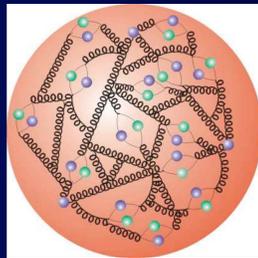


Cromodinámica Cuántica (QCD): la fuerza de color

¿Cómo se mantienen unidos los quarks?

Los quarks se mantienen unidos debido a la interacción fuerte. La carga asociada a esta interacción es un nuevo número cuántico, denominado "color", y que toma tres posibles valores: "rojo", "verde" y "azul".

Los mediadores de la fuerza de color son 8 partículas de interacción, los gluones, que como los fotones tiene masa nula y spin 1. Sin embargo, los gluones tienen carga de color y por tanto están confinados por la propia interacción fuerte, haciendo que tenga un alcance de aproximadamente 10⁻¹⁵ m, el tamaño de un protón.



La masa y su misterio

Prácticamente toda la masa de los átomos se debe a la masa de sus núcleos, y ésta, a la de los protones y neutrones que los forman.

Sin embargo, los quarks u y d tienen una masa tan pequeña que sólo reproducen el 1% de la masa de un protón o un neutrón.

La masa adicional está asociada a la energía de los campos de fuerza de color presentes en el interior de protones y neutrones, que mantienen los quarks y gluones unidos entre sí.

Los 8 gluones

Los gluones portan una combinación de color y anticolor. Hay 9 combinaciones posibles, pero sólo 8 corresponden a gluones. Para entenderlo, describimos los gluones como matrices que realizan transformaciones de los quarks en el espacio de color, con coordenadas (rojo, verde, azul):

$$\begin{pmatrix} r\bar{r} & r\bar{v} & r\bar{a} \\ v\bar{r} & v\bar{v} & v\bar{a} \\ a\bar{r} & a\bar{v} & a\bar{a} \end{pmatrix}$$

La combinación que no corresponde a un gluón es la traza de la matriz

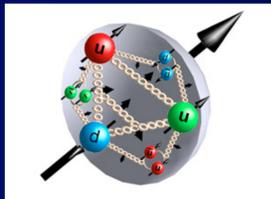
$$r\bar{r} + v\bar{v} + a\bar{a}$$

Intuitivamente, el carácter no dinámico de esta combinación está relacionado con el hecho de que las rotaciones de 3 coordenadas (x, y, z) preservan tanto la distancia al origen x²+y²+z² como las orientaciones relativas de los vectores.

Antiapantallamiento: La autointeracción de los gluones provoca que la carga de color, y por tanto la intensidad de las interacciones fuertes, aumenten con la distancia



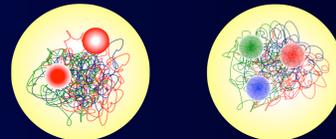
A distancias pequeñas, o altas energías, las interacciones de color son muy pequeñas y los quarks se comportan esencialmente como partículas libres. De hecho, es así como se observan experimentalmente en las colisiones inelásticas profundas (deep inelastic scattering), y que permiten establecer la existencia de los quarks como partículas físicas.



A grandes distancias, o bajas energías, las interacciones fuertes son tan intensas que no permiten aislar las partículas con color. Las únicas combinaciones que existen de forma aislada deben ser incoloras. Estos hadrones son de dos tipos:

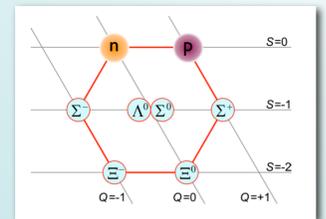
- los bariones, formados por tres quarks con colores distintos (como los protones y neutrones).
- los mesones, formados por un quark y un antiquark, con carga de color opuesta (como los piones).

Los bariones y mesones son incoloros, pero están llenos de color, debido a los intensos intercambios de gluones en su interior.



El "camino óctuple"

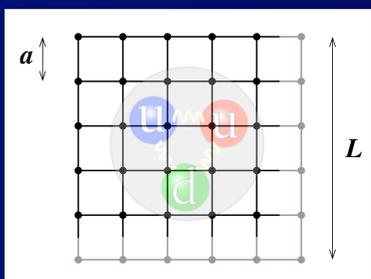
Los mesones y bariones compuestos por los diversos quarks forman patrones regulares (octetes y decupletes para los quarks u, d, s). Históricamente, la simetría de estos patrones motivó la propuesta del modelo de quarks.



Métodos no perturbativos: Las propiedades de QCD a bajas energías no pueden describirse mediante una suma de diagramas de Feynman.

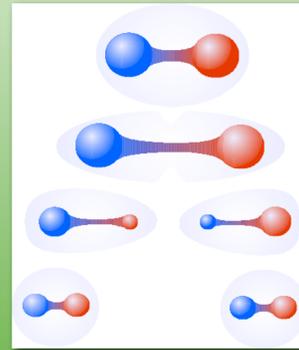
Teoría cuántica de campos gauge en el retículo

Las interacciones de color entre quarks y gluones se pueden simular numéricamente usando modelos en los que se discretiza el espacio-tiempo en un retículo. Los cálculos son tan complejos que requieren el uso de superordenadores y enormes tiempos de CPU, pero permiten calcular las masas y otras propiedades de los hadrones con gran precisión.



La cuerda de QCD

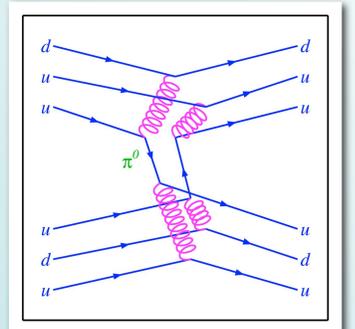
Al intentar separar el quark y el antiquark de un mesón, se genera un tubo de flujo de color entre ellos, como una cuerda elástica de enorme tensión. Cuando la separación rebasa cierto valor crítico, la energía acumulada en la cuerda es suficiente para romperla por nucleación de un quark y un antiquark, que se combinan con los originales y producen dos mesones, impidiendo la detección de quarks o antiquarks aislados.



El modelo de Yukawa

Las interacciones de color entre los quarks producen una interacción residual entre los protones y neutrones (de forma similar a las interacciones electromagnéticas en los átomos, que producen las fuerzas de Van der Waals como interacción residual entre moléculas).

La interacción residual puede interpretarse como intercambio de piones, de acuerdo con el modelo de Yukawa de interacciones entre nucleones.



Misterios por resolver

Mecanismos

La teoría cuántica de campos en el retículo proporciona cálculos numéricos precisos de las propiedades de los mesones y bariones. Se investiga su interpretación en términos de fenómenos no perturbativos, como los instantones, monopolos, etc.

QCD en el LHC

El LHC es un acelerador de hadrones, por lo que cualquier colisión involucra procesos de QCD a altísimas energías. Su estudio está revelando simetrías ocultas de la interacción fuerte en ese régimen, como la integrabilidad o la simetría conforme.

Diagrama de fases

Los quarks y gluones pueden encontrarse en diferentes fases, según la densidad y la temperatura (p.ej. materia nuclear, plasma, estrellas de neutrones...). El diagrama de fases de QCD puede revelar la existencia de nuevos estados de la materia.

Unificación

Las fuerzas se superponen a grandes energías. La interacción de color, extrapolada a muy altas energías, tiene una intensidad prácticamente igual a la de las interacciones electromagnéticas y débiles. ¿Están unificadas las interacciones del Modelo Estándar, quizás incluso con la gravedad?