

# Cromodinámica Cuántica: el color de los quarks

Jorge Casaus, Javier Rodríguez y Eusebio Sánchez

Departamento de Fusión y Física de Partículas Elementales.  
CIEMAT

*El premio Nobel de física del año 2004 ha reconocido el gran impulso que supuso para la comprensión de las interacciones nucleares fuertes el descubrimiento de la libertad asintótica en la teoría que las describe por Politzer, Wilczek y Gross. Con este motivo analizamos aquí el estado actual de dicha teoría, su verificación experimental y su enorme desarrollo desde que los galardonados hicieron su descubrimiento, en 1973.*

## 1. La interacción fuerte y QCD

### 1.1. Quarks, leptones e interacciones fundamentales

La teoría aceptada en la actualidad para describir los componentes últimos de la materia es el denominado Modelo Estándar. Esta teoría propone un conjunto de 12 partículas elementales o sabores (con sus correspondientes antipartículas), puntuales y sin subestructura conocida hasta los límites explorados en la actualidad, en torno a  $10^{-18} - 10^{-19}$  m. Estas partículas interactúan a través de cuatro fuerzas fundamentales que son mediadas a su vez por un segundo tipo de partículas. Las partículas que forman la materia son fermiones (tienen espín semientero) y las partículas mediadoras de las fuerzas son bosones (tienen espín entero).

Los fermiones se clasifican en leptones y quarks y se agrupan en tres familias, como se ve en la Figura 1, donde cada una de las columnas en la parte izquierda de la figura representa una de dichas familias. En la columna de la derecha se muestran las partículas mediadoras de las fuerzas fundamentales. Todas ellas han sido observadas en los experimentos de altas energías.

La materia ordinaria está constituida por las partículas de la primera familia: los quarks u y d y el electrón y su neutrino asociado. Las otras familias están formadas por partículas con propiedades semejantes a las de la primera, pero mucho más pesadas, y que por lo tanto sólo pueden producirse en procesos de alta energía. Las partículas de las familias segunda y tercera (excepto los neutrinos) son, además, inestables, y se desintegran para terminar solamente con partículas de la primera familia. Tras los estudios de precisión del Modelo Estándar realizados en el acelerador LEP del CERN se sabe que el número de familias en el Modelo Estándar es de tres, es decir, no hay más familias con esta estructura aún por descubrir.

Hay cuatro fuerzas fundamentales: la gravitación, el electromagnetismo, la interacción débil y la interacción fuerte. Las interacciones se producen a través del intercambio de alguna de las partículas mediadoras del modelo: el fotón ( $\gamma$ ), asociado a la interacción electromagnética, alguno de los bosones vectoriales intermedios ( $W^\pm, Z$ ) que portan las interacciones débiles o alguno de los ocho gluones ( $g$ ) que son los responsables de las interacciones fuertes. Los quarks sienten todas las fuerzas, mientras que los leptones solo interactúan por fuerzas débiles o electromagnéticas.

Las intensidades de estas fuerzas son muy diferentes. Para cuantificarlas de forma relativa se utilizan los valores de sus constantes de acoplamiento en las condiciones típicas de las observaciones normales. Los resultados pueden verse en la Tabla 1 junto a algunas otras propiedades de las interacciones fundamentales.



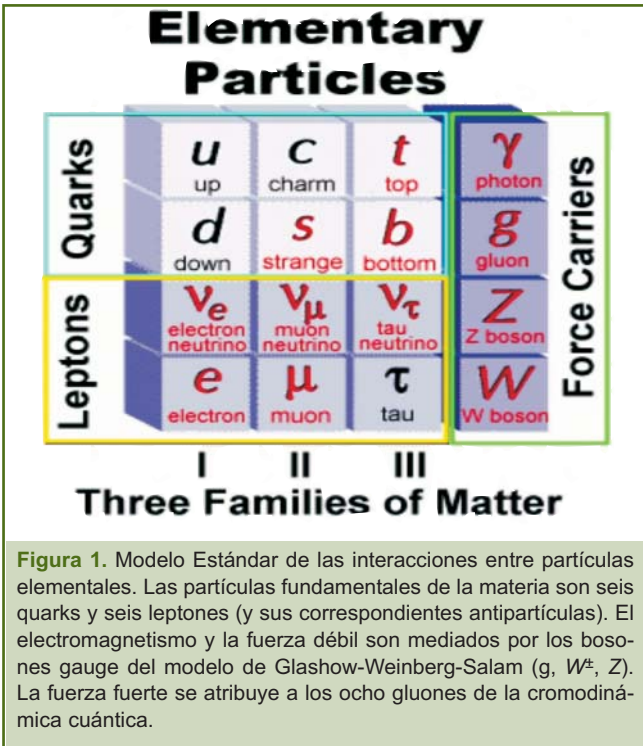
David Gross



Frank Wilczek



David Politzer



**Figura 1.** Modelo Estándar de las interacciones entre partículas elementales. Las partículas fundamentales de la materia son seis quarks y seis leptones (y sus correspondientes antipartículas). El electromagnetismo y la fuerza débil son mediados por los bosones gauge del modelo de Glashow-Weinberg-Salam (g, W<sup>±</sup>, Z). La fuerza fuerte se atribuye a los ocho gluones de la cromodinámica cuántica.

Interacción	Gravitacional	Electromagnética	Fuerte	Débil
Rango (m)	∞	∞	10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-17</sup>
Intensidad relativa	5,9 × 10 <sup>-39</sup>	1/137	1	1,02 × 10 <sup>-5</sup>
Portadores	Gravitón	Fotón	Gluones (8)	W <sup>±</sup> , Z
Carga Asociada	Energía	Carga eléctrica	Color	Sabor
Partículas Afectadas	Todas	Partículas cargadas	Quarks y gluones	Quarks y leptones

**Tabla 1.** Cuatro tipos de interacción explican todos los fenómenos físicos conocidos. Se llama rango a la distancia más allá de la cual la interacción pierde su eficacia operativa. La intensidad se mide en términos del valor de la constante de acoplamiento, que es adimensional. El gravitón, el bosón mediador de la interacción gravitatoria, es una partícula hipotética de espín 2 que no ha sido observada experimentalmente.

A la vista de estas intensidades relativas, se puede concluir que de los cuatro tipos de interacciones, sólo tres son relevantes para la física de partículas a corta distancia, a saber, la interacción fuerte, la interacción débil y la interacción electromagnética. La interacción gravitatoria es la más débil de las cuatro, y sólo es importante, y de hecho, dominante, a grandes distancias debido a que su efecto es acumulativo, a diferencia del electromagnetismo, donde las cargas positivas y negativas se compensan.

El Modelo Estándar describe de forma conjunta las interacciones débiles y electromagnéticas mediante una teoría cuántica de campos invariante gauge bajo el grupo SU(2) × U(1), y con ruptura espontánea de simetría a través del mecanismo de Higgs. Todos los datos experimentales obtenidos hasta la fecha están en perfecto acuerdo con las predicciones del Modelo Estándar.

Este artículo se centra en la parte del Modelo Estándar que describe las interacciones fuertes, conocida como Cromodinámica Cuántica, o QCD, por su nombre en inglés *Quantum Chromodynamics*.

### 1.2. La interacción fuerte y la carga de color

Las partículas observables asociadas a la fuerza fuerte se conocen como hadrones. Dentro de los hadrones hay dos tipos de partículas: bariones y mesones. En los experimentos de física de partículas se han identificado cientos de hadrones. Actualmente sabemos, no obstante, que todos ellos están formados por diferentes combinaciones de los 6 tipos de quarks (Tabla 2), que, sin embargo, no son observables directamente. Los bariones son partículas formadas por 3 quarks. Ejemplos de bariones son los protones (uud) y los neutrones (udd). Los mesones, por su parte, están formados por un quark y un antiquark. Ejemplos de mesones son los piones, π<sup>+</sup> (u d̄), o los kaones, K<sup>-</sup> (sū).

La razón última por la que los quarks son partículas que no se pueden observar libres, sino que están siempre confinados al interior de bariones o mesones, hay que buscarla en las peculiares características de la interacción fuerte.

Además de la carga eléctrica, los quarks poseen otro tipo de carga (la carga asociada a la interacción nuclear fuerte), que se ha dado en llamar carga de color por sus propiedades, que veremos a continuación. Hay tres tipos de colores diferentes, más sus correspondientes anticolores. En la naturaleza sólo se pueden dar combinaciones de quarks cuya carga de color total sea

	Tipo	Masa (GeV/ c <sup>2</sup> )	Carga eléctrica ( e )
Familia I	u	0.001 – 0.005	+2/3
	d	0.003 – 0.009	-1/3
Familia II	c	1.15 – 1.35	+2/3
	s	0.075 – 0.170	-1/3
Familia III	t	174.3 ± 5.1	+2/3
	b	4.0 – 4.4	-1/3

**Tabla 2.** Los quarks y algunas de sus propiedades. Las masas de los quarks son difíciles de estimar, porque estas partículas no se dan aisladas en la naturaleza. Las masas que se consideran aquí han sido tomadas del *Review of Particle Physics*. Las cargas se dan en unidades de la carga del protón (e).

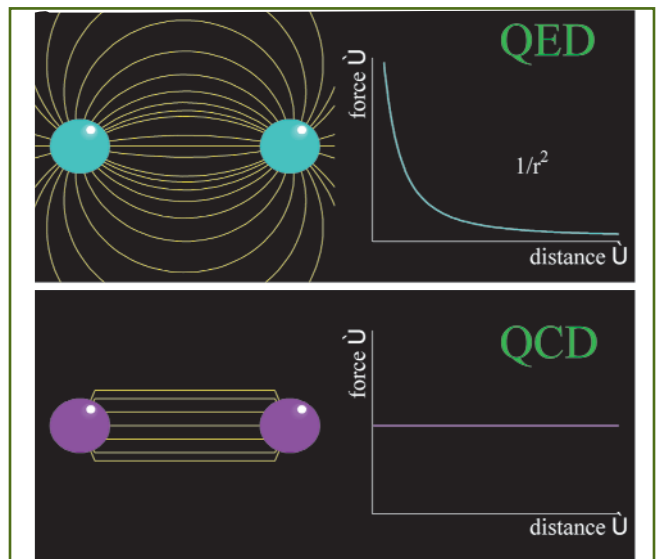
nula. En los mesones, un color más su anticolor producen un estado neutro. En los bariones, la suma de los tres colores produce también un estado de color neutro (es este comportamiento, análogo al de la luz, en el que la suma de los colores básicos da luz blanca, el que llevó al nombre de color, y por extensión al de cromodinámica cuántica). No hay más maneras que éstas dos de disponer quarks con carga de color de forma que el estado resultante sea neutro, excepto, naturalmente, sus combinaciones. Los hadrones y mesones, las partículas realmente observadas, experimentan una fuerza fuerte residual debida a las interacciones fuertes de los quarks que los forman, análoga en cierta forma a las interacciones de Van der Waals entre moléculas, pero no experimentan la misma fuerza que dichos quarks, puesto que son estados sin color.

Al contrario que otras fuerzas conocidas, la interacción entre quarks no disminuye con la distancia (Figura 2). Este comportamiento implica que es necesaria una enorme cantidad de energía para separar dos quarks, por ejemplo, el par quark-antiquark que forma un mesón. Se crea una cuerda de fuerza fuerte entre ellos hasta el punto de que llegado un cierto momento es energéticamente favorable la creación de un nuevo par quark-antiquark (Figura 3), por lo que el estado final es de dos mesones, en lugar de conseguir quarks libres. Este comportamiento es lo que se denomina confinamiento de los quarks, y hace que sean inobservables directamente.

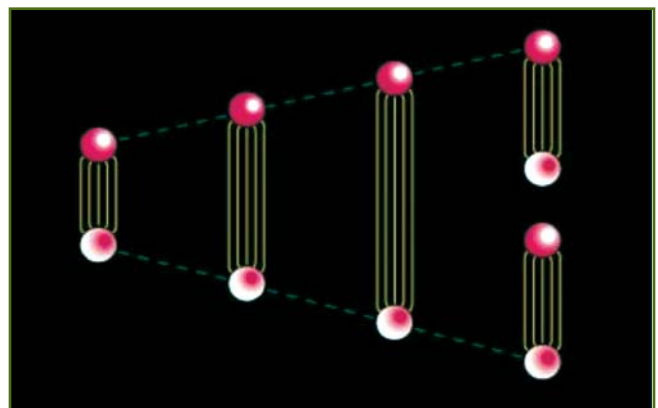
La otra gran sorpresa que guarda el comportamiento de la fuerza fuerte está en el límite opuesto. Cuando la distancia que separa dos quarks se hace muy pequeña, la intensidad de la interacción entre ellos, en lugar de hacerse mayor, disminuye. Por ello, cuando están muy próximos, los quarks se comportan como si estuvieran libres. Este peculiar comportamiento se denomina libertad asintótica, y fue el descubrimiento de Politzer, Wilczek y Gross por el que han sido galardonados con el premio Nobel de física del año 2004. Una de las formas más importantes de verificar este comportamiento es estudiar la evolución de la constante de acoplamiento  $\alpha_s$  con la escala de energía del proceso. Para QCD, este parámetro, que indica la intensidad de la interacción, tiene que disminuir al aumentar la escala de energía.

La interacción fuerte se debe al intercambio de gluones, las partículas portadoras de la interacción. La teoría exige ocho tipos de gluones. Seis de ellos cambian de un color a otro en la interacción de todas las maneras posibles. Los otros dos gluones se parecen al fotón en que llevan una fuerza entre partículas con carga de color, pero no alteran dicha carga. Cuando los quarks interactúan, aunque puedan cambiar constantemente su color, lo hacen de forma tal que la carga de color total se conserva.

Estas características de la interacción fuerte se explican por el hecho de que las partículas portadoras, los gluones, tie-



**Figura 2.** Líneas de fuerza del campo electromagnético (arriba) y del campo fuerte (abajo). La intensidad de la fuerza en un punto es proporcional al número de líneas que cruzan una superficie de área unidad ortogonal a las líneas de fuerza que pasa por dicho punto. En la fuerza electromagnética disminuye como el cuadrado de la distancia. En la fuerza fuerte, al formar un tubo delgado de sección uniforme, la fuerza es constante con la distancia.



**Figura 3.** La interacción fuerte no disminuye con la distancia, de tal forma que si se intenta separar el quark y el antiquark componentes de un mesón, hay que invertir cada vez más energía, hasta hacer favorable la creación de un nuevo par quark-antiquark, con lo que acabamos en un estado final de dos mesones, y no con quarks (o antiquarks) aislados.

nen a su vez carga de color, a diferencia de los fotones, por ejemplo, que aunque son portadores de la interacción electromagnética, no tienen carga eléctrica. Esto implica que existe también un acoplamiento entre gluones (y no solamente entre quarks) en la interacción fuerte. La existencia de este acoplamiento explica también el corto alcance de la interacción (que como hemos visto se manifiesta solamente

en distancias subnucleares), a pesar de que los gluones son partículas sin masa.

Todas estas propiedades quedan perfectamente descritas por QCD. ésta es una teoría cuántica de campos no abeliana, invariante gauge bajo el grupo de simetría SU(3). Esta invariancia es suficiente para caracterizar las interacciones fuertes, a pesar de toda su complejidad observacional. De hecho, una característica importante de QCD es el pequeño número de parámetros necesarios: las masas de los quarks y la constante de acoplamiento  $\alpha_s$ , que mide la intensidad de la interacción. En las situaciones ordinarias, los quarks de las familias segunda y tercera no tienen influencia en el comportamiento de las partículas, y puesto que las masas de los quarks u y d son pequeñas, muy a menudo se pueden ignorar, con lo que la teoría solamente necesita un parámetro (la constante de acoplamiento,  $\alpha_s$ ) para predecir cualquier comportamiento<sup>1</sup>.

En resumen, QCD explica la interacción fuerte en términos de las siguientes características:

- Los quarks y gluones son las partículas elementales componentes de los hadrones.
- Hay 3 cargas de color, con sus correspondientes anticolores.
- Hay 8 gluones que son los mediadores de la interacción. Seis de ellos cambian el color y los otros dos no lo hacen.
- La interacción es de corto alcance debido a que los gluones tienen carga de color.
- Confinamiento: Los gluones y los quarks son inobservables directamente porque se encuentran confinados en estados sin carga de color (los hadrones).
- Libertad asintótica: A distancias muy cortas la interacción disminuye su intensidad y los quarks se comportan como si fueran partículas libres. Además, la constante de acoplamiento debe disminuir su valor con la energía.

Como veremos a continuación, todas estas predicciones de QCD han sido verificadas por los experimentos, a pesar de la dificultad que supone testar esta teoría. Puesto que los quarks y gluones no existen como partículas libres, no pueden ser acelerados o detectados directamente en colisiones. A pesar de esto, la teoría ha superado pruebas de gran precisión y en un amplio rango de energías por lo que en la actualidad está perfectamente establecida como la descripción correcta de las interacciones fuertes.

## 2. Tests experimentales de QCD

La primera evidencia experimental de la existencia de una estructura interna en los hadrones es anterior a la propuesta

de un modelo teórico que diera cuenta de su dinámica. A mediados de la década de los 60 había un cierto consenso en que el protón poseía un tamaño aproximado de  $10^{-15}$  m con una distribución suave de carga en su interior.

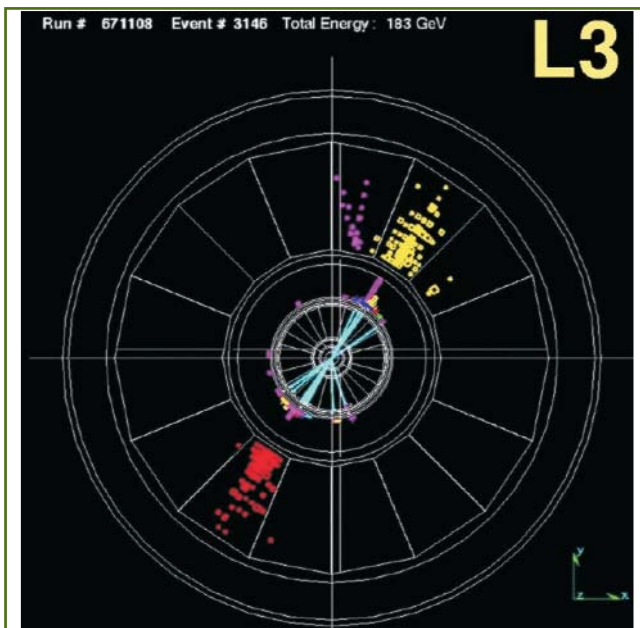
Sin embargo, la interpretación de los resultados de experimentos de dispersión altamente inelástica de electrones sobre blancos de hidrógeno y deuterio llevados a cabo en Stanford entre 1967 y 1970 requería de la existencia de unos centros puntuales de dispersión cargados y de espín 1/2 en el interior de los nucleones. Se habían descubierto los quarks. Posteriormente, la cromodinámica cuántica proporcionó el marco teórico que da cuenta de su dinámica y que predice la existencia de los gluones como bosones mediadores de la interacción. Desde entonces y hasta la fecha, todos los resultados experimentales han mostrado un perfecto acuerdo con este modelo.

### 2.1. Algunos aspectos técnicos

Las predicciones de QCD como teoría de las interacciones fuertes entre quarks y gluones intervienen en todos los procesos físicos que contengan hadrones. De este modo, hay una gran variedad de observables, desde el propio valor de sus masas hasta su tasa de producción en colisiones a alta energía, susceptibles de ser confrontados con la teoría. Por otro lado, la herramienta más comúnmente utilizada para obtener predicciones cuantitativas precisas de una teoría cuántica de campos como QCD consiste en emplear desarrollos perturbativos. La validez de estos cálculos se limita a aquellos regímenes en los que el parámetro del desarrollo, en este caso la constante de acoplamiento  $\alpha_s$ , tenga un valor pequeño. La libertad asintótica de QCD asegura que esto es cierto en los procesos en los que la energía de quarks y gluones es suficientemente elevada. De este modo, las colisiones hadrón-hadrón, leptón-nucleón o leptón-leptón a alta energía son el marco natural para la verificación experimental de QCD. El régimen perturbativo de QCD desciende hasta energías del orden de las de las masas de los hadrones, donde la constante de acoplamiento tiene un valor suficientemente elevado como para invalidar los desarrollos perturbativos. Por debajo de esas energías, a las que se produce el fenómeno del confinamiento de quarks y gluones en hadrones, sólo los métodos no perturbativos permiten obtener predicciones.

En las colisiones entre partículas elementales a alta energía aparecen tanto los aspectos perturbativos como los no perturbativos de QCD. Así, aunque los cálculos perturbativos son en principio aplicables gracias a la libertad asintótica, los estados observables experimentalmente son los hadrones. Es por ello que el estado final de una colisión no será directamente comparable con los cálculos perturbativos de

<sup>1</sup>Estamos ignorando aquí el parámetro  $\theta$  del vacío de QCD, que es relevante en el problema de CP fuerte.

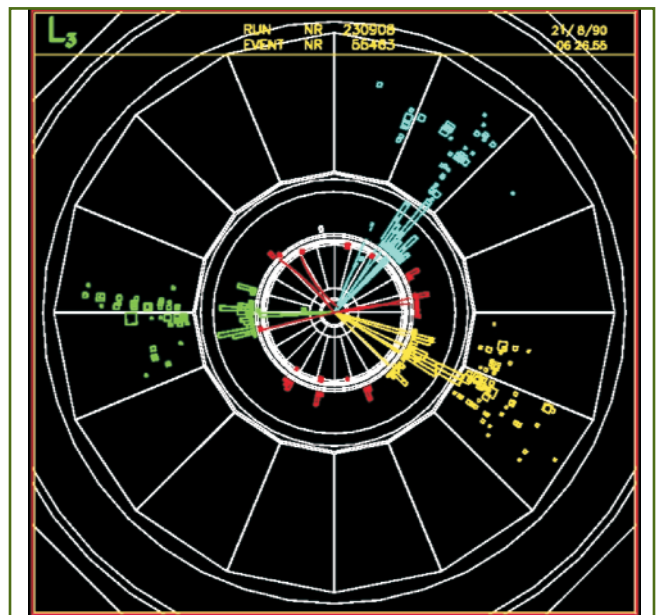


**Figura 4.** Dos jets de partículas emergen de la colisión de un electrón y un positrón. El carácter focalizado de los jets se debe a que cada uno de ellos se ha desarrollado a partir de un único precursor: un quark o un antiquark. El suceso mostrado aquí se recogió en el detector L3 del acelerador LEP, en el CERN, en el año 1997.

QCD, que tratan con quarks y gluones como partículas libres. Para soslayar este hecho, que en principio impediría la confrontación de los datos experimentales con las predicciones de la teoría, ha habido que desarrollar observables físicos que preserven las propiedades de la fase perturbativa de la colisión.

## 2.2. Jets hadrónicos y medida de $\alpha_s$

Una de las características experimentales más relevantes de los estados finales en las colisiones a alta energía consiste en la aparición de acumulaciones colimadas de hadrones similares a chorros de partículas y que se han denominado *jets*. Su primera observación en el SPEAR de Stanford en 1975 constituyó en sí una confirmación directa de la estructura interna de los hadrones. Por otro lado, y dado que cada uno de ellos puede ser asociado a un quark o gluon de la interacción primaria, los *jets* son un ejemplo de observable físico comparable con los cálculos perturbativos de QCD. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de los resultados de interacciones electrón-positrón a alta energía con hadrones en el estado final recogido en uno de los cuatro experimentos que operaron en el acelerador LEP del CERN en Ginebra durante la década de los 90 y en los que las estructuras en forma *jets* aparecen claramente.

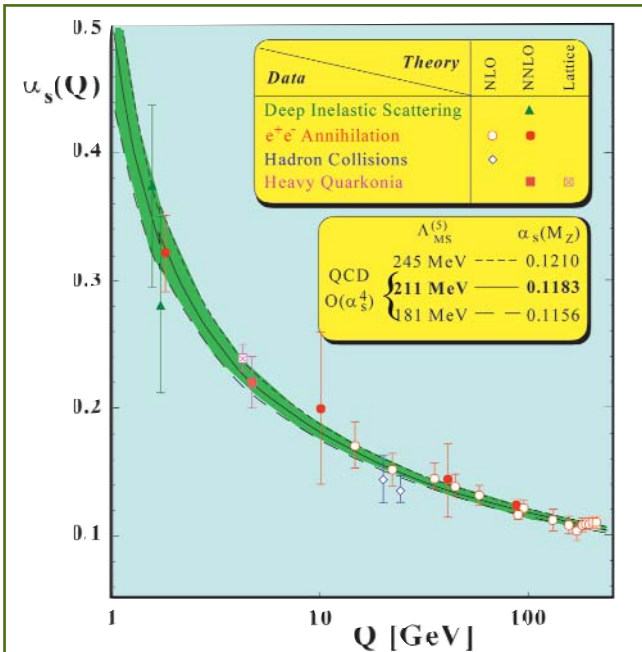


**Figura 5.** Suceso de 3 jets, registrado en el detector L3 en el año 1990. Confirma la existencia del gluon, la partícula mediadora de la fuerza de color. Un electrón y un positrón chocan a muy alta energía, creando un par quark-antiquark. Uno de ellos radia un gluon, que es la partícula que da lugar al tercer jet.

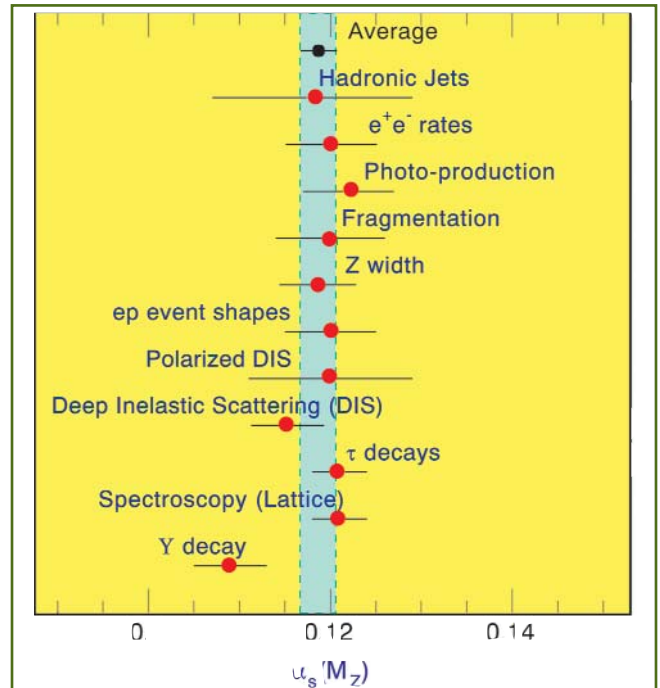
La primera evidencia experimental de la existencia del gluon proviene de la aparición de sucesos de tres *jets* (Figura 5) en colisiones electrón-positrón en el acelerador PETRA de DESY en Hamburgo en 1979, que se interpretaron como la producción de un gluon energético acompañando al par quark-antiquark resultante de la aniquilación del electrón y el positrón incidentes.

El estudio de las correlaciones angulares entre las direcciones de los jets ha permitido la verificación de las propiedades del gluon, tanto en cuanto a su carácter bosónico (espín 1), como a la evidencia del acoplamiento entre gluones con la intensidad predicha por la teoría y en cuya existencia radica la rica fenomenología de QCD.

Los estados finales de las interacciones pueden clasificarse de un modo natural atendiendo su multiplicidad en *jets*. La medida de la fracción de sucesos con dos, tres o más *jets* en el estado final puede entonces compararse directamente con las predicciones de QCD para las probabilidades de estados finales con dos, tres o más quarks o gluones y, por tanto, realizar una medida de la intensidad de su acoplamiento, es decir, de  $\alpha_s$ . Esta variable es un ejemplo de observable asociado a la distribución de los hadrones en el estado final de las interacciones. El estudio de esta y otras variables de forma es uno de los métodos ampliamente utilizados para la medida del valor de la constante de acoplamiento y su evolución en función de la energía.



**Figura 6.** Evolución de la constante de acoplamiento con la escala de energía a la que se mide. Disminuye a altas energías, o lo que es lo mismo, para distancias pequeñas, poniendo de manifiesto la libertad asintótica. Los datos, procedentes de experimentos muy diferentes realizados en condiciones muy diversas, se muestran en perfecto acuerdo con las expectativas de QCD.



**Figura 7.**  $\alpha_s$  a la escala de  $m_Z$ , obtenida a partir de muy diversas medidas en condiciones diferentes. Todos los valores son compatibles, lo que confirma el enorme rango de aplicabilidad de QCD.

El conjunto presente de medidas de  $\alpha_s$  es enormemente variado ya que se han obtenido resultados tanto del estudio de las colisiones leptón-leptón, leptón-hadrón, hadrón-hadrón, fotón-fotón y fotón-hadrón en un amplio rango de energías, como de la medida de la desintegración del leptón  $\tau$  o de las resonancias formadas por quarks pesados. La consistencia de estas medidas es una muestra excelente de la validez de la teoría así como de la madurez de las técnicas perturbativas empleadas para realizar las predicciones.

Mención aparte merece la determinación de la constante de acoplamiento mediante métodos no perturbativos, en los que ha habido un progreso espectacular en los últimos años. La herramienta por excelencia para la obtención de predicciones en el régimen no perturbativo consiste en la utilización de poderosos computadores para simular la dinámica de QCD en un espacio-tiempo discretizado en los nodos de un retículo. De este modo, resultados propios del régimen no perturbativo de QCD, como la masa de los hadrones, pueden obtenerse a partir de la masa de los quarks y del valor de la constante de acoplamiento. Alternativamente, una determinación de  $\alpha_s$  puede obtenerse a partir de las medidas experimentales de las masas de hadrones y quarks. La enorme potencia de cálculo necesaria para la conseguir predicciones cuantitativas precisas en el retículo ha impedi-

do hasta muy recientemente una determinación competitiva mediante este método. Hoy en día la medida de  $\alpha_s$  a partir de los resultados de QCD en el retículo es no sólo perfectamente consistente con el resto de determinaciones, si no que resulta ser una de las determinaciones más precisas de la constante de acoplamiento de QCD. Esta es, en suma, una demostración clara del éxito de la teoría al reproducir cuantitativamente los efectos de confinamiento a bajas energías y de la capacidad de los métodos no perturbativos para proporcionar predicciones precisas en QCD.

En la Figura 6 se muestran las medidas de la constante de acoplamiento obtenidos mediante distintos métodos y en un amplio rango de energías que abarca dos órdenes de magnitud. La evolución de  $\alpha_s$  con la energía es evidente, demostrando tanto la libertad asintótica a altas energías como el límite de validez del régimen perturbativo a bajas energías. Esta evolución está en buen acuerdo con la predicción de QCD. Dado que el valor concreto de  $\alpha_s$  depende de la energía, es conveniente comparar las medidas extrapoladas a un valor de referencia. Comúnmente se utiliza el de la escala de energías correspondiente a la masa del bosón Z ( $E = M_Z \cdot c^2$ ). En la Figura 7 se muestra una recopilación de las medidas de la constante de acoplamiento junto con el valor del promediado de todas ellas tal como se recoge en la edición más reciente del *Particle Data Group Review of*

*Particle Physics*. El resultado obtenido,  $\alpha_s(M_Z) = 0.1187 \pm 0.0020$ , evidencia el nivel de precisión alcanzado en la verificación experimental de QCD.

### 3. Otros aspectos

La Cromodinámica Cuántica ha superado, por tanto, las pruebas a las que ha sido sometida por los experimentos de alta energía con gran brillantez, utilizando desarrollos perturbativos. Sin embargo, cuando se intenta estudiar el régimen de baja energía los cálculos en QCD son harto difíciles y solamente el uso de modelos aproximados permite realizar predicciones. Aunque QCD explica razonablemente la espectroscopía hadrónica (y con especial éxito cuando los sistemas contienen los quarks más pesados, donde además los efectos relativistas pueden despreciarse en una primera aproximación) no existe una solución definitiva al problema de calcular cual es el contenido de quarks y gluones que componen los estados ligados permitidos de la teoría. Los diversos modelos aproximados, además de las partículas ya conocidas formadas por  $q\bar{q}$  y  $qqq$ , ofrecen una pléyade de nuevos estados: glubolas, híbridos y multiquarks (tetraquarks y pentaquarks). A continuación repasaremos brevemente la naturaleza y estado del conocimiento actual de esta nueva espectroscopía que permite examinar la dinámica de la interacción fuerte en el régimen no perturbativo.

### 4. Glubolas

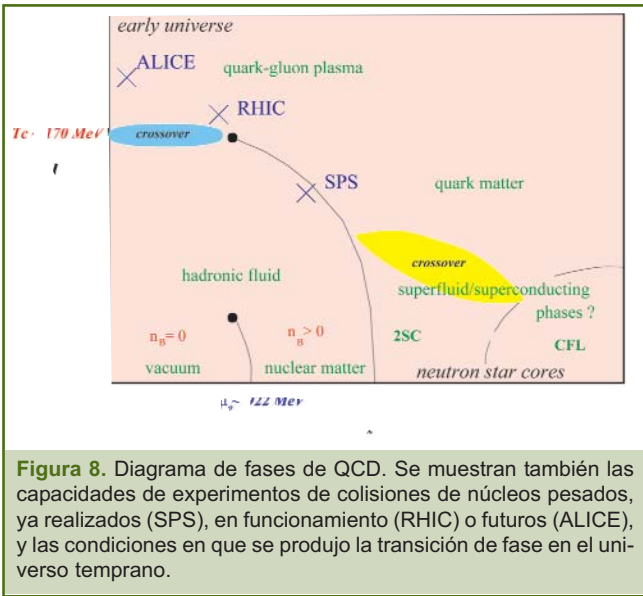
Las glubolas estarían constituidas por aglomeraciones de gluones, el pegamento que une a los quarks dentro de los hadrones y son expresión directa del carácter no abeliano de QCD. Al poseer los gluones espín 1, los estados ligados tendrán un momento angular total ( $J$ ) entero y en ese aspecto se parecerían a los mesones. Los modelos aproximados parecen indicar que las glubolas más ligeras serían las escalares ( $J=0$ ) y tensoriales ( $J=2$ ) respectivamente. Actualmente no se puede determinar con precisión el valor de su masa a partir de la teoría, pero el acuerdo general es situarla entre los 1 y 2  $\text{GeV}/c^2$ . Lamentablemente en ese rango de energías aparecen un gran número de resonancias mesónicas de los quarks más ligeros y estados mezcla de las mismas que enmascararían la identificación de la supuesta glubola. Además, la Mecánica Cuántica nos dice que los estados físicos que tienen los mismos números cuánticos ( $J$ ,  $P$ ,  $C$ ) se pueden mezclar, con lo cual podría ocurrir que la glubola más ligera no existiese como tal sino en una especie de mezcla con mesones próximos en masa. Las búsquedas se centran en procesos ricos en gluones: desintegración radiativa del mesón  $J/\Psi$  o las colisiones protón-protón y protón-anti-protón a energías no muy elevadas. Tras cerca de 25 años de búsqueda se tiene una serie de candidatos tanto para el estado isoescalar como para el tensorial, aunque ninguno de

ellos es inequívocamente atribuible a una glubola o un estado de mezcla mesón-glubola.

**Híbridos** Un híbrido es un mesón o un barión en el cual los gluones están excitados a modos resonantes (a la manera de las vibraciones de una cuerda de guitarra) en presencia de quarks. La contribución de esas excitaciones puede producir partículas con números cuánticos exóticos (no permitidos para los estados  $q\bar{q}$ ) siendo identificables con más facilidad. Estos estados están a mitad de camino entre los mesones ordinarios, donde los quarks están excitados en presencia de gluones y las glubolas anteriormente descritas, donde los gluones están excitados sin necesidad de quarks. Los cálculos teóricos nos indican que la masa de estas partículas podría situarse alrededor de los 2  $\text{GeV}/c^2$ . Existen diversos candidatos para ser declarados exóticos aunque su masa (1.4-1.6  $\text{GeV}/c^2$ ) está un poco por debajo de las predicciones teóricas y no está clara su identidad como híbridos.

**Multiquarks.** QCD no impide que existan estados con más de 3 quarks. Existen predicciones teóricas para la existencia de mesones de 4 quarks (tetraquarks:  $q\bar{q}q\bar{q}$ ) y bariones con 5 constituyentes (pentaquarks:  $qqqq\bar{q}$ ). Hay candidatos para todas estas nuevas partículas, pero ninguna identificada inequívocamente: los mesones escalares de masas inferiores a 1  $\text{GeV}/c^2$  en masa y que no casan con ningún multiplete  $q\bar{q}$  son candidatos a tetraquarks, y una nueva serie de resonancias con números cuánticos exóticos que indican que no pertenecen a ningún multiplete bariónico (en especial el  $\Theta^+$ ) son candidatos a pentaquarks.

**Diagrama de fases de QCD.** Junto a la aplicación al ámbito de las altas energías de QCD, esta teoría nos permite explorar el comportamiento de la materia nuclear cuando se ve sometida a condiciones extremas de temperatura y densidad. Tales condiciones se daban en los instantes iniciales en nuestro universo ( $10^{-5}$  s,  $T = 10^{12}$  K) o las que parecen existir en el núcleo de las estrellas de neutrones ( $\rho \approx 10^{14}$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Dicha información puede representarse en un diagrama de fase como el mostrado en la Figura 8. En él se pueden apreciar las diferentes fases que se atraviesan cuando variamos la temperatura o la densidad, representada aquí mediante el potencial químico bariónico  $\mu$ . QCD se comporta como hemos descrito en las secciones anteriores cuando las temperaturas y densidades son próximas a cero. Si nos movemos en el eje de las temperaturas hasta alcanzar una energía promedio por partícula del orden de 170 MeV, nos introduciremos en una nueva fase, denominada plasma de quarks y gluones, en la que los grados de libertad dominantes ya no son los hadrones, sino sus partículas constituyentes. No hay confinamiento aunque las interacciones sigan siendo fuertes. El estudio de tal estado en laboratorios se intenta realizar en colisiones relativistas de iones pesados (S, Pb, Au) donde sería posible alcanzar la temperatura



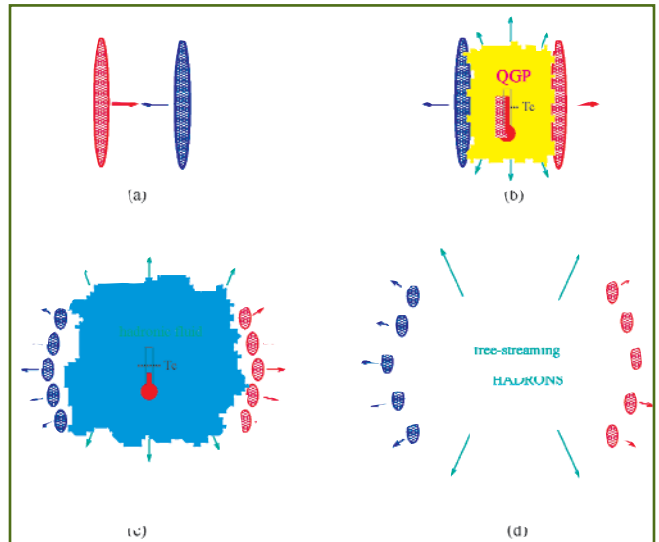
**Figura 8.** Diagrama de fases de QCD. Se muestran también las capacidades de experimentos de colisiones de núcleos pesados, ya realizados (SPS), en funcionamiento (RHIC) o futuros (ALICE), y las condiciones en que se produjo la transición de fase en el universo temprano.

deseada (Figura 9). Actualmente los experimentos del acelerador RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider), y el futuro detector ALICE (A Large Ion Collider Experiment) en el colisionador LHC, son los experimentos que sondan esta nueva fase de la materia. Cuando nos movemos en el eje de densidad llegamos a otra fase, la denominada materia de quarks, en la que de nuevo desaparece el confinamiento y los quarks están libres. La enorme densidad que se requiere solo puede esperarse en los núcleos de las estrellas de neutrones. Las propiedades de esta nueva fase de la materia podrían incluir nuevos fenómenos que por su similitud con los que se dan en metales a muy bajas temperaturas se denominan superconductividad del color (en la cual se forman pares de Cooper entre quarks y los gluones adquieren una masa efectiva en un mecanismo similar al de Higgs) y superfluidez. La única fuente de información acerca de estos estados vendría de la observación del comportamiento de las estrellas de neutrones y quizás en las explosiones de supernova que las forman.

### Conclusión

El descubrimiento de la libertad asintótica (galardonado con el premio Nobel del año 2004) permitió realizar cálculos con QCD de una gran cantidad de efectos medibles, e inició el enorme desarrollo que la teoría ha tenido hasta llegar a su estado actual. Por tanto, QCD está firmemente establecida como la teoría correcta en la descripción de las interacciones fuertes. Como tal, QCD es ubicua y el papel que juega en la física de partículas actual es crucial.

En las colisiones a alta energía, donde las técnicas perturbativas son aplicables, QCD ha entrado en la era de la alta pre-



**Figura 9.** Producción del plasma de quarks y gluones en colisiones de núcleos pesados. Se representan las diferentes etapas en la colisión. El plasma de quarks y gluones se produce en etapas tempranas (b), y su aparición debe deducirse de la evolución posterior (c) y (d).

cisión, tanto en sus predicciones teóricas como en las medidas experimentales, y los futuros aceleradores la someterán a tests de gran exigencia. Sin embargo, la dificultad que entraña obtener sus predicciones no perturbativas hace que los experimentos jueguen un papel fundamental en la investigación de este régimen, donde es posible que se descubran fenómenos nuevos e inesperados.

### Bibliografía

#### Lecturas recomendadas

- [1] El *Particle Data Group* es una colaboración internacional que se encarga de recopilar, revisar y combinar los datos experimentales en el campo de la Física de Partículas. Los resultados, publicados con una frecuencia bienal, pueden consultarse electrónicamente en la dirección <http://pdg.lbl.gov>.
- [2] A. PICH, "Quantum Chromodynamics". Lecciones dadas en la Escuela *European School of High-Energy Physics* (Sorrento, Italia, 1994) o "hep-ph/9505231".
- [3] Nota de prensa del premio Nobel de física 2004: <http://nobelprize.org/physics/laureates/2004/press.html>, y los discursos de recepción, que se pueden ver en: <http://nobelprize.org/physics/laureates/2004/index.html>.
- [4] E. Klempt "Glueballs, Hybrids, Pentaquarks: Introduction to Hadron Spectroscopy and Review of Selected Topics". Lecciones dadas en la *18th Annual Hampton University Graduate Studies* (Virginia, EE. UU., 2003) o "hep-ph/0404270".
- [5] S. HANKS "The phase diagram of QCD", *Contemporary Physics* (vol. 42, 2001).