
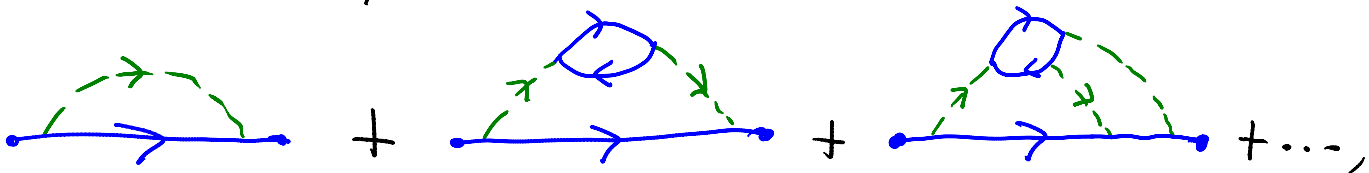


pero equivalente, satisfacen $m = \sqrt{E^2 - p^2}$ pero violan momentáneamente la conservación de la energía.

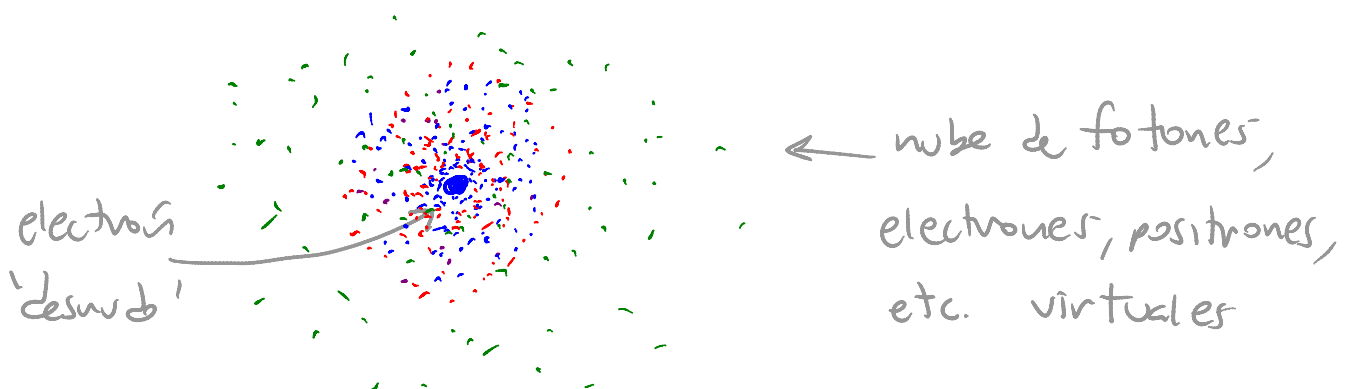
Por esta razón se les conoce como **partículas virtuales**.

Lo curioso es que, en nuestra descripción teórica, incluso una partícula aislada está permanentemente rodeada de una 'nube' de partículas virtuales que continuamente aparecen y desaparecen.

Un electrón, p.ej., al ir de un lugar a otro no hace solo esto: , sino también, simultáneamente, esto:



por lo que en verdad debemos visualizar al electrón del mundo real así:



Todo esto es claramente ABSURDO,
¡¡pero resulta en predicciones en completo acuerdo
con los datos experimentales!!

P.ej., para el 'momento magnético' del electrón (que
determina la intensidad con que se acopla a un campo
magnético \vec{B}), en unidades de $\frac{g_e}{2\mu_B}$,

* la predicción teórica

- a orden g_e^0 (1 solo diagrama 'electrón desnudo') es
1

- a orden g_e^8 (1,000 diagramas que incorporan partículas
virtuales) es

$$1.00115965217586(8480)$$

← incertidumbre del cálculo

y

* la medición experimental resulta en

$$1.00115965218590(0380)$$

← margen de error experimental

¡¡Acuerdo a 1 parte en 10^{11} (análogo a predecir
el ^{128/18}diámetro de la Tierra con error no mayor a un cabello)!!

Una idea importante es que, debido a la existencia de estas nubes de partículas virtuales, la masa y la carga de una partícula pueden en general depender de la distancia a la cual las medimos, y en particular, difieren de lo que hubieran sido la masa y la carga de la partícula desnuda correspondiente.

Al hacer predicciones teóricas, es importante por tanto asegurarnos de reescribir nuestras predicciones en términos de la masa y carga físicas (las que medimos experimentalmente), y NO de la masa y carga desnudas. A esta reescritura se le conoce como **renormalización**.

P.ej., en electromagnetismo, el resultado clásico para la energía potencial entre 2 electrones, $U(r) = \frac{q_e^2}{4\pi r}$, se convierte cuánticamente (por efecto de los procesos virtuales) en $U(r) = \frac{q_e^{(r)^2}}{4\pi r}$,

con

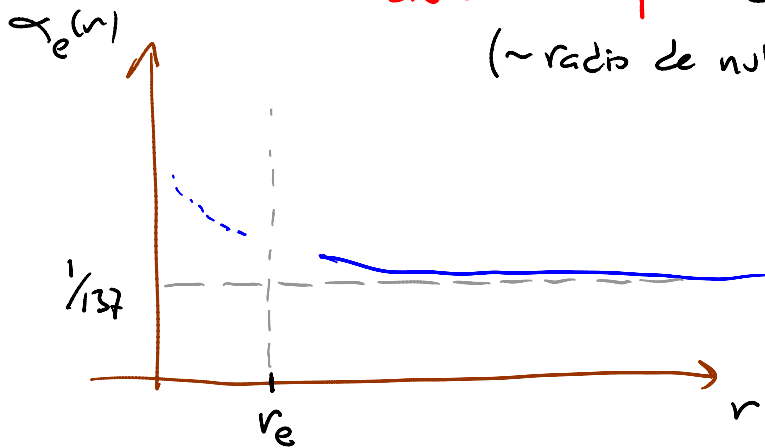
$$\alpha_e(r) \equiv \frac{q_e(r)^2}{4\pi\hbar c} = \alpha_e \left[1 + \frac{\alpha_e}{4\sqrt{\pi}} \frac{e^{-2r/r_e}}{(r/r_e)^{3/2}} + \dots \right]$$

$\alpha_e \equiv \alpha_e(\infty) \approx 1/137$

cuando $r \gg r_e \equiv \frac{\hbar}{m_e c} \sim 10^{-13} \text{ m}$

↑ **radio de Compton** del electrón

(~ radio de nube de partículas virtuales)



Tenemos entonces que $q_e(r)$, la constante de acoplamiento electromagnética, disminuye con la distancia.

Recordando que para explorar distancias pequeñas es necesario utilizar partículas con altas energías

(la longitud de onda de de Broglie $\lambda \equiv \hbar/p \sim \hbar c/E$

para cualquier partícula con $E \gg mc^2$), podemos decir de manera equivalente que $q_e(E)$ aumenta con la energía.

La teoría de campo especifica que resume todo lo que hasta ahora sabemos con certeza respecto a la composición microscópica de nuestro universo se conoce con el modesto nombre de **Modelo Estándar**.

Esta teoría describe tanto a las partículas/campos que componen la materia como a las partículas/campos que actúan como mediadoras de las fuerzas fundamentales.

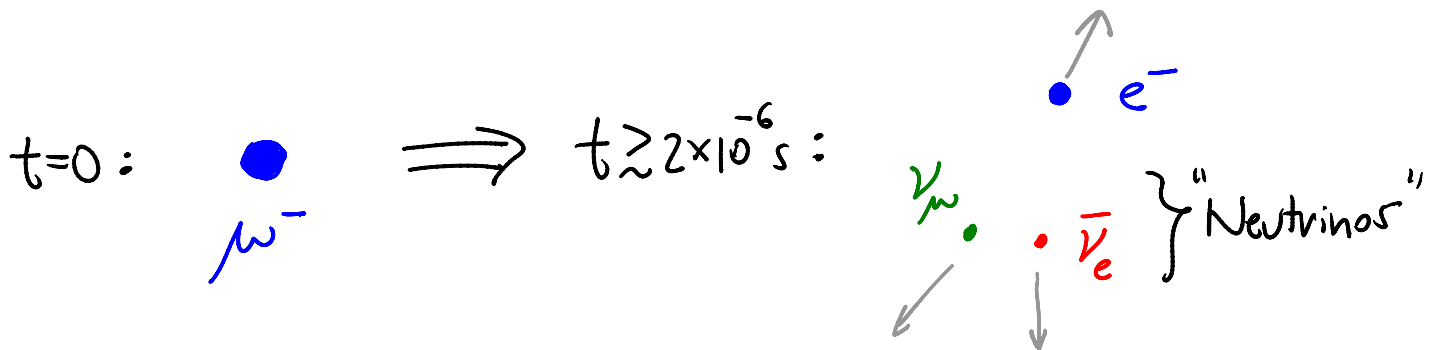
Curiosamente, la lista completa de partículas elementales incluye un buen número de objetos que no son componentes de la materia ordinaria. Un ejemplo es el **muón**,

que es una especie de copia pirata del electrón — todas sus propiedades son idénticas, pero es unas 200 veces más pesado.

Gracias a su mayor masa, aún estando aislado puede hacer algo que el electrón no: ¡desaparecer!

En efecto, si tomamos un muón en reposo, después de un tiempo (promedio) de alrededor de 2×10^{-6} s

desaparecerá, dejando en su lugar a 3 partículas:



Dado que el muón es tan poco duradero, entendemos por qué no figura como componente de la materia a nuestro alrededor.

Pero entonces, ¿dónde podemos encontrarlos?

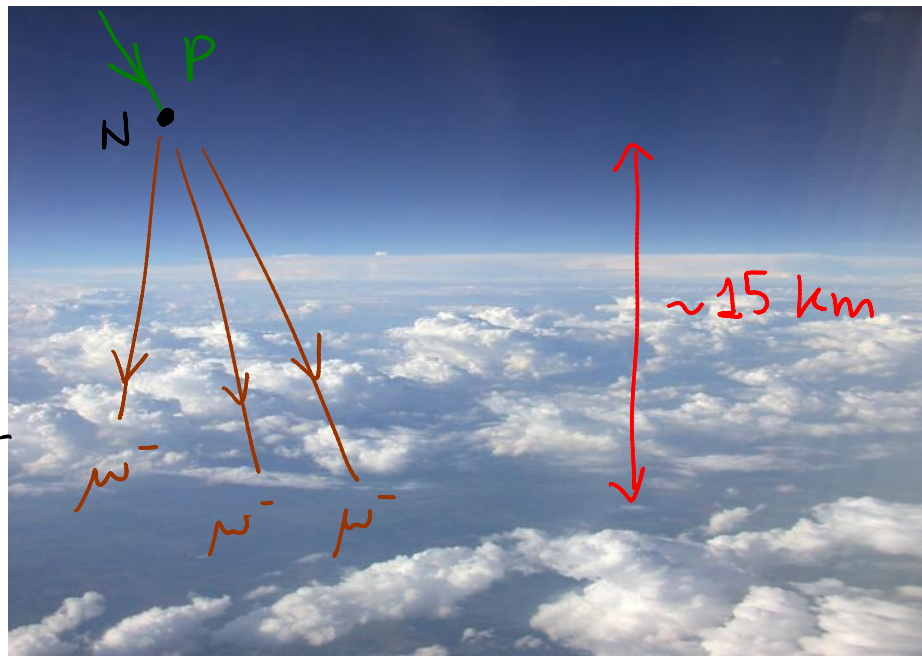
Tenemos 2 opciones: crearlos en nuestros aceleradores de partículas (que como vimos, son verdaderas fábricas de partículas) ¡o esperar a que nos caigan del cielo!

El punto aquí es que la Tierra está siendo continuamente bombardeada por partículas que llegan del espacio, que llamamos **rayos cósmicos** y son principalmente protones. Al toparse estas con los núcleos de los átomos en la capa superior de nuestra atmósfera se producen colisiones similares a las de nuestros aceleradores, como resultado de las cuales se crean

nuevas partículas que 'lloverán' hasta el suelo.

Un buen número de estas partículas son precisamente muones: ¡unos 30 muones atraviesan tu cuerpo cada segundo!

Notemos que este hecho apunta a una contradicción potencial: si antes dijimos que un muón en reposo vive solo $\sim 2 \times 10^{-6}$ s,



¿cómo es que los muones que provienen de los rayos cósmicos, aún viajando casi tan rápido como la luz, alcanzan a recarver mucho más de $\sim (2 \times 10^{-6} \text{ s}) (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 600 \text{ m} ??$

La respuesta es que para estos muones ultra-rápidos el tiempo transurre hasta 1000 veces más lento que para nosotros! (Y desde SU perspectiva, ¡la atmósfera es hasta 1000 veces más delgada!)

Esto constituye una espectacular confirmación experimental de la relatividad especial (dilatación del tiempo y contracción de Lorentz)...

Regresando a la discusión sobre partículas elementales exóticas, mencionamos arriba que, al 'decaer', el muón deja en su lugar a un electrón y 2 neutrinos (de 2 tipos distintos). Estos últimos son partículas elementales neutras y muy ligeras, lo cual les impide decaer. Hay billones de neutrinos en cada metro cúbico de espacio a nuestro alrededor (producidos por los rayos cósmicos, por reacciones en el sol y otras estrellas, e incluso por la gran explosión que dio origen al universo). No los notamos porque los neutrinos son partículas verdaderamente fantasmagóricas: interactúan tan débilmente con la materia ordinaria que continuamente atraviesan sin inmutarse no solo a nuestros cuerpos, ¡sino incluso a la Tierra entera!

Estamos ya por fin listos para dar la lista completa de ingredientes de nuestro universo de acuerdo con el **Modelo Estándar**:

I) **Materia** - existen 12 'ladrillos' básicos, todos con $s = 1/2$, y todos \therefore fermiones

6 <u>Quarks</u>	Arriba (u) $m=5, q=+2/3$	Encanto (c) $2400, +2/3$	Cima (t) $34000, +2/3$
	Abajo (d) $12, -1/3$	Extraño (s) $205, -1/3$	Fondo (b) $8300, -1/3$ (= Belleza)
6 <u>Leptones</u>	Electrón (e) $m=1, q=-1$	Muón (μ) $207, -1$	Tauón (τ) $3477, -1$
	Neutrino e. (ν_e) $< 0.000006, 0$	Neutrino μ . (ν_μ) $< 0.37, 0$	Neutrino t. (ν_τ) $< 36, 0$
	1 ^{ra} . <u>generación</u>	2 ^{da} . generación	3 ^{er} . generación

Bastaría con estas partículas para describir a la materia ordinaria

¡Nadie sabe por qué existen estas 'copias privadas'!

Cada leptón está asociado a un campo espinorial

(de Dirac). P.ej.,

$$e(\vec{x}, t) \equiv \begin{pmatrix} e_1(\vec{x}, t) \\ e_2(\vec{x}, t) \\ e_3(\vec{x}, t) \\ e_4(\vec{x}, t) \end{pmatrix}$$

← funciones complejas que se mezclan entre sí bajo rotaciones y Lorentz, y describen tanto a las partículas e^- (con $S_z = \pm 1/2$) como a las antipartículas e^+ ($S_z = \pm 1/2$).

Dado que los quarks tienen igualmente $s = 1/2$, para describirlos usamos también campos espinoriales, pero curiosamente, cada quark está en realidad asociado no a 1 sino a 3 campos de Dirac. P.ej.

$$u(\vec{x}, t) \equiv \begin{bmatrix} u^1(\vec{x}, t) \\ u^2(\vec{x}, t) \\ u^3(\vec{x}, t) \end{bmatrix}, \quad u^c(\vec{x}, t) \equiv \begin{pmatrix} u_1^c(\vec{x}, t) \\ u_2^c(\vec{x}, t) \\ u_3^c(\vec{x}, t) \\ u_4^c(\vec{x}, t) \end{pmatrix}$$

llamamos a c el índice "de color", y decimos que los valores $c=1, 2, 3$ corresponden a "rojo", "verde" y "azul".

(Como veremos más adelante, estos "colores" son en realidad nuevos tipos de cargas.) Existen entonces 3 variedades


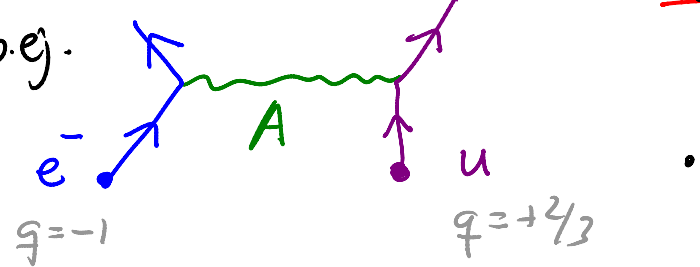
distintas de cada tipo de quark; p.ej. arriba rojo y antiarriba antirrojo (ambos descritos por $u^1(\vec{x}, t)$), arriba verde y antiarriba antivverde (asociados a $u^2(\vec{x}, t)$), arriba azul y antiarriba antiazul (asociados a $u^3(\vec{x}, t)$). La razón por la cual no los contamos como 3 partículas distintas, sino como 3 componentes de un mismo 'paquete', es que se mezclan entre sí cuando cambiamos nuestro 'punto de vista' implementando ciertas 'rotaciones' abstractas que mencionaremos más adelante. (Esto es completamente análogo a la razón por la cual no consideramos al electrón con $s_z = +1/2$ y aquel con $s_z = -1/2$ como 2 partículas distintas: sus identidades se intercambian si giramos la cabeza.) Los leptones se distinguen de los quarks precisamente porque NO tienen carga de color (además de que poseen distintas cargas eléctricas).

II) Fuerzas — existen 2 fuerzas fundamentales, que se originan del intercambio de 3 partículas mensajeras, todas con $s=1$, y todas \therefore bosones:

1) Interacción Electromagnética \leftrightarrow Fotón ($m=0, g=0$)

asociado a campo vectorial $A_{\omega}(\vec{x}, t) = (\Phi(\vec{x}, t), \vec{A}(\vec{x}, t))$
 $\omega \leftarrow 0,1,2,3$

(que no tiene índice "c" \Rightarrow el fotón es neutro de color).

El proceso básico es ;
 cualquier partícula con carga eléctrica
 con él entendemos p.ej. 
 e^- $g=-1$ u $g=+2/3$

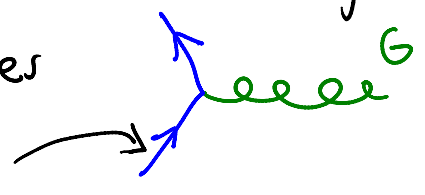
2) Interacción Fuerte \leftrightarrow Glúan ($m=0, g=0$)

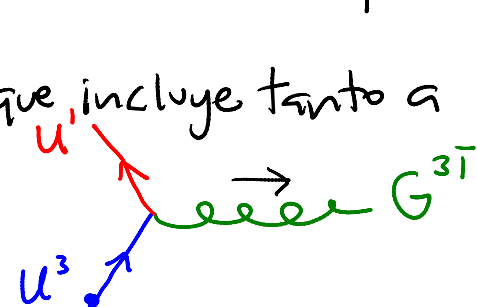
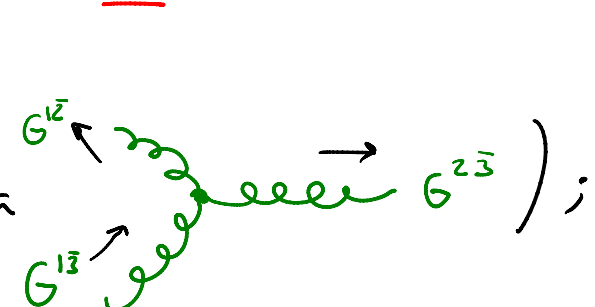
Su existencia queda clara si pensamos en un núcleo atómico (los protones se repelen electromagnéticamente y los neutrones no ayudan, por lo que debe existir una fuerza, más intensa que el electromagnetismo, que sea la responsable de mantener el núcleo unido).

Al igual que el fotón, el gluón está asociado a un campo vectorial, $G_{\omega}(\vec{x}, t)$, pero tiene además índice de color. Se le puede pensar como una matriz ^{hermitiana} (sin traza):

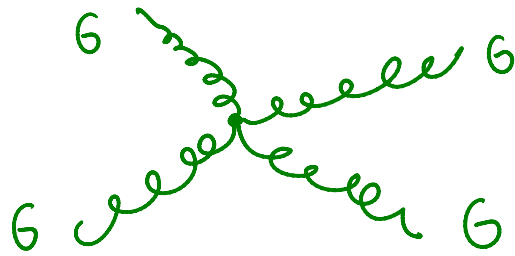
$$G_{\omega}(\vec{x}, t) \equiv \begin{bmatrix} G_{\omega}^{1\bar{1}}(\vec{x}, t) & G_{\omega}^{1\bar{2}}(\vec{x}, t) & G_{\omega}^{1\bar{3}}(\vec{x}, t) \\ G_{\omega}^{2\bar{1}}(\vec{x}, t) & G_{\omega}^{2\bar{2}}(\vec{x}, t) & G_{\omega}^{2\bar{3}}(\vec{x}, t) \\ G_{\omega}^{3\bar{1}}(\vec{x}, t) & G_{\omega}^{3\bar{2}}(\vec{x}, t) & G_{\omega}^{3\bar{3}}(\vec{x}, t) \end{bmatrix},$$

es decir, existen en realidad 8 distintas variedades de gluones (pej. $G_{\omega}^{1\bar{2}}(\vec{x}, t)$ describe gluones rojo-antiverdes). El color es precisamente la carga (de 3 tipos distintos!) asociada a la interacción fuerte, lo cual implica en particular que los leptones no experimentan esta fuerza, pero los quarks sí. Y los gluones, portadores de la fuerza, están a su vez cargados!

Existen 2 procesos básicos: el primero es cualquier partícula con color 

(que incluye tanto a  como a );

el segundo es



La teoría que describe a los quarks y los gluones interactuando de esta manera se llama **Cromodinámica Cuántica (QCD)**.

Usando los procesos básicos podemos explicar, p.ej.,

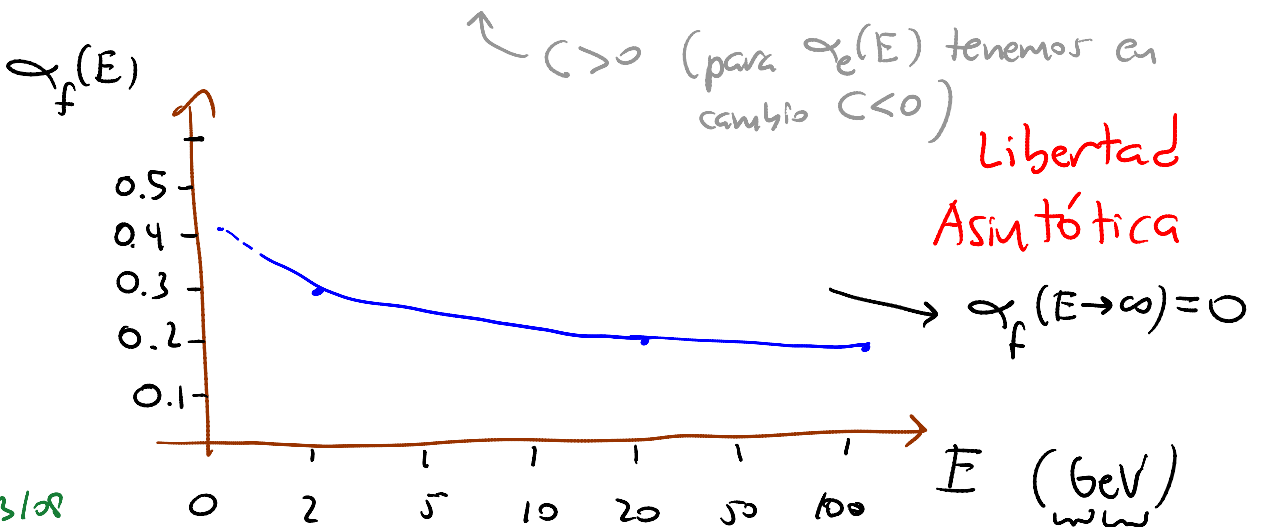


Como resultado de este tipo de procesos, un quark aislado está siempre rodeado de una nube de quarks, antiquarks y gluones virtuales que continuamente aparecen y desaparecen (además de los quarks, antiquarks, leptones, antileptones y fotones que resultan de procesos electromagnéticos). Esto implica en particular que la magnitud g de su carga de color (al igual que su masa y su carga eléctrica) depende de la distancia a la cual lo exploremos.

Lo curioso es que, debido a la contribución de los gluones virtuales, la 'constante' de acoplamiento fuerte $\alpha_f \equiv \frac{g^2}{4\pi k_c}$ evoluciona justo al revés que la constante de acoplamiento electromagnética $\alpha_e \equiv \frac{g_e^2}{4\pi k_c}$. A distancias pequeñas o, lo que es lo mismo, energías grandes, tenemos

$$\alpha_f(E) = \frac{\alpha_f(E_0)}{1 + C \alpha_f(E_0) \ln\left(\frac{E}{E_0}\right)}$$

← energía de referencia



↖ $C > 0$ (para $\alpha_e(E)$ tenemos en cambio $C < 0$)

23/08

escala característica de QCD

Mega $\equiv 10^6$

Giga $\equiv 10^9$

1 eV = 1.6×10^{-19} J

Para $E \gg \Lambda_{QCD} \approx 200$ MeV ($\leftrightarrow r \ll r_{QCD} \approx 1$ fm "Fermi")

↑ femto $\equiv 10^{-15}$

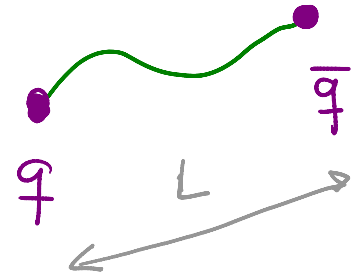
tenemos acoplamiento débil, $\alpha_f(E) \ll 1$.

Es decir, a separaciones muy pequeñas los quarks y gluones se comportan como partículas casi libres, y podemos describirlos adecuadamente en términos de una expansión perturbativa en potencias de α_f .

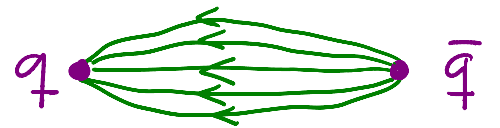
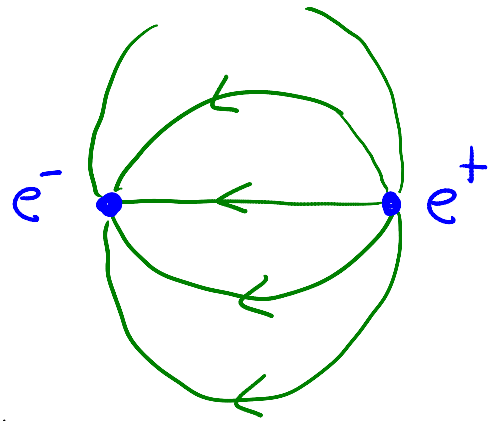
Esto tiene ciertas consecuencias específicas que es posible verificar experimentalmente en colisiones de altas energías, y es así como llegamos a convencernos de que, p.ej., los protones y neutrones están hechos de quarks.

Pero el reverso de la moneda es el hecho de que para $E \lesssim \Lambda_{QCD} \approx 200 \text{ MeV}$ ($\Leftrightarrow r \gtrsim r_{QCD} \approx 1 \text{ fm}$) tenemos $\alpha_f(E) \gtrsim 1$, es decir, los quarks y gluones están fuertermente acoplados, y tenemos \therefore severas dificultades para calcular o siquiera visualizar su comportamiento. En este régimen, la energía potencial de un sistema quark-antiquark **¡AUMENTA** linealmente con la distancia!!

Una manera burda de visualizar esta extraña situación es imaginar que el quark y el antiquark están unidos por una especie de "liga" que está "floja" cuando $L \lesssim 1 \text{ fm}$ y "tensa" cuando $L \gtrsim 1 \text{ fm}$.

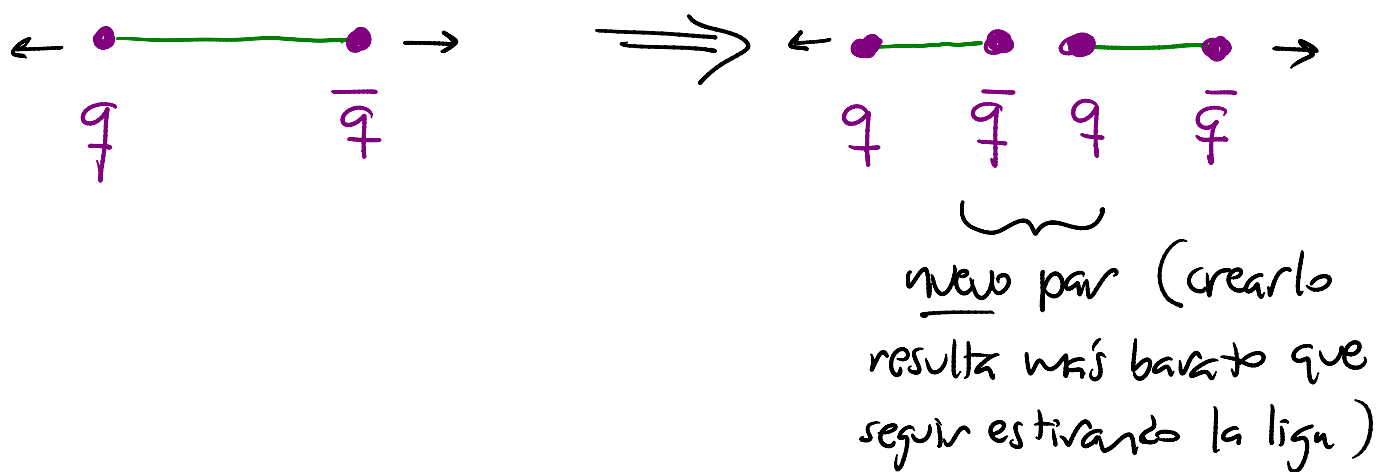


Esto resulta no estar muy lejos de la verdad: en esencia, lo que está sucediendo es que, en lugar de que el campo gluónico adopte un perfil dipolar análogo al caso electromagnético, debido al hecho de que los gluones mismos tienen color, las líneas de campo se concentran en un 'tubo de flujo' relativamente delgado, que hace las veces de la "liga".



(Como veremos más adelante, sorprendentemente la teoría de cuerdas puede ayudarnos a entender en más detalle esta "liga" — y de hecho nació así.)

Debido a que el potencial entre un quark y un antiquark crece linealmente con la distancia, resulta imposible separarlos por completo, porque para ello sería necesario suministrar una energía infinita! Al intentar separarlos, lo que obtenemos en realidad son 2 (o más) pares quark-antiquark:



Más en general, la intensidad de la interacción fuerte a distancias grandes tiene como consecuencia lo que llamamos **confinamiento**: los objetos con color nunca son vistos aislados, sólo solo en combinaciones neutras de color! Los pares quark-antiquark son precisamente un ejemplo: en nuestros detectores los

veamos solo como estados ligados que llamamos mesones (p.ej. los "piones": $\pi^+ \approx u\bar{d} \equiv u^1\bar{d}^1 + u^2\bar{d}^2 + u^3\bar{d}^3$, $\pi^- \approx \bar{u}d$, $\pi^0 \approx u\bar{u} + d\bar{d}$).

Interesantemente, resulta que para obtener una combinación neutra de color, no solo existe la posibilidad obvia de cancelar un color dado con su correspondiente anticolor (análogamente al caso electromagnético — p.ej. $e^- \mu^+$), sino que también funciona combinar los 3 colores rojo, verde y azul a la vez, por partes iguales.

(Esta fue precisamente la motivación para llamarle "color" a la carga asociada a la interacción fuerte.)

Obtenemos entonces estados ligados de 3 quarks, que llamamos bariones, como el protón y el neutrón:

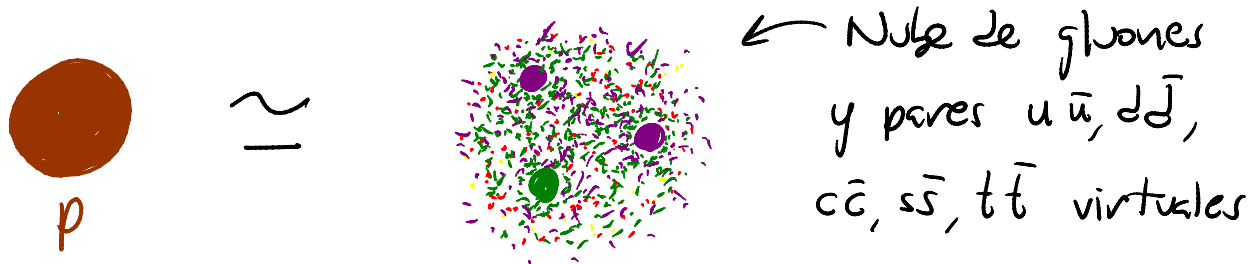
$p \approx uud \equiv u^1u^2d^3 - u^1u^3d^2 - u^2u^1d^3 + u^2u^3d^1 + u^3u^1d^2 - u^3u^2d^1$,
 $n \approx udd$.) Un punto que a primera vista resulta

muy confuso es que, p.ej., $\underbrace{m_p}_{1836} \gg \underbrace{2m_u + m_d}_{2(5) + 12}$!

Pero la explicación proviene de lo que ya hemos visto: un protón se forma en el régimen de acoplamiento fuerte de la interacción fuerte, así que de ninguna manera debemos visualizarlo como



sino (todavía muy vagamente) como



(Además hay que tener en mente que, dado que nunca observamos a un quark aislado, cuando hablamos de su masa evidentemente no podríamos referirnos a la masa que tendría "visto desde lejos", como si hacemos con peej. el electrón.) Vale la pena resaltar esta idea: ¡¡ más del 99 % de nuestra masa proviene de partículas virtuales y $E=Mc^2$!!