

3.3. Fuerza Nuclear Fuerte

- La idea principal es investigar la respuesta a:
¿Por qué el núcleo no se desintegra?

Sus componentes son: protones + neutrones.

Por EM, los protones deberían repelerse, y no debería haber núcleo.

Entonces, ¿Qué sucede?

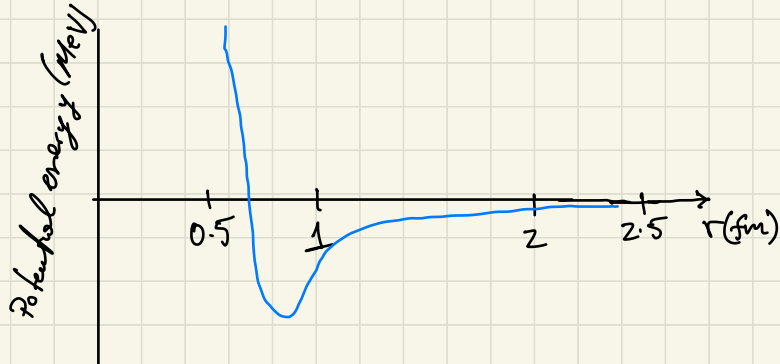
→ "Algo" hace que los protones no salgan volando.

Debemos primero establecer que este "algo" tiene que cumplir con que:

- 1) A muy cortas distancias debe ser repulsiva $r < 0.7 \text{ fm}$
- 2) A cierto rango de distancias tiene que ser atractiva $0.8 \text{ fm} \leq r \leq 2.5 \text{ fm}$
- 3) Debe desvanecerse drásticamente a grandes distancias $r \geq 2.5 \text{ fm}$.

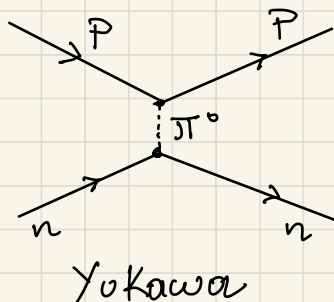
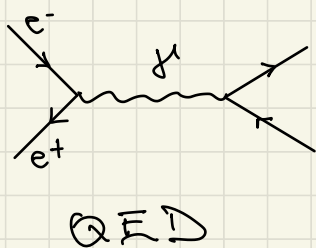
Esto aplica a protones y neutrones.

Podemos proponer un potencial Yukawa para describir esto:



- Esto fue propuesto por Hideki Yukawa en 1934, dos años después del descubrimiento del neutrón por Chadwick.
- Intentó describir la interacción entre nucleones con ayuda de un bosón masivo.

La idea es similar a la interacción fermión-luz.



Para deducir este potencial, utilizamos ec. (3.11)

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

y sustituimos

$$E = i\hbar \partial_t, \quad p = -i\hbar \nabla$$

lo que arroja para un campo Φ :

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \mu^2 \right) \Phi(\vec{r}, t) = 0 \quad (3.15)$$

con $\mu = \frac{mc}{\hbar}$.

Nota que si $m=0$ (como en el caso del fotón):

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Phi(\vec{r}, t) = 0 \quad (3.16)$$

Esta es la ecuación de onda.

En el caso de un campo electrostático $\frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$ y:

$$\nabla^2 \phi(\vec{r}) = 0.$$

La presencia de una fuente q en el origen se describe con la ec. de Poisson:

$$\nabla^2 \phi(\vec{r}) = - \frac{q}{\epsilon_0} \delta(\vec{r}) \quad (3.17)$$

con solución

$$\phi(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (3.18)$$

Para Yukawa el mediador sí tiene masa:
¿Por qué?

$$(\nabla^2 - \mu^2) \phi(\vec{r}) = G \delta(\vec{r}) \quad (3.19)$$

donde G juega el papel de q .

La solución a (3.19) es **TAREA**

$$\phi(r) = -\frac{G}{4\pi} \frac{e^{-\mu r}}{r} \quad (3.20)$$

Nota: en EM las cargas son las fuentes para el fotón. Aquí, los nucleones son las fuentes.

Si consideramos un segundo nucleón en \vec{R} ,
la energía potencial es:

$$\begin{aligned} V &= G \int d^3r \psi^*(\vec{r}) \psi(\vec{r}) \phi(\vec{r}) \\ &= G \int d^3r \delta(\vec{r} - \vec{R}) \phi(\vec{r}) \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{localizado en } \vec{R} \\ |\psi|^2 = \delta^{(3)}(\vec{r} - \vec{R}) \end{array} \\ &= G \phi(\vec{R}) \\ &= -g^2 \frac{e^{-\mu R}}{R} \end{aligned} \quad (3.21)$$

con $g^2 = G^2/4\pi$.

Este es el potencial de Yukawa para la interacción nucleon-nucleon.

Pero, tiene sus limitantes:

- Fuerza repulsiva a $r \lesssim 0.5 \text{ fm}$ OPEP TAREA
- Zoológico hadrónico
- Fenómenos a altas energías
- El $\Delta^{++} (uuu)$.

→ Viola el Principio de Exclusión.

Significa que se debe proponer un modelo que explique todo lo anterior.

- Antes de discutir QCD, es necesario discutir brevemente isospin.

Dado que protones y neutrones se comportan casi igual en la fuerza fuerte, los acomodamos en un doblete

$$N = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$$

que transforma bajo SU(2), que es el grupo de matrices unitarias de 2×2 con $\det = 1$.

In short: Isospin es una simetría de sabor global
¿Por qué funciona?

→ Resultados experimentales.

De hecho, varios de estos resultados apuntaban a que el nucleón tenía estructura interna. **TAREA**

- Pero, recordemos que en los 50-60's se comenzaron a descubrir hadrones que se lograron clasificar con el:

→ eightfold way: $SU(3)$ global

- Ya discutimos que estas partículas se acomodaban en octetos y decuplets, pero

¿Por qué?

- En 1964 Gell-Mann y Zweig explicaron esto al proponer constituyentes de spin $1/2$ con carga fraccionaria:

quarks: u, d, s .

Con esto, se constituyó $SU(3)$ de sabor, escrito como $SU(3)_F$.

Aquí deberíamos hablar de grupos, pero se los dejo de tarea.

Podemos construir

- Mesones $q\bar{q}$: $3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$
octeto + singlet.

- Bariones qqq : $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$.
octeto + decuplet.

• Pero, otra vez, esta propuesta tiene sus limitantes. Por ejemplo, no explica:

- Dinámica.

- El $\Delta^{++}(uuu)$.

TAREA - Resultados del deep-inelastic scattering.

- Quarks libres: No se observan.

Otro issue es que $SU(3)_F$ es exacto solo cuando

$$m_u = m_d = m_s$$

y experimentalmente tenemos

$$m_u \approx m_d \ll m_s.$$

Por lo que $SU(3)_F$ es una simetría aproximada.

• Para resolver esto, Greenberg propuso en 1964 le dio una etiqueta de tres valores a los

quarks.

- Un año después, Han y Nambu formalizaron esto con el grupo $SU(3)$ pero con simetría local. Esto da lugar a que los quarks interactúen por medio de gluones.
- Todo esto se formalizó en 1973 por Fritzsche, Leutwyler y Gell-Mann bajo el nombre de Quantum Chromodynamics.

El Lagrangiano de esta teoría es:

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{a,\mu\nu} + \sum_f \bar{q}_f (i\gamma^\mu D_\mu - m_f) q_f, \quad (3.22)$$

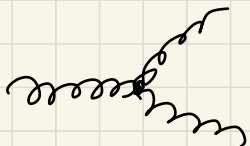
con:

$$D_\mu = \partial_\mu - ig_s T^a A_\mu^a,$$

y

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g_s f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c.$$

Esto da lugar a autointeracciones del gluón, cosa que no pasa con el fotón.



Esto es una teoría de Yang-Mills, indicado por $f_{abc} \neq 0$.

- Un par de características importantes son:
 - Asymptotic freedom, **TAREA**
 - Confinamiento