

Interacciones Fundamentales:

La interacción electromagnética es responsable de la estabilidad del átomo, ligando los electrones a los núcleos. La formación de moléculas (enlaces químicos), las propiedades de la materia (en sus fases sólidas, líquida o gaseosa), las corrientes eléctricas (las del impulso nervioso o los rayos de las tormentas), el magnetismo terrestre (que nos protege del viento solar y sirve para orientarnos usando la brújula) y, por supuesto, está detrás de toda la tecnología moderna. Si podemos empujar objetos, darle la mano a alguien sin atravesarlo o mantenernos de pie sin desplomarnos ni atravesar el suelo que pisamos, es gracias a la interacción electromagnética, pues los átomos están huecos. La repulsión electromagnética entre los electrones de las cortezas atómicas lo hace posible. Y, también las oscilaciones del campo electromagnético son las portadoras de la energía que nos calienta y la luz que nos ilumina. Las partículas intercambiadas en este tipo de interacción son los fotones (Fig. 1).

La interacción fuerte nuclear a nivel de elementalidad mayor es responsable de la estabilidad nuclear, manteniendo unidos protones y neutrones en el núcleo atómico, y es capaz de formar hadrones, estados ligados de quarks y/o antiquarks, entre los que se encuentran protones y neutrones (nucleones). Casi toda la masa del átomo está en el núcleo y es esencialmente la suma de las masas de sus nucleones. Pero solo una ínfima fracción de la masa de los nucleones está en la masa de sus quarks componentes. El resto tiene su origen en la formidable energía de ligadura que los mantiene confinados en su interior. Así que las masas de las cosas que vemos, hechas de átomos, en su gran mayoría “energía” debida a la interacción fuerte, una manifestación de la famosa ecuación $E = mc^2$.

La fuerza fuerte debía tener un alcance limitado, ya que no parecía manifestarse más allá del núcleo atómico, y al mismo tiempo, tenía que ser bastante intensa como para vencer la repulsión eléctrica entre protones. La nueva Fuerza, llamada Fuerza nuclear fuerte, fue comprendida cuando Hideki Yukawa explicó la interacción entre nucleones (protones y neutrones) por el intercambio de partículas: los mesones Pi. (Fig. 2).

La fuerza nuclear fuerte es una interacción que aparece entre hadrones (una clase de partículas del mismo grupo al que pertenecen el protón y neutrón). Se trata de una fuerza de muy corto alcance, apenas superior al propio radio del núcleo atómico (10^{-15} m). Es una fuerza 10^{38} mayor que la gravitatoria, ya que junto con la fuerza electromagnética, son de alcance infinito.

Desde entonces, se ha descubierto que los protones y neutrones y otras partículas similares se componen de otras llamadas quarks. Los experimentos mostraron que las fuerzas que contienen los quarks se debilitan cuando los quarks están juntos, de modo que dentro de los confines de un barión/hadrón, están esencialmente libres para moverse. Esta condición se conoce como “libertad asintótica”. Cuando dos quarks se separan, la fuerza atractiva entre ellos se hace más fuerte con la distancia, la energía asociada crece tanto que es lo suficientemente grande para formar un par quark-antiquark. Esta condición se conoce como “confinamiento”.

La interacción débil es responsable de gran parte de la radiactividad nuclear, concretamente de las desintegraciones beta de los núcleos.

Algunos núcleos radiactivos se desintegran en un proceso en el que un neutrón se convierte en un protón emitiéndose un electrón (radiación beta-) o bien un protón en un neutrón

emitiendo un positrón (radiación beta +). Esto da lugar a una “transmutación” nuclear en la que el núcleo inicial se convierte en otro núcleo de número atómico una unidad mayor o menor, respectivamente. Por ejemplo:



El neutrón es ligeramente más masivo que el protón, así que solamente la primera de las dos reacciones entre paréntesis puede darse fuera del núcleo.

La desintegración del carbono-14 permite datar muestras fósiles y los positrones del fluor-18 se utilizan para diagnóstico médico mediante tomografía por emisión de positrones (PET). La interacción débil permite explicar la fusión nuclear en las estrellas. También es relevante en la fisión nuclear, porque los productos de fisión son inestables y suelen desintegrarse emitiendo radiación beta, lo que le aporta energía adicional en forma de electrones, positrones y neutrinos.

La conservación de la energía implica que, en una desintegración, las masas finales no pueden superar a la masa inicial. Sin embargo, dentro del núcleo ambas reacciones son posibles ya que el núcleo inicial tiene mayor masa que al final, debido a la diferente energía de ligadura. Así, fuera del núcleo, el protón es estable al no poder decaer, mientras que el neutrón es inestable, viviendo un $\frac{1}{4}$ de hora.

Estos procesos radiactivos se deben a la interacción débil (fuerza 10^{25} mayor que la gravitatoria y de corto alcance 10^{-18} m) y en todos ellos la emisión de un electrón o un positrón va siempre acompañada de un antineutrino o neutrino, respectivamente. El neutrino es una partícula teorizada por Wolfgang Pauli en 1930, que no fue descubierta hasta treinta años más tarde. Un buen ejemplo de poder predictivo de la física. “Ahora lo que importa realmente es determinar que fuerzas actúan sobre el neutrón de modo que este no pudiese mantenerse en el núcleo en el caso en que tales fuerzas no existiesen o fuesen demasiado débiles” (Wolfgang Pauli, en una carta dirigida a Félix Klein en 1930)

Resulta que cuando una partícula decae a solo otras dos, la energía de ambas partículas finales queda completamente fijada por los valores de las masas de las partículas madre y las dos partículas hijas. Como se había observado que la radiación beta resultante no tenía una energía fija, sino un espectro continuo, Pauli propuso que debía emitirse además una tercera partícula para restaurar la conservación de la energía en la reacción. La conservación de la carga exigía que la nueva partícula fuera neutra. Fue bautizada por Fermi como “neutrino” para distinguirla del neutrón. Por otro lado, la conservación del momento angular en esta reacción no sería posible si no existiera un neutrino, que debe ser un fermión de espín $\frac{1}{2}$, igual que el electrón, el protón y el neutrón.

| $J = 1/2$ | Q | Masa |
|-----------|----|--------------|
| ν_e | 0 | $< 0,000002$ |
| e | -1 | 0,511 |
| p | +1 | 938 |
| n | 0 | 939 |

Primeras partículas sub-atómicas

(Todas de espín $\frac{1}{2}$).

Cargas eléctricas en unidades de la

Carga del protón y masas en MeV/c^2 .

Como referencia: $1 \frac{\text{MeV}}{c^2} = 1,8 \cdot 10^{-27} \text{ g}$.

Las partículas intercambiadas en este tipo de interacción son W^+ , W^- y Z^0

A pesar de ser la fuerza dominante en el cosmos, la interacción gravitatoria no es protagonista en ningún proceso a escala subatómica, al ser, con mucha diferencia, la más débil de las cuatro interacciones fundamentales. Se trata de una interacción atractiva de largo alcance experimentada por cualquier cualquier cuerpo que tenga masa o, en general, energía. Así se va acumulando en objetos muy grandes, como las estrellas y planetas, a diferencia de la fuerza electromagnética que por ser atractiva o repulsiva dependiendo del signo de la carga, acaba compensándose. Y mientras que las partículas con cargas eléctricas son sometidas a fuerzas que dependen de su propia velocidad, a las partículas con masa no le sucede. La fuerza de gravedad es la más débil a distancias muy pequeñas y la fuerza electromagnética es 10^{36} mayor que la gravitatoria.

La Teoría de la Relatividad de Einstein describe la gravitación con gran precisión mediante un campo de interacción que representa la geometría del propio espacio-tiempo, que se deforma, estira y ondula alterando las medidas de distancias e intervalos de tiempo. Sus variaciones tienen por tanto una interpretación distinta a las de cualquier otro campo, hasta el punto que puede decirse que la gravedad no es una fuerza sino una geometría. No disponemos de una Teoría Cuántica consistente que incluya la gravedad, y por suerte no la necesitamos, excepto para describir procesos extremadamente energéticos que se dieron tras el Big Bang, cuando el universo era muy denso y estaba muy caliente. Los cuántos de estos campos se llaman gravitones.

Aunque no hay un procedimiento matemático simple para demostrar el intercambio de partículas entre dos cuerpos puede conducir a fuerzas de atracción o repulsión, podemos comprender intuitivamente el proceso por medio de una analogía. Imaginemos que dos muchachos intercambian pelotas (figura 3). Si se lanzan las pelotas simultáneamente, ambos se mueven hacia atrás, y cuando la atrapan las pelotas que les son lanzadas aumenta su momento hacia atrás. Así, este método de intercambiar pelotas produce el mismo efecto que una fuerza de repulsión entre los muchachos. Sin embargo, si los jóvenes se quitan las pelotas de las manos, el resultado será equivalente a una fuerza de atracción que actúa entre ellos.

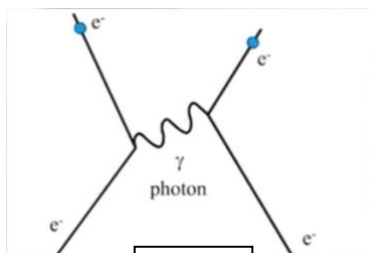


Fig. 3

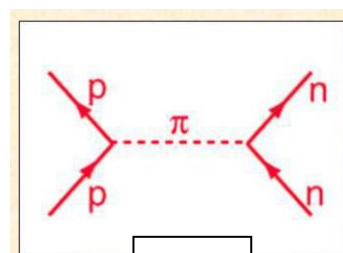


Fig. 2



Fig. 1

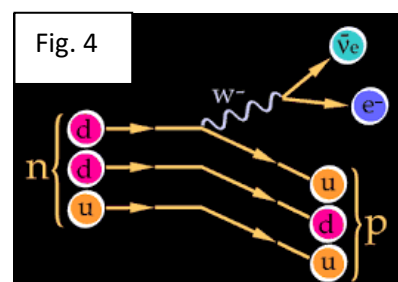


Fig. 4

Por ejemplo un quarks d (abajo) por un u (arriba) en la desintegración del neutrón (udd) a un protón (uud), $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ (Fig. 4).

Las interacciones fuerte, débil y la electromagnética son explicadas mediante intercambio de bosones. Por esta razón, las tres interacciones se acabaran integrando en un mismo modelo: el modelo estándar de las interacciones fundamentales. La verificación experimental de sus predicciones favorece su sólida implementación.

Resumen:

| | Agente | Alcance | Bosón | Actúa sobre | Intensidad rel |
|----------|-----------------|--------------|-----------|----------------------|----------------|
| Gravedad | Masa | ∞ | Gravitón? | Partículas con masa | 10^{-40} |
| Débil | Hipercarga | 10^{-18} m | W,Z | Todas | 10^{-13} |
| EM | Carga eléctrica | ∞ | Fotón | Partículas con carga | 10^{-2} |
| Fuerte | Carga de color | 10^{-15} m | Gluón | Quarks | 1 |

Así como la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil también interactúan entre quarks pero en vez de cambiar el color de los quarks (la carga total de color de una partícula tiene que ser nula, es decir, “blanca” porque nunca se puede arrancar un quark del interior de un hadrón), cambian su sabor (cambia la identidad de la partícula). Por ejemplo un quark d (abajo) por un u (arriba) en la desintegración del neutrón (udd) a un protón (uud), $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ o un s (extraño) por un u en la desintegración lambda (uds) a un protón y pión (du) $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$.