Introducción a las Partículas Elementales

1. El Núcleo

1.1. Propiedades de los núcleos

· El núcleo atómico es la región central del átomo que contiene practicamente toda su masa. Está compuesto por dos partículas:

- Protones (p, p^+), con carga positiva y masa de 938.272 MeV.
- Neutrones (n, n^0), sin carga y masa de 939.565 MeV.

Nota: Las masas son muy parecidas, ¿Por qué?

Este es un problema abierto, que se sigue investigando. Mi asesor es uno de ellos.

· Es por esto, que a estas dos partículas se les conoce como nucleones.

· Las propiedades que caracterizan al núcleo son:

- Número atómico (Z): total de protones.
- Número de neutrones (N): pues eso.

- Número de nucleones (A): Suma de p^+ y n^0.

Entonces, A se escribe como:

$$\boxed{A = Z + N.} \tag{1.1}$$

Importante: Z determina el elemento químico al que pertenece.

Hay núcleos con distinto número de neutrones:

Isótopos

⇝ átomos de un mismo elemento con distinta masa

· La forma en que representamos un núcleo es:

$${}^{A}_{Z}X$$

donde X representa el símbolo químico.

Por ejemplo, el Hidrógeno:

${}^{1}_{1}H$: protio, 1 protón

${}^{2}_{1}H$: deuterio, 1 protón + 1 neutrón

${}^{3}_{1}H$: tritio. 1 protón + 2 neutrones

Datos relevantes del núcleo:

- **Radio nuclear:**

Se puede determinar de forma experimental arrojando la siguiente relación.

$$\boxed{R = r_0 A^{1/3},} \qquad (1.2)$$

donde $r_0 \simeq 1.2 - 1.5\,fm$.

Ejemplo: Hidrógeno con $A = 1$: $R \simeq 1.2\,fm$

Plomo-208 con $A = 208$: $R \simeq 7.1\,fm$.

Conclusión: Muy pequeños.

Nota: ¿Cuál es el radio atómico?

Aprox. $0.1\,nm$ $(100{,}000\,fm)$.

- **Densidad nuclear:**

De manera sencilla podemos intentar calcular la densidad del núcleo.

Recordemos que: $\rho = \frac{m}{V}$

Tomemos un núcleo con número de nucleones A, entonces:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

$$= \frac{4}{3}\pi\left(r_0 A^{1/3}\right)^3$$
$$= \frac{4}{3}\pi r_0^3 A.$$

La densidad será:

$$\rho = \frac{Am}{4/3\,\pi r_0^3 A} = \frac{m}{4/3\,\pi r_0^3}$$

con m la masa del protón o neutrón. Esto arroja:

$$\boxed{\rho \approx 2.3\times10^{17}\,kg/m^3} \qquad (1.3)$$

Conclusión: La densidad es constante para todos los núcleos.

· **Masa y Energía**:

Si tomamos la masa de cada partícula que compone al núcleo y la sumamos, veremos que no arroja el valor esperado.

Ejemplo: Tomemos el Helio-4.

Contiene 2 protones + 2 neutrones

$$\text{Masas} \rightarrow 2(1.007276\,u) + 2(1.008664\,u)$$
$$= 4.03188\,u$$

Si pesamos directamente al ^4_2He tenemos:

$$M_{^4_2He} \simeq 4.0026\, u$$

La diferencia:

$$\Delta m = 4.03188\, u - 4.0026\, u$$
$$\simeq 0.02928\, u$$

¿Y esta energía restante?

Es conocida como binding energy

$$E_B \simeq 0.02928 u (931.5\ MeV/u)$$
$$\simeq 27.27\ MeV$$

B: binding

Esta es la energía que mantiene unido el núcleo.

Así es como se manifiesta la energía en reacciones nucleares.

Modelos nucleares

De forma resumida, discutamos un par de modelos que describen el núcleo!

- Liquid-drop model: Propuesto por Gamow y luego desarrollado por Bohr, Wheeler y Meitner.

Describe al núcleo como una gota de un

fluido incompresible con gran densidad, que se mantiene unido por fuerzas nucleares.

Recordando que la masa del núcleo puede escribirse como:

$$\boxed{m = N m_n + Z m_p - \frac{E_B}{c^2}} \qquad (1.4)$$

$c=1$

con m_n y m_p las masas del neutrón y protón, resp.

En este modelo, podemos estimar la E_B con ayuda de la fórmula de Weizsäcker

$$\boxed{E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \frac{(N-Z)^2}{A} \pm \delta(N,Z)} \quad (1.5)$$

con a_V, a_S, a_C, a_A determinados empíricamente.

Tenemos que:

$$\left.\begin{array}{ll} a_V & : \text{Término de volumen,} \\ a_S & : \quad " \quad \text{de superficie,} \\ a_C & : \quad " \quad \text{colombiano,} \\ a_A & : \quad " \quad \text{de asimetría,} \\ \delta(A,Z) & : \text{pairing term.} \end{array}\right\}$$

Cada uno tiene su razón física de ser.

TAREA

Este modelo es útil para explicar, de forma aprox., la fusión y fusión nuclear.

No explica efectos de capas, atribuidos a contribuciones cuánticas.

- Nuclear Shell model: Propuesto por Goeppert y Jensen en 1949, describe al núcleo como
  - Los nucleones ocupan niveles cuantizados de energía $\longrightarrow$ capas.
  - Se llenan según el principio de exclusión de Pauli.

Un resultado interesante de este modelo son los números mágicos. Estos llenan capas dentro del núcleo:

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. (y 184, maybe)

Si un núcleo tiene este número de protones o neutrones, será muy estable. TAREA

* No es bueno para nucleos grandes o deformados.

1.2. Radiactividad

- La radiactividad es un fenómeno mediante el cual ciertos núcleos pierden energía emitiendo partículas hasta llegar a una config. estable.

- Este fenómeno fue descubierto por Becquerel y Curie en 1896.

- Existen tres tipos:

- Radiación Alfa:

  El núcleo desprende núcleos de Helio (^4_2He).

  Por ejemplo: $^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + \underbrace{^4_2He}_{\text{lo que se va.}}$

  - Son poco penetrantes, pero muy ionizantes.

- Radiación Beta:

  Son electrones o positrones emitidos por procesos de conversión entre n^0 y p^+.

  - Beta menos:

  $$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$ antineutrino

  - Beta más:

  $$p \longrightarrow n + e^+ + \nu_e$$ neutrino

Más penetrante, no tan ionizante

Por ejemplo: $^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + e^{-} + \bar{\nu}_e$

- Radiación Gamma

· Fotones de alta energía son emitidos por el núcleo.

· Es radiación muy penetrante (altamente dañina).

Por ejemplo:

$$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni^{*} + e^{-} + \bar{\nu}_e$$ ¡Beta!

$$^{60}_{28}Ni^{*} \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni + \gamma$$ fotón

Gamma

· La radiactividad tiene una naturaleza probabilística, por la Mecánica Cuántica. Por esto, la tasa de decaimiento:

$$A(t) \equiv \boxed{\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)} \qquad (1.6)$$

N: número de núcleos

λ: constante de prop. del núcleo

Si la resolvemos obtenemos:

$$\boxed{N(t) = N_0 \exp(-\lambda t),} \qquad (1.7)$$

$\hookrightarrow A(t) = \lambda N(t)$
$= \lambda N_0 e^{-\lambda t}$
$\equiv A_0 e^{-\lambda t}$

donde $N_0 = N(0)$.

Esta es la ley del decaimiento exponencial.

"Cada núcleo tiene una probabilidad por unidad de tiempo constante λ de desintegrarse"

- Mencionemos dos cantidades importantes:

* <u>Half-life ($t_{1/2}$)</u>:

- tiempo requerido para que una cantidad se reduzca a la mitad.

Esto es,

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

Usamos $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad ; \quad e^{-\lambda t_{1/2}} = 1/2$$

$$\rightsquigarrow \quad \boxed{t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}} \qquad (1.8)$$

<u>Independiente de N_0</u>.

* Mean lifetime (τ):

Es el tiempo promedio que una partícula "vivirá" sin decaer.

$$\boxed{\tau = 1/\lambda} \qquad (1.9)$$

TAREA

- Crash Course en unidades naturales.

⇝ Necesitamos simplificar ecuaciones. Fijemos:

$$c = 1 \quad , \quad \hbar = 1 .$$

¿Qué implica?

- Longitud, tiempo y energía ya no son indep., se pueden convertir entre sí.
- Recordando que $E = mc^2$

$$\rightarrow E = m$$ ¡mismas unidades!

Tomemos al electronvoltio (eV):

"Energía ganada por un electrón al atravesar una dif. de potencial de un voltio"

$$1\,eV = 1.602 \times 10^{-19}\,J .$$

Calculamos la energía en reposo del electrón

$$E = m_e c^2 = (9.109\times10^{-31}\,kg)(3\times10^{8}\,m/s)^2$$
$$\approx 8.1871\times10^{-14}\,J$$
$$\approx 5.109\times10^{5}\,eV$$

$$\Rightarrow \quad E = 0.511\,MeV$$

Ahora, en unidades naturales $(c=1)$

$$m_e = 0.511\,MeV$$

Nota: en unidades SI sería

$$\boxed{m_e = 0.511\,MeV/c^2}$$