

Fundamentos de Energía Nuclear

Capítulo 2

Nociones de Física Atómica y Nuclear

Fundamentos de Energía Nuclear

Partículas fundamentales:

Leptones: electrón, positrón y neutrino

Fuerzas nucleares débiles

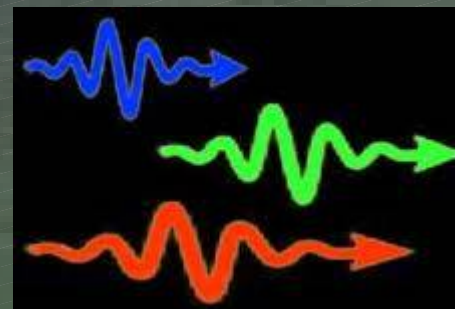
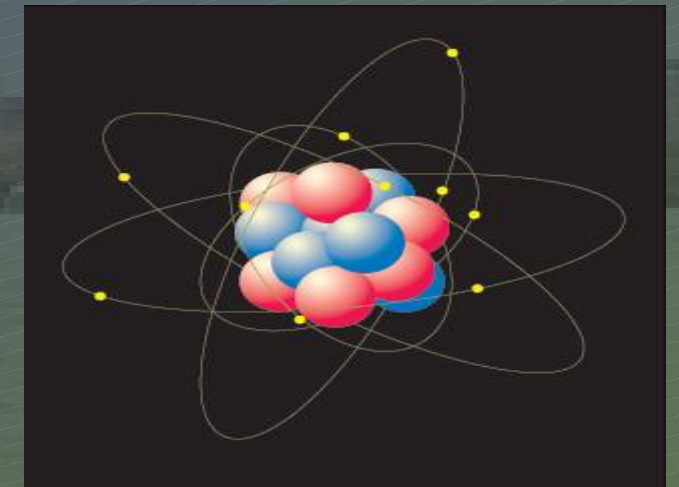
Hadrones: Protón y Neutrón

Fuerzas nucleares débiles y fuertes

Fundamentos de Energía Nuclear

Partículas fundamentales de interés:

- **Electrón**
- **Protón**
- **Neutrón**
- **Fotón**
- **Neutrino**



Fundamentos de Energía Nuclear

Partículas fundamentales de interés:

- Electrón

Positrón y Negatrón (Electrón)

Masa en reposo: $9.10954 \times 10^{-31} \text{Kg}$

Carga $e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{coulombs}$

Colisión: Producción de fotones, aniquilación electrónica.



Fundamentos de Energía Nuclear

Partículas fundamentales de interés:

- **Protón:**

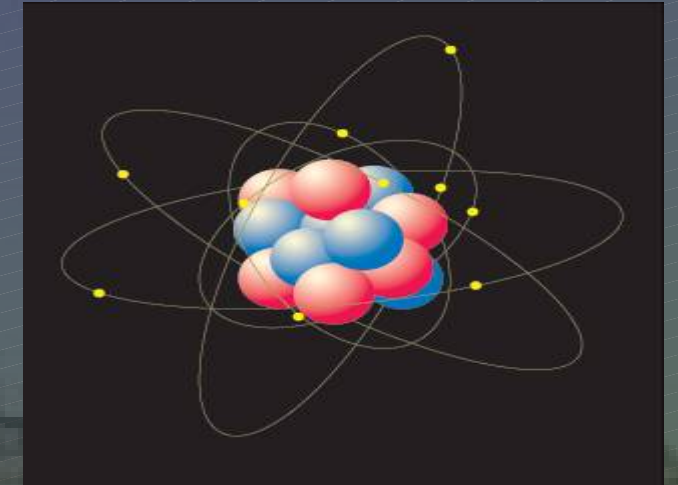
Masa en reposo: $1.67265 \times 10^{-27} \text{Kg}$

Carga igual al electrón solo que positiva

- **Neutrón:**

Masa en reposo: $1.67495 \times 10^{-27} \text{Kg}$

eléctricamente neutro, puede decaer en protón con emisión de partícula beta



Fundamentos de Energía Nuclear

Partículas fundamentales de interés:

- Fotón:

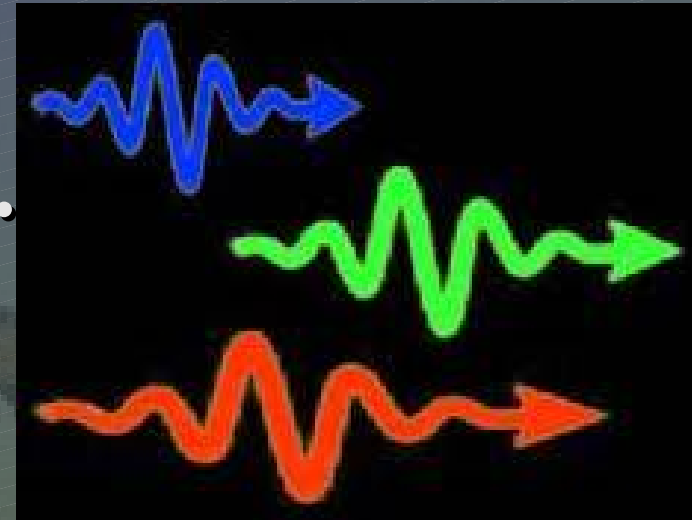
Onda electromagnética, comportamiento dual.

- Neutrino:

Masa en reposo: Cero

Aparece en el decaimiento de ciertos núcleos

6 tipos, 2 son importantes: electrón neutrinos y electrón antineutrinos.



Fundamentos de Energía Nuclear

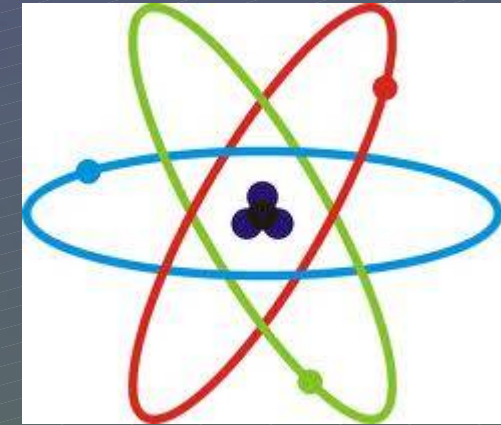
Estructura Atómica y Nuclear

- **Núcleo compuesto por nucleones: Protones y Neutrones**

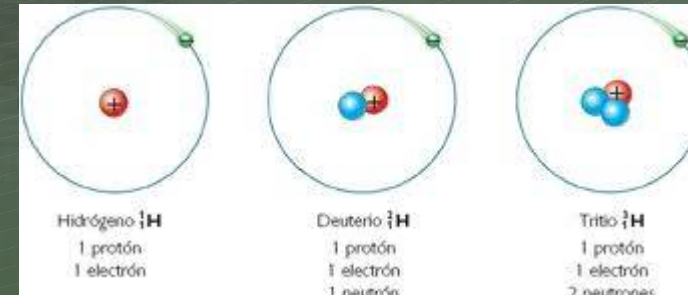
$Z = \text{Número de protones en el núcleo} = \text{Número Atómico}$

$N = \text{Número de neutrones en el núcleo}$

$A = Z + N = \text{Número Másico Atómico o Número de Nucleones}$



Isótopo: Igual Z pero diferente N



Fundamentos de Energía Nuclear

Isótopos de Oxígeno:

3 estables: ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O : $Z=8$ y $N=8, 9, 10$

5 inestables: ^{13}O , ^{14}O , ^{15}O , ^{19}O y ^{20}O : $Z=8$ y $N=5, 6, 7, 11, 12$.

Abundancia en la naturaleza: 99.8% ^{16}O , 0.037% ^{17}O y 0.204% ^{18}O .

a/o = abundancia en porcentaje atómico

Fundamentos de Energía Nuclear

Ejemplo:

**Un vaso de agua contiene 6.6×10^{24} átomos de hidrógeno.
¿Cuántos átomos de deuterio están presentes?**

Abundancia del ^2H es a/o= 0.015



Fundamentos de Energía Nuclear

Respuesta:

Abundancia del ^2H es a/o= 0.015 entonces la fracción de deuterio es 1.5×10^{-4}

Total de átomos de ^2H es: $(1.5 \times 10^{-4})(6.6 \times 10^{24}) = 9.9 \times 10^{20}$

Fundamentos de Energía Nuclear

Peso atómico

$$M(^AZ) = 12 \times \frac{m(^AZ)}{m(^{12}C)}$$

Donde: $M(^AZ)$ es el peso atómico, $m(^AZ)$ es la masa del átomo neutro para AZ y $m(^{12}C)$ es la masa del ^{12}C neutro

Fundamentos de Energía Nuclear

Como los elementos en la naturaleza consisten de un numero de isótopos, el peso atómico de un elemento esta definido como el promedio del peso atómico de la mezcla.

$$M = \sum \gamma_i M_i / 100$$

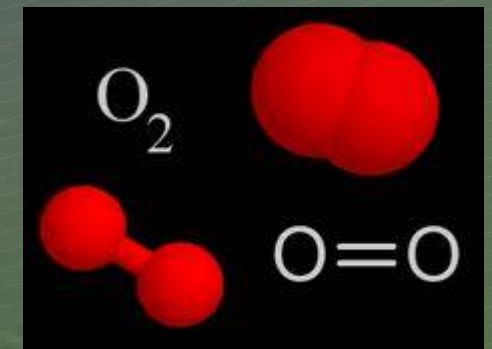
Fundamentos de Energía Nuclear

Peso molecular

Se define como masa total de una molécula relativa a la masa del átomo neutral ^{12}C .

Por ejemplo: el oxígeno consiste de la molécula O_2 , y su peso molecular por lo tanto es de

$$2 \times 15.99938 = 31.99876$$



Fundamentos de Energía Nuclear

Ejemplo 2.

Usando los datos de la siguiente tabla, calcule el peso atómico del Oxígeno natural.

Isótopo	Abundancia (a/o)	Peso atómico
^{16}O	99.756	15.99492
^{17}O	0.039	16.99913
^{18}O	0.204	17.99916

Fundamentos de Energía Nuclear

Mole.

Es el peso atómico o molecular de una sustancia expresado en unidades de masa (g).

Ejemplo, un gramo de peso atómico o una mole de ^{12}C es exactamente 12 g de ese isótopo.

Una mole de gas O_2 tiene 31.99876 g.

Número de Avogadro: número de átomos o moléculas contenidos en una mole.

$$N_A = 0.6022045 \times 10^{24}$$

Fundamentos de Energía Nuclear

Usando el N_A se puede calcular la masa de un átomo simple o molécula.

Ejemplo:

$$m \text{ (}^{12}\text{C)} = \frac{12}{0.6022045 \times 10^{24}} = 1.99268 \times 10^{-23} \text{ g}$$

La masa de cualquier átomo en una es numéricamente igual al peso atómico del átomo en cuestión.

$$m(AZ) = M(AZ) \text{ uma}$$

Fundamentos de Energía Nuclear

Ejercicio:

El peso atómico del Co^{59} es 58.933200

Cuántas veces es más pesado el Co^{59} que el C^{12} ?

Fundamentos de Energía Nuclear

Ejercicio:

Cuántos átomos hay en 10 g de C^{12} ?

Fundamentos de Energía Nuclear

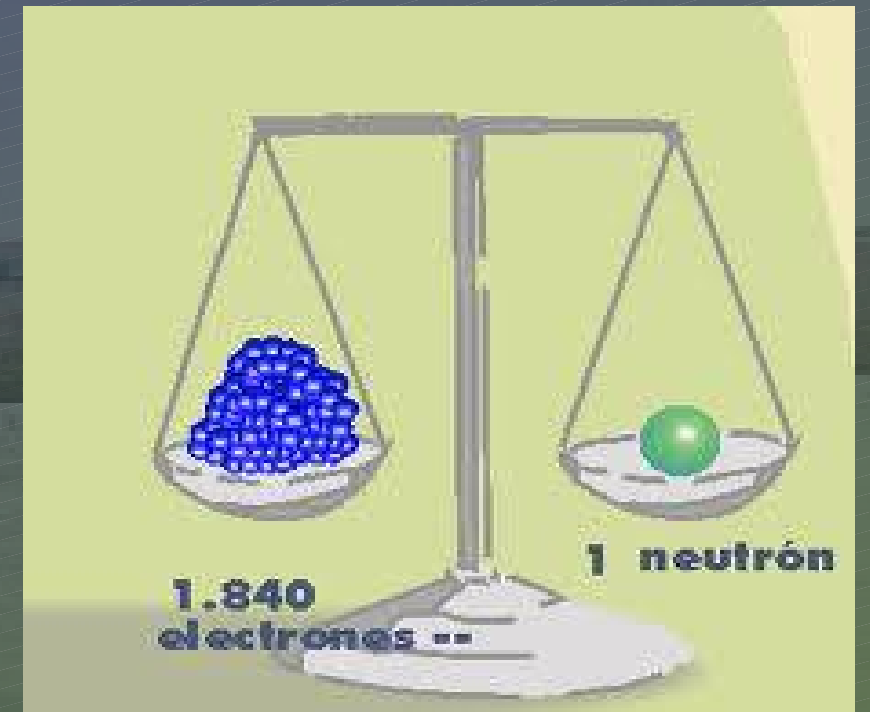
Ejercicio:

Calcular el peso molecular de:

a.- Gas H_2

b.- H_2O

c.- H_2O_2



Fundamentos de Energía Nuclear

Ejercicio:

El Uranio natural esta compuesto por tres isótopos U^{238} , U^{235} y U^{234} .

Calcule el peso atómico del Uranio natural.

Isótopo	Abundancia (a/o)	Peso atómico
U^{238}	99.27	238.0508
U^{235}	0.72	235.0439
U^{234}	0.0057	234.0409

Fundamentos de Energía Nuclear

Radio nuclear y atómico

El radio atómico promedio es aprox. 2×10^{-10} m

El radio nuclear está dado por:

$$R = 1.25 \text{ fm} \times A^{1/3}$$

Donde: R está en femtómetros ($\text{fm} = 1 \times 10^{-13}$ cm) y A es el número de masa atómica.

Fundamentos de Energía Nuclear

Masa y Energía

Ecuación de Einsten:

$$E_{rest} = m_0 c^2$$

Donde: E_{rest} es la energía potencial, m_0 es masa en reposo y c es la velocidad de la luz. Ejemplo la aniquilación de 1 g de materia libera una

$$E_{rest} = 1 \times (2.9979 \times 10^{10})^2 = 8.9874 \times 10^{20} \text{ erg} = 8.9874 \times 10^{13} \text{ joules}$$

Fundamentos de Energía Nuclear

Electrón volt (eV): Incremento de energía cinética de un electrón cuando pasa a través de una diferencia de potencial de un volt.

$$1 \text{ } eV = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ coulomb} \times 1 \text{ V} = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ joules.}$$

Ejemplo: Calcule la Energía potencial de un electrón en MeV

Fundamentos de Energía Nuclear

Respuesta a: Calcule la Energía potencial de un electrón en MeV

$$E_{rest} = m_0 c^2 = 9.1095 \times 10^{-28} \times (2.9979 \times 10^{10})^2 = 8.1871 \times 10^{-7} \text{ erg}$$

$$= 8.1871 \times 10^{-14} \text{ joules} \div (1.6022 \times 10^{-13} \text{ joules/ MeV}) = 0.5110 \text{ MeV}$$

Ejemplo: Calcule la Energía equivalente de una uma

Fundamentos de Energía Nuclear

Respuesta a: Calcule la Energía potencial de un electrón en MeV

$$E_{rest} = m_0 c^2 = 9.1095 \times 10^{-28} \times (2.9979 \times 10^{10})^2 = 8.1871 \times 10^{-7} \text{ erg}$$

$$= 8.1871 \times 10^{-14} \text{ joules} \div (1.6022 \times 10^{-13} \text{ joules/ MeV}) = 0.5110 \text{ MeV}$$

Ejemplo: Calcule la Energía equivalente de una uma

Fundamentos de Energía Nuclear

Respuesta a: Calcule la Energía equivalente de una
uma

x 0.5110 MeV / electrón

$1.6606 \times 10^{-24} \text{g/uma}$

$9.1095 \times 10^{-28} \text{g/electrón}$

$= 931.5 \text{ MeV}$

Fundamentos de Energía Nuclear

Cuando un cuerpo entra en movimiento, la relación de masa se incrementa de acuerdo con la fórmula:

$$m = \frac{m_0}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}}$$

Donde: m_0 es masa en reposo y v su velocidad.

Fundamentos de Energía Nuclear

Energía total de una partícula:

$$E_{total} = m c^2$$

Energía cinética de una partícula:

$$E = m c^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left[\frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} - 1 \right]$$

cuando $v \ll c$

$$E = \frac{1}{2} m_0 v^2, \quad m_0 v^2 \ll m_0 c^2$$

Fundamentos de Energía Nuclear

En la práctica es utilizada la siguiente aproximación:

$$E < 0.02 E_{rest}$$

Para electrones: Mecánica Clásica $E < 10 \text{ KeV}$

Para Neutrones: Mecánica Clásica $E < 20 \text{ MeV}$

Dado que muchos de los electrones encontrados en la Ingeniería Nuclear poseen una energía cinética grande es necesario utilizar la fórmula relativista.

Para el neutrón puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$v = 1.383 \times 10^6 (E)^{1/2}$$

Donde: v está en cm/s y E (energía cinética) en eV

Fundamentos de Energía Nuclear

La energía cinética de un fotón se calcula a partir de la fórmula:

$$E = h\nu$$

Donde: h es la constante de Planck ($4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$) y ν es la frecuencia de la onda electromagnética asociada al fotón

Fundamentos de Energía Nuclear

Longitudes de onda de la partícula

La longitud de onda (λ) de una partícula con un momentum p es:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Para partículas con Energía potencial diferente de cero

$$p = m v$$

Donde: m es la masa de la partícula y v su velocidad.

Fundamentos de Energía Nuclear

Para energías no relativistas p se calcula a partir de:

$$p = (2m_0 E)^{1/2}$$

Donde: E es la energía cinética, así la longitud de onda se puede calcular a partir de:

$$\lambda =$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E}}.$$

La longitud de onda del neutrón se obtiene:

$$\lambda = \frac{h}{(2m_0 E)^{1/2}}$$

$$\lambda = \frac{2.860 \times 10^{-9}}{\sqrt{E}}$$

Donde λ está en cm y E en eV

Fundamentos de Energía Nuclear

Para el caso relativista p se calcula a partir de:

$$p = \frac{(E_{Total}^2 - E_{rest}^2)^{1/2}}{c}$$

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{hc}{(E_{Total}^2 - E_{rest}^2)^{1/2}}$$

Para partículas con Energía potencial igual a cero

$$p = \frac{E}{c}$$

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1.240 \times 10^{-6}}{E}$$

Donde λ está en m y E en eV

Fundamentos de Energía Nuclear

Calcule la longitud de onda a un Mev de:

a.- Fotón

b.- Neutrón

Fundamentos de Energía Nuclear

Un electrón es acelerado desde el reposo por una diferencia de potencial de 5 millones de volts.

- a.- Cuál es la energía cinética final?
 - b.- Cuál es la energía total?
 - c.- Cuál es la masa final?
-
-

Fundamentos de Energía Nuclear

Un electrón se mueve con una energía cinética igual a la energía de su masa en reposo.

Calcular para el electrón:

a.- Energía total

b.- Masa

c.- Velocidad

d.- Longitud de onda

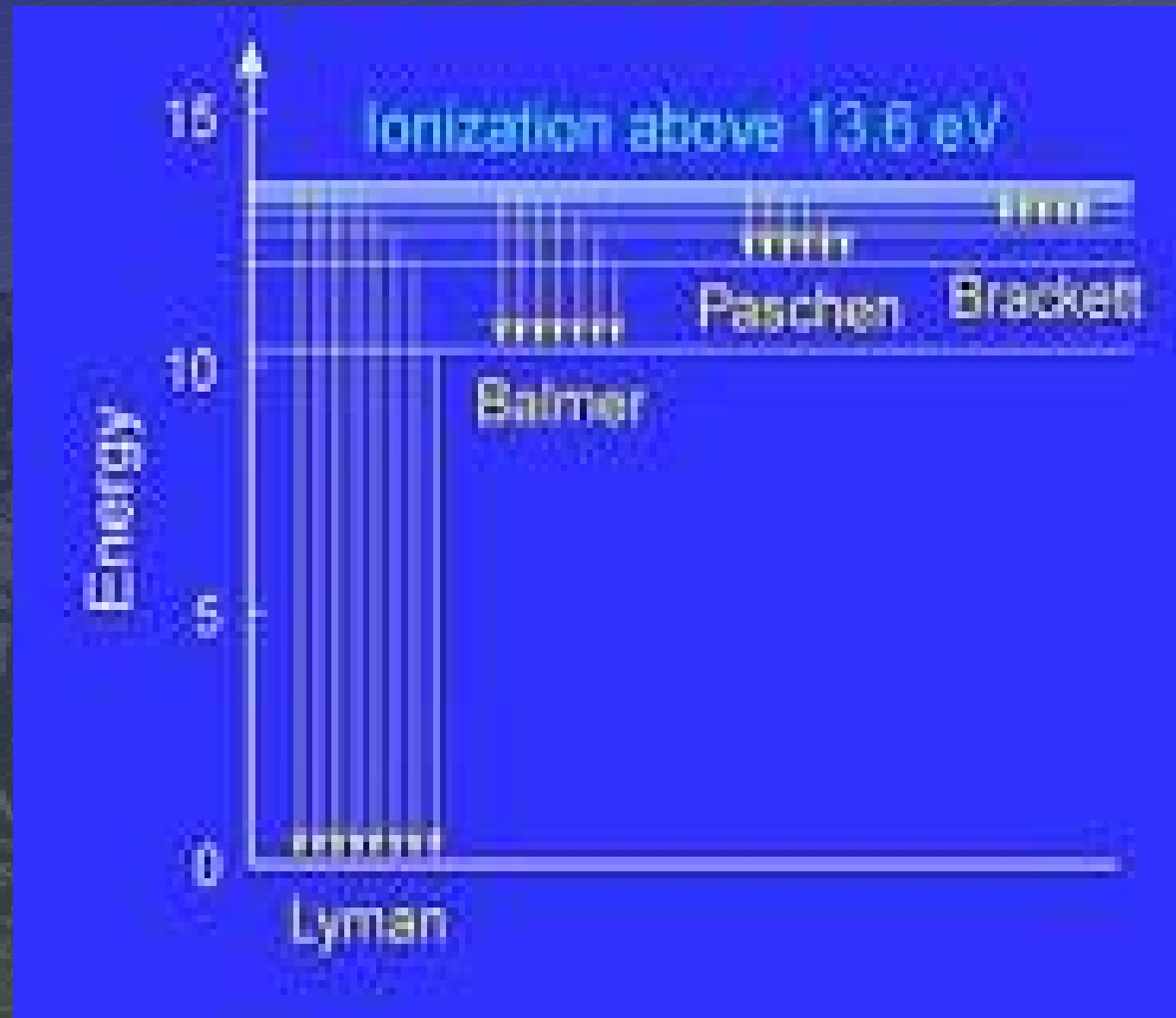
Fundamentos de Energía Nuclear

Estados de excitación y Radiación

Energía de ionización es la energía necesaria para remover un electrón. Para un átomo de plomo ($Z = 82$) se requieren 7.38 eV para remover un electrón de la capa externa y 88 KeV si la remoción es de una capa interna.

El estado de más baja energía en el cual se encuentra un átomo es denominado como estado estable. Cuando un átomo posee más energía que el estado estable se dice que está excitado. El más alto estado de energía se encuentra cuando se remueve un electrón del átomo, es decir, se encuentra ionizado.

Fundamentos de Energía Nuclear



Fundamentos de Energía Nuclear

Cuando un átomo excitado decae a su estado estable se emite un fotón con una energía igual a la diferencia de ambos estados. Ejemplo, cuando un átomo de hidrógeno en el primer estado de excitación de 10.19 eV decae al estado estable, se emite un fotón de 10.19 eV , este fotón posee una longitud de onda de

$$\lambda = 1.240 \times 10^{-6} / 10.19 = 1.217 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

La radiación con esta longitud de onda se encuentra en la región ultravioleta del espectro electromagnético.

Fundamentos de Energía Nuclear

Ejemplo: Un electrón de alta energía golpea un átomo de plomo y expulsa un electrón de sus capas internas. ¿Cuál es la longitud de onda de la radiación que se emite?

Fundamentos de Energía Nuclear

Ejemplo: Un electrón de alta energía golpea un átomo de plomo y expulsa un electrón de sus capas internas. ¿Cuál es la longitud de onda de la radiación que se emite?

El fotón que se emite tiene una energía ligeramente menor a 88 KeV.

Por lo tanto: $\lambda = 1.240 \times 10^{-6} / 8.8 \times 10^4 = 1.409 \times 10^{-11} \text{ m}$

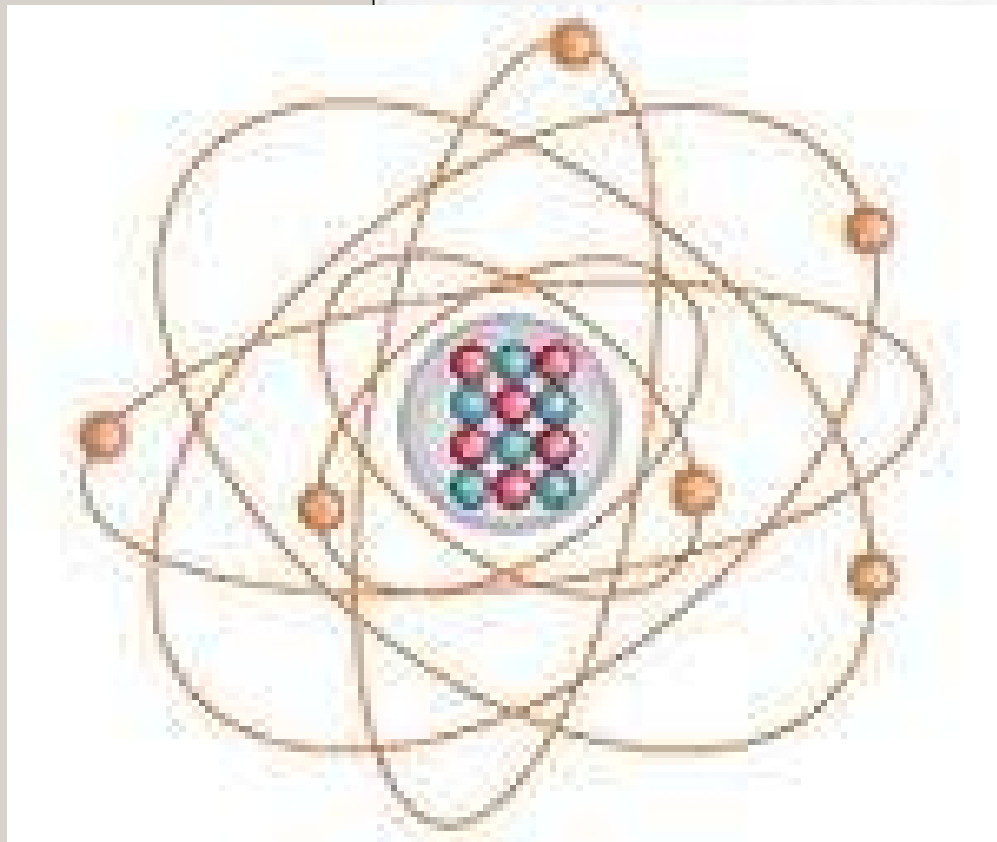
Esta longitud de onda se encuentra en la región del espectro electromagnético comprendida en los Rayos-X.

Fundamentos de Energía Nuclear

Existen estados de excitación causado por el movimiento de nucleones a diferentes órbitas (excepto para los átomos con núcleos muy ligeros).

Estas energías son mayores que las que se requieren para los estados de excitación causados por la transición de electrones, dado que las fuerzas nucleares que actúan entre los nucleones son mucho mayores que las fuerzas electrostáticas que se generan entre el núcleo y los electrones.

Los fotones originados por la excitación del núcleo son



Carbono 12
estable

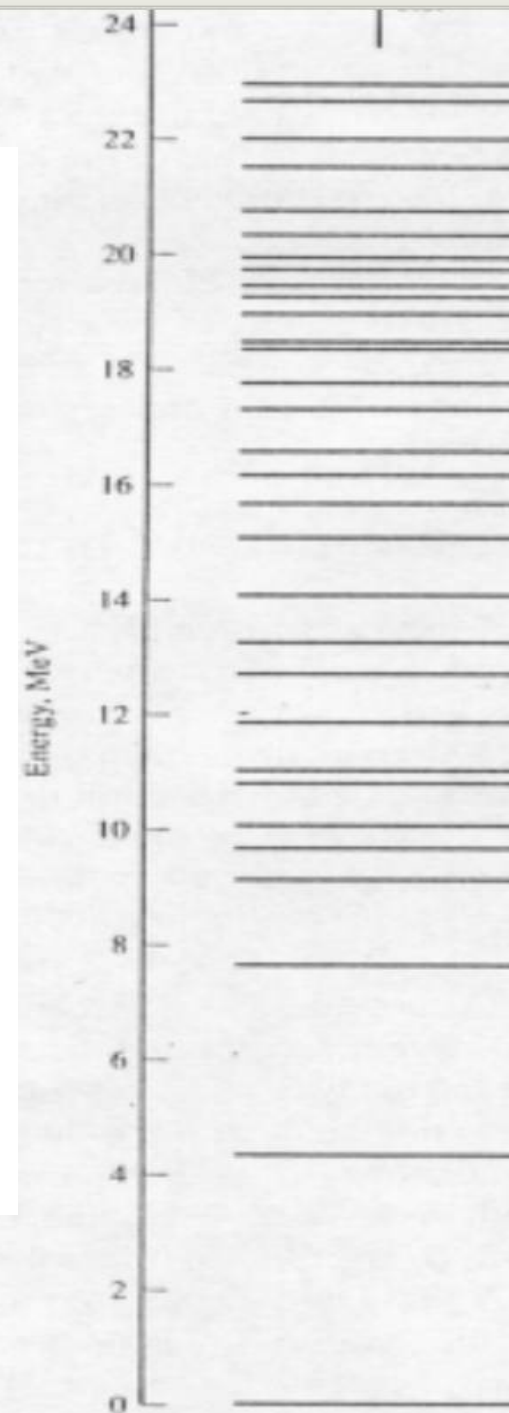


Figure 2.3 The energy levels of carbon 12.

Fundamentos de Energía Nuclear

Un núcleo excitado puede perder su estado de excitación por conversión interna para expulsar un electrón con una energía igual a la transición nuclear menos la energía de ionización.

Fundamentos de Energía Nuclear

El “agujero” que deja el electrón expulsado en la conversión interna es sustituido por un electrón de la capa externa. Esta transición es acompañada por la emisión de rayos X o la expulsión de otro electrón (proceso similar al de la conversión interna). Los electrones así originados son llamados Electrones de Auger.

Fundamentos de Energía Nuclear

Los primeros tres estados de excitación del núcleo de ^{199}Hg son de 0.158 MeV, 0.208 MeV, 0.403 MeV arriba del estado estable.

Si todas las transiciones ocurren entre estos estados y el estado estable:

a.- De qué energía podríamos observar los rayos gamma?

Fundamentos de Energía Nuclear

Estabilidad Nuclear y Decaimiento radiactivo

La figura siguiente muestra los núclidos en función de su número atómico y su numero de neutrones.

- a.- A partir de 20, $n > Z$**
- b.- Los neutrones extra dan estabilidad a los nucleos pesados.**
- c.- El exceso de neutrones actúan como un pegamento nuclear.**
- e.- Solamente cierta combinación de neutrones y protones permiten una estabilidad nuclear.**

Fundamentos de Energía Nuclear

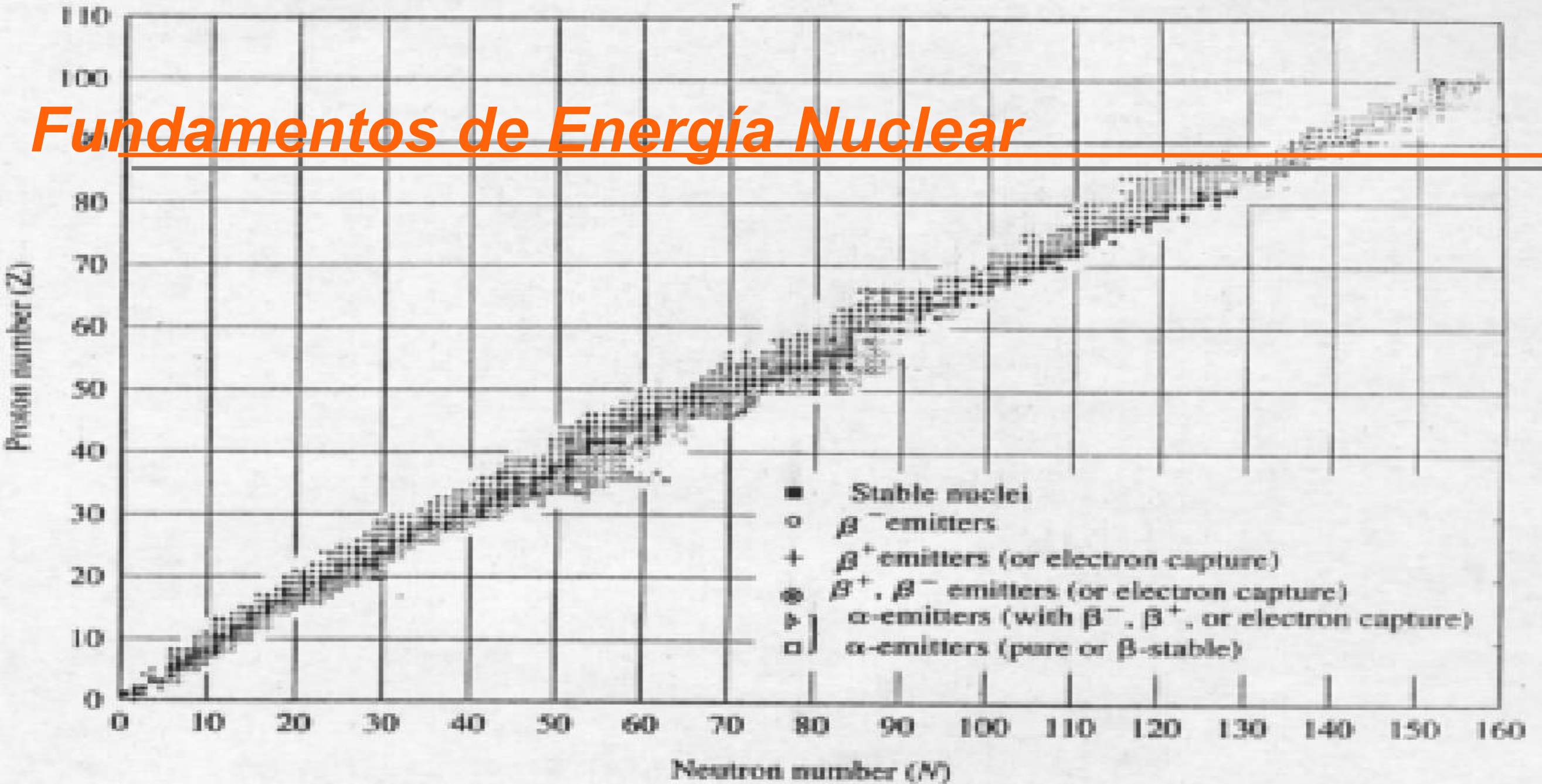
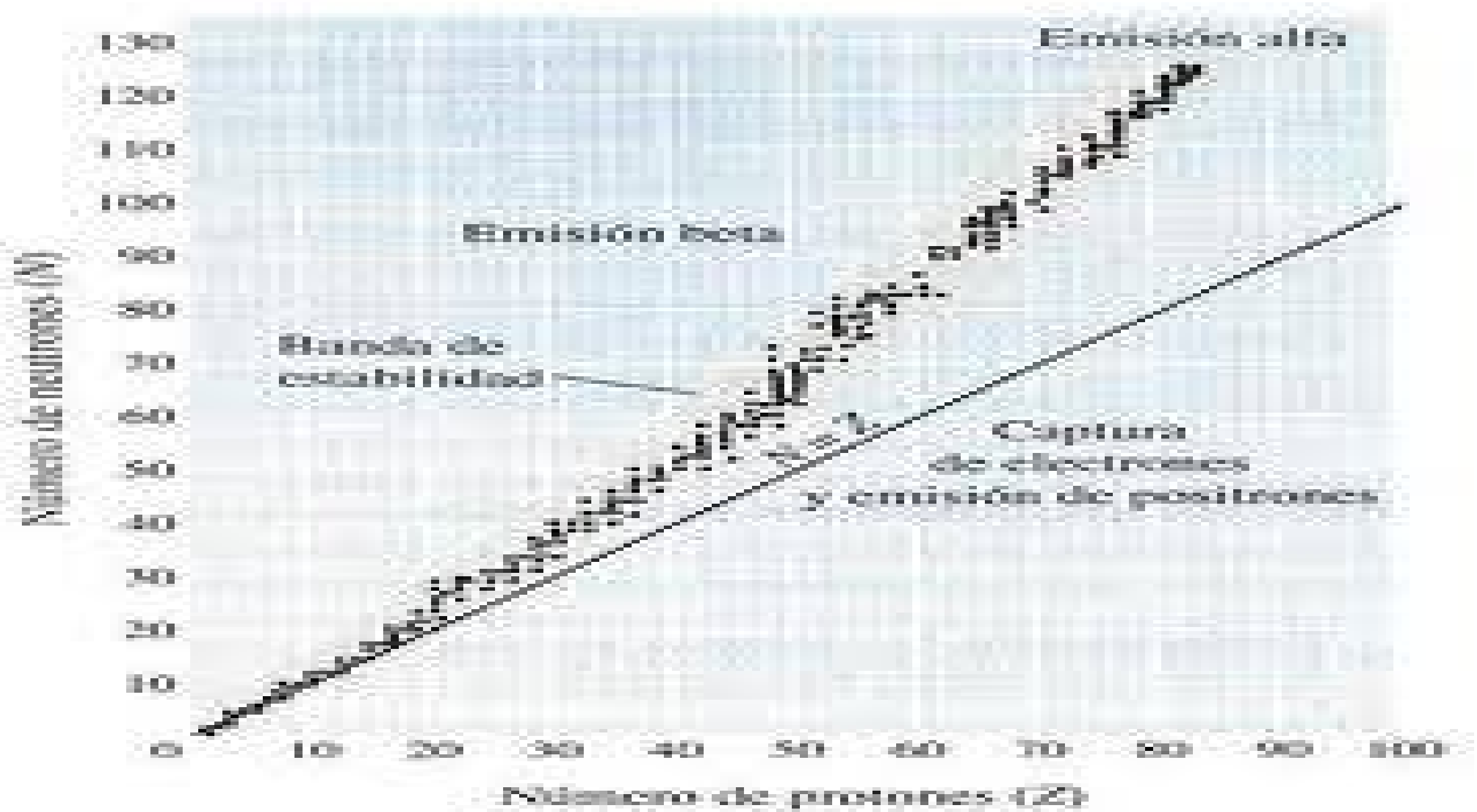


Figure 2.4 The chart of nuclides showing stable and unstable nuclei. (Based on S. E. Liverhant, *Elementary Introduction to Nuclear Reactor Physics*. New York: Wiley, 1960.)



Fundamentos de Energía Nuclear

Estabilidad Nuclear y Decaimiento radiactivo

La cantidad de neutrones en el átomo afecta la estabilidad del núcleo y el decaimiento radiactivo. Por ejemplo, los isótopos de Oxígeno ($A = 8$) de $N = 8, 9$ y 10 son estables, pero los isótopos de $N = 5, 6, 7, 11$ y 12 son radiactivos.

Fundamentos de Energía Nuclear

Estabilidad Nuclear y Decaimiento radiactivo

Para el ^{15}O , al cual le faltan neutrones, sufre un decaimiento β^+ . En este proceso uno de los protones del núcleo se transforma en un neutrón y se emiten un positrón y un neutrino. El número de protones se reduce de 8 a 7, resultando el núcleo de un isótopo de ^{15}N , el cual es estable.

Fundamentos de Energía Nuclear



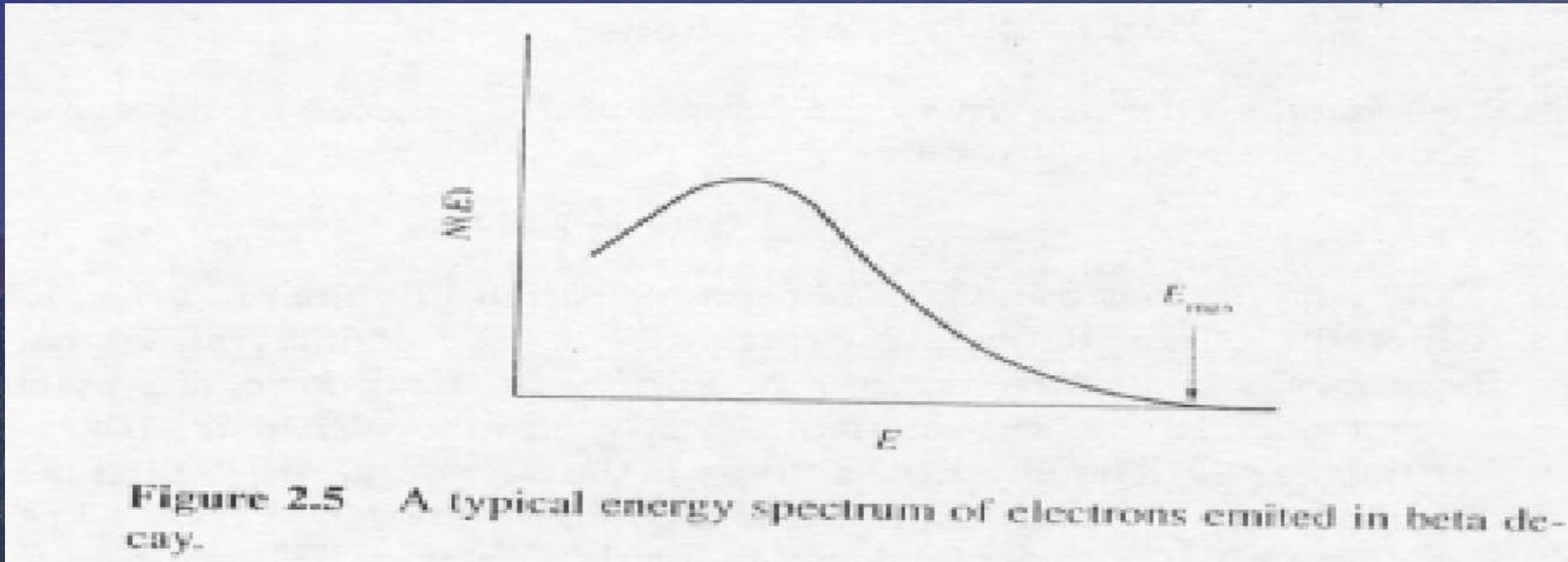
Donde β^+ representa la emisión del positrón (rayos β) y ν denota al neutrino.

Para el ^{19}O se tiene:



En esta transformación se tiene un decaimiento β^- . el representa la emisión del electrón negativo. $\bar{\nu}$ denota al antineutrino. En este caso un neutrón se transforma en un protón. Para ambos casos la masa atómica se conserva.

Fundamentos de Energía Nuclear



Donde $N(E)$ representa el número de electrones emitidos por unidad de energía, la cual tiene una energía cinética E .

E_{max} representa al máximo de energía.

Para un decaimiento β^- el promedio de la energía de los electrones E es aprox. $0.3 E_{max}$. En el decaimiento β^+ , E es aprox. $0.4 E_{max}$.

El núcleo resultante formado por un decaimiento β^- , puede ser inestable y sufrir otro decaimiento β^- .



Un núcleo al cual le faltan neutrones puede incrementar su número por la captura de electrones. En este proceso un electrón de las capas internas (*K-electrón*) se une con un protón del núcleo formándose un neutrón. Este modo de decaimiento es llamado *K-captura*.

El “agujero” que deja el electrón es llenado por otro electrón emitiéndose rayos X.

Fundamentos de Energía Nuclear

Otra forma de decaimiento radiactivo es la emisión de una partícula α . Esta partícula es un núcleo altamente estable de un isótopo de ${}^4\text{He}$, consistente de 2 neutrones y 2 protones. La emisión de una partícula reduce en 2 unidades el número atómico y la masa en 4 unidades. Por ejemplo:



La emisión de partículas α es comparativamente raro en núcleos ligeros como el del plomo, pero es más común en núcleos pesados.

Fundamentos de Energía Nuclear

Las partículas α emiten un espectro de energía muy discreto (línea) similar a la línea del espectro de un fotón de un átomo excitado.

El núcleo que se forma por decaimiento β (+ o -), captura de electrón o decaimiento α frecuentemente da como resultado un estado de excitación que prosigue la transformación.

En la mayoría de los núcleos el decaimiento de los estados de excitación por emisión de rayos γ ocurre en muy corto tiempo. Sin embargo, por ciertas particularidades de su estructura interna,

Fundamentos de Energía Nuclear

el decaimiento de ciertos estados de excitación puede retardarse a un punto en que este estado parezca semiestable (estado isomérico). El decaimiento por emisión de rayos γ de esos estados es llamado transición isomérica (IT). En algunos casos los estados isoméricos también pueden presentar decaimiento β .

En resumen, un núcleo sin el número de protones o neutrones necesarios para la estabilidad podrían decaer por:

emisión de rayos α o β o sufrir captura del electrón o todos ellos, lo cual estará acompañado de la subsecuente emisión de rayos γ .

Fundamentos de Energía Nuclear

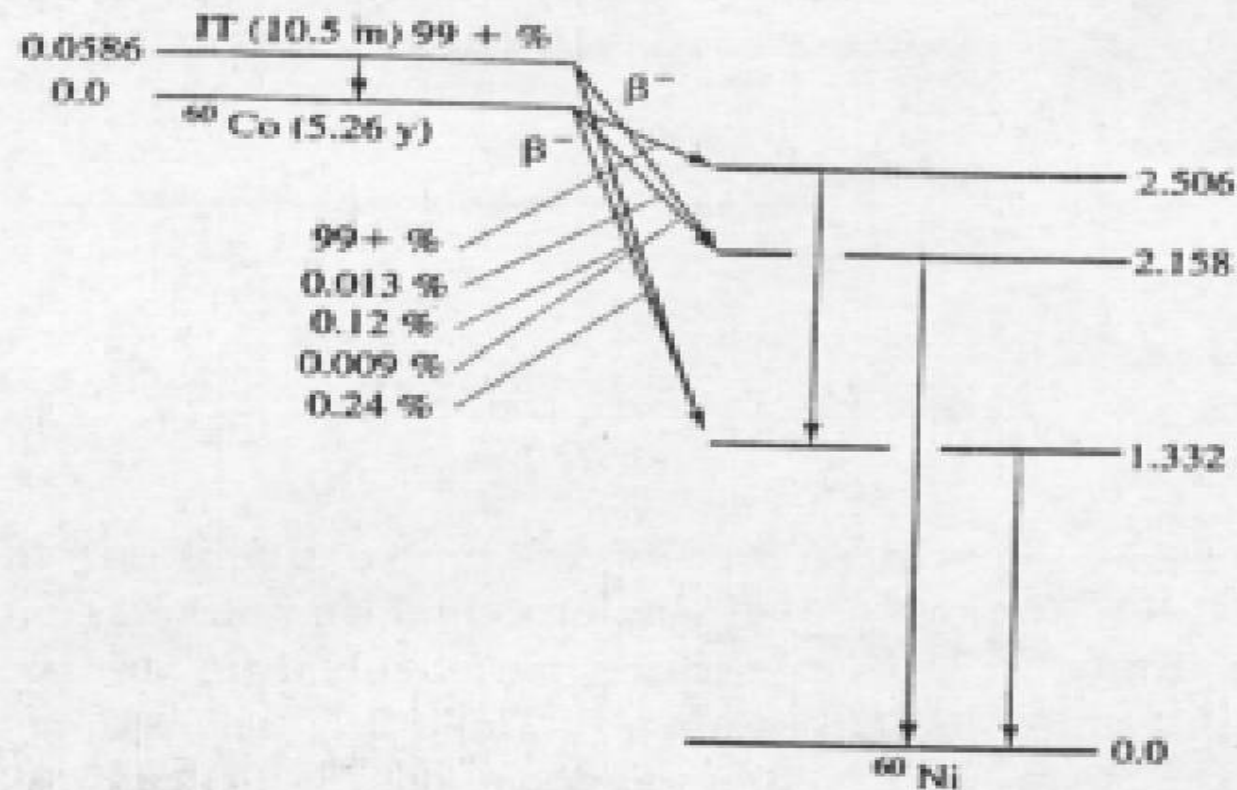


Figure 2.6 Decay scheme of cobalt 60, showing the known radiation emitted. The numbers on the side of the excited states are the energies of these states in MeV above the ground state. The relative occurrence of competing decays is indicated by the various percentages.

Fundamentos de Energía Nuclear

Radiactividad

La actividad (velocidad de decaimiento) en un tiempo t está dada por:

$$\alpha(t) = \lambda n(t)$$

La actividad se mide en *curie* (Ci, 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo).
Para el SI la unidad usada es el *Bequerel* (Bq, una desintegración por segundo).
 $1 \text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}.$

Fundamentos de Energía Nuclear

La actividad de una muestra normalmente está dada por:

$$\alpha(t) = \alpha_0 e^{-\lambda t}$$

Involucrando el concepto de vida media ($T_{1/2}$). La actividad de una muestra normalmente está dada por:

$$\alpha(t) = \alpha_0 e^{-6.31 t / T_{1/2}}$$

La relación de la vida media y la constante de decaimiento está dada por:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Fundamentos de Energía Nuclear

Para un reactor nuclear el número de átomos radiactivos está dado por:

$$n = n_0 e^{-\lambda t} + \frac{R}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

La actividad de un núclido está dado:

$$\alpha(t) = \alpha_0 e^{-\lambda t} + R (1 - e^{-\lambda t})$$

Fundamentos de Energía Nuclear

Reacciones Nucleares

Una reacción nuclear se da cuando dos partículas nucleares (2 nucleos o un núcleo y un nucleón) interactúan para producir 2 o mas partículas nucleares o rayos gamma.

$$a + b = c + d$$

$$a(b, d)c$$

Fundamentos de Energía Nuclear

Reacciones Nucleares

Leyes fundamentales:

Conservación de nucleones: El número total de nucleones antes y después de la reacción siempre es el mismo.

Conservación de cargas: La suma de las cargas de todas las partículas antes y después de la reacción siempre son las mismas.

Conservación de momentum: El total del momentum de partículas interactuantes antes y después de la reacción siempre es el mismo.

Conservación de energía: La energía, incluyendo la energía potencial es conservada en una reacción nuclear.

Fundamentos de Energía Nuclear

Reacciones Nucleares

Por la conservación de la energía, la energía antes de la reacción es la suma de las energías cinéticas de a y b y las de reposo para cada partícula, similarmente, para la energía después de la reacción.

$$E_a + E_b + M_a c^2 + M_b c^2 = E_c + E_d + M_c c^2 + M_d c^2$$

Fundamentos de Energía Nuclear

$$E_c + E_d - E_a - E_b = M_a c^2 + M_b c^2 - M_c c^2 - M_d c^2$$

$$E_c + E_d - (E_a + E_b) = [(M_a + M_b) - (M_c + M_d)] c^2$$

Fundamentos de Energía Nuclear

$$Q = [(M_a + M_b) - (M_c + M_d)]c^2$$

$$Q = [(M_a + M_b) - (M_c + M_d)]931 \text{ Mev}$$

Fundamentos de Energía Nuclear

Ejemplo: Complete la siguiente reacción:



Ejemplo: Una de las reacciones que ocurre cuando ^3H (Tritio) es bombardeado con Deuterios (núcleos ^2H)



Donde d se refiere al bombardeo de Deuterios. Calcule el valor de Q en esta reacción