

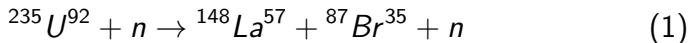
Aplicaciones

Física Nuclear y subnuclear

28 de noviembre de 2023

Fisión Nuclear

- Neutrones para generar isótopos
- A impar basta con neutrones térmicos $T \approx 300K$,
 $kT \approx 1/40 \text{ eV}$
- A par neutrones con energía por encima de los 2 MeV



- Número de nucleones
- Diferencia de las energías de enlace $\approx 200 \text{ MeV}$

Modelo de la gota

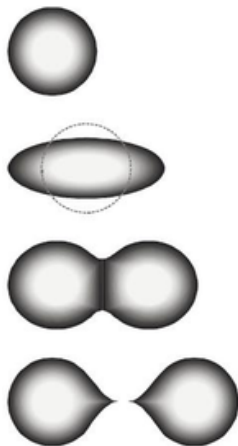


Figura: Oscilaciones del núcleo tras ser colisionado por un neutrón de acuerdo al modelo de la gota. Imagen de Hullernuc con licencia CC-BY-SA 3.0

Modelo de la gota

Parametrización del elipsoide

$$a = R(1 + \epsilon)$$

$$b = \frac{R}{(1 + \epsilon)^{\frac{1}{2}}}$$

El volumen

$$V = \frac{4}{3}\pi R^2 = \frac{4}{3}\pi ab^2$$

Términos dependientes de la forma

Tensión superficial

$$a_2 A^{\frac{2}{3}} \rightarrow a_2 A^{\frac{2}{3}} \left(1 + \frac{2}{3} \epsilon^2 \right)$$

Término coulombiano

$$a_3 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \rightarrow a_3 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \left(1 - \frac{1}{5} \epsilon^2 \right)$$

Diferencias de energía

$$\Delta = B.E.(\text{elipsoide}) - B.E.(\text{esfera})$$

$$= \frac{2}{5}\epsilon^2 a_2 A^{\frac{2}{3}} - \frac{1}{5}\epsilon^2 a_3 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$$

$$= \frac{1}{5}\epsilon^2 A^{\frac{2}{3}} \left(2a_2 - a_3 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$\left(2a_2 - a_3 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \right) > 0$$

$$\text{es decir, } \frac{Z^2}{A} < 47$$

Diferencias de energía núcleos hijos

$$\begin{aligned}\Delta &= B.E.(A, Z) - 2B.E.\left(\frac{A}{2}, \frac{Z}{2}\right) \\ &= a_2 A^{\frac{2}{3}} \left(1 - 2 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \right) + a_3 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \left(1 - 2 \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^2}{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{3}}} \right) \\ &\approx 0,27 A^{\frac{2}{3}} \left(-16,5 + \frac{Z^2}{A} \right) \text{ MeV}\end{aligned}$$

Estabilidad

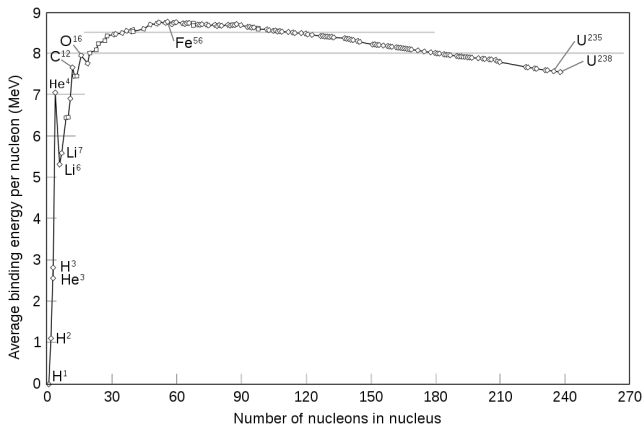
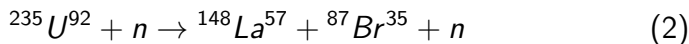


Figura: Gráfica de energía de enlace por nucleón contra número de nucleones A en el núcleo. Imagen de dominio público

Reacción en cadena

$^{235}\text{U}^{92}$ libera $\sim 200 \text{ MeV}$



$$k = \frac{\text{Número de neutrones producido en la etapa } n + 1}{\text{Número de neutrones producidos en la etapa } n}$$

Posibilidades de k

- 1 $k < 1$ es un proceso *subcrítico*, la reacción no se mantiene y no es útil para producir energía
- 2 $k = 1$ es un proceso *crítico*, se puede tener una reacción sostenida y constante, es lo mejor para tener energía
- 3 $k > 1$ es un proceso *supercrítico*, la reacción en cadena es incontrolable y cada vez se produce más y más energía, una explosión.

Reactores

- $^{235}\text{U}^{92} \Rightarrow t_{\frac{1}{2}} \sim 7 \times 10^8$ años
- $^{238}\text{U}^{92} \Rightarrow t_{\frac{1}{2}} \sim 5 \times 10^9$ años
- $^{235}\text{U}^{92} : ^{238}\text{U}^{92} \Rightarrow \sim 1 : 138$

Reactor nuclear

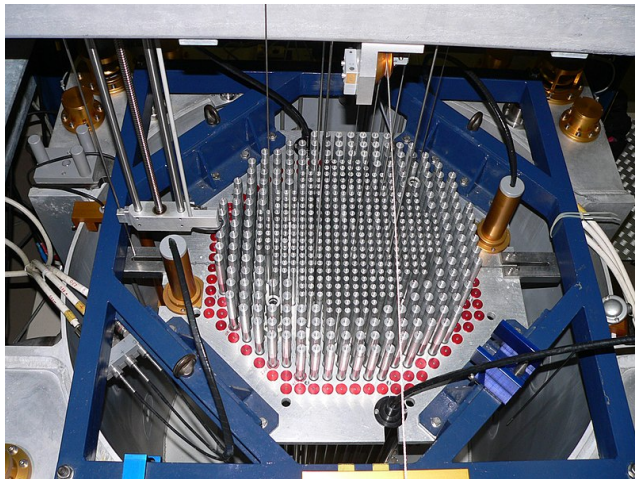


Figura: Reactor CROCUS, instalaciones nucleares del EPFL. Imagen de Rama, con licencia CC-BY-SA 2.0 Francia

Energía liberada

¿Cuánta energía libera 1gr de $^{235}\text{U}^{92}$? Sabemos que
 $200 \text{ MeV} = 2 \times 10^8 \text{ eV} = 3,2 \times 10^{-11} \text{ J}$

$$\begin{aligned} E &\approx (3,2 \times 10^{-11} \text{ J})(2,56 \times 10^{21}) \\ &\approx 8,19 \times 10^{10} \text{ J} \\ &\approx 1 \times 10^{11} \text{ J} = 1 \text{ MWD} \end{aligned}$$

En comparación 1 tonelada de carbón produce 0,36 MWD.

Fusión Nuclear

- Partimos de núcleos ligeros a más pesados
- Al fusionar también se libera energía
- Los núcleos ligeros son más abundantes

Fusión Nuclear

$$\begin{aligned}V_{Coulomb} &= \frac{ZZ'e^2}{R + R'} \\&= \frac{e^2}{\hbar c} \frac{\hbar c ZZ'}{1,2[A^{\frac{1}{3}} + A'^{\frac{1}{3}}] fm} \\&= \frac{1}{137} \left(\frac{197 MeV - fm}{1,2 fm} \right) \frac{ZZ'}{A^{\frac{1}{3}} + A'^{\frac{1}{3}}} \\&\approx \frac{ZZ'}{A^{\frac{1}{3}} + A'^{\frac{1}{3}}} MeV \approx \frac{1}{8} A^{\frac{5}{3}} MeV\end{aligned}$$

Temperatura

Colisionar no es práctico, mejor elevar la temperatura
($300K \approx 1/40 \text{ eV}$, 2 MeV)

$$\frac{2 \times 10^6 \text{ eV}}{\frac{1}{40} \text{ eV}} \times 300K \approx 10^{10}K$$

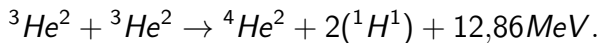
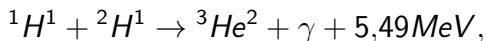
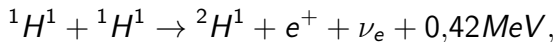
Temperatura promedio del Sol $\approx 10^7 K$

El Sol

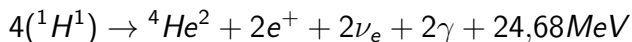
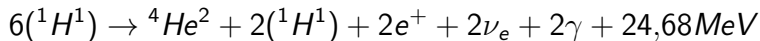
- Masa del Sol: 10^{30} kg
- Principal,mente hidrogeno es el combustible
- Tiene $\sim 10^{56}$ átomos de ${}^1\text{H}^1$

Ciclo $p - p$

Sugerido por Bethe:



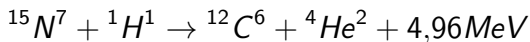
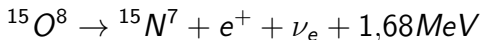
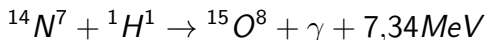
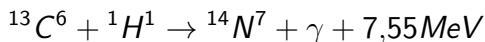
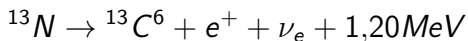
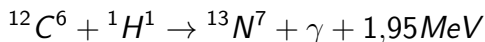
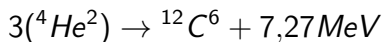
Global



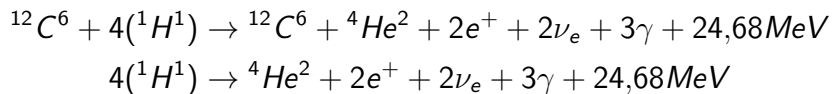
Cantidad de combustible restante

- Edad del universo: $\sim 10^{10}$ años
- Tiempo restante de combustible: 10^9 años

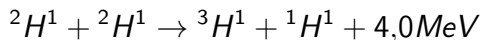
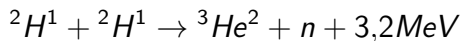
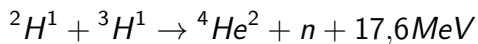
Ciclo del carbono o CNO



Ciclo del carbono



Fusión controlada



Sobre la investigación

- OIEA creada en 1957, derivado del discurso “Átomos para la paz” de Eisenhower en la ONU en 1953.
- Centro internacional de Viena, en 1979.
- Oficinas regionales en Toronto y Tokio, oficinas de enlace en Nueva York y Ginebra.
- Laboratorios especializados en Viena y Seibersdorf, y Mónaco.
- 2007 ITER en Francia

Radiactividad natural

- ~ 1000 núcleos radiactivos artificiales
- 60 núcleos radiactivos encontrados en la naturaleza
- Por lo regular $81 \leq Z \leq 92$

Islas de estabilidad otra vez

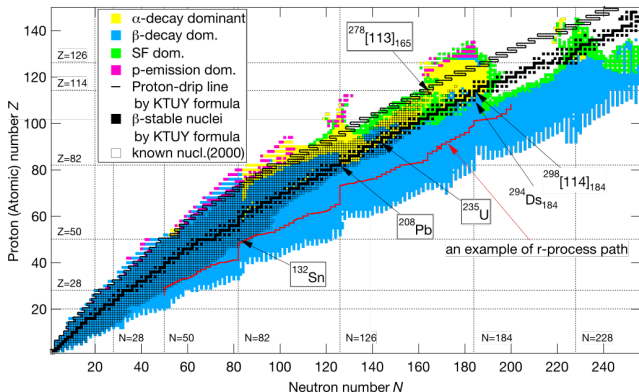


Figura: Tabla de nucleones. Imagen de Hiroyuki Koura en el dominio público

Series de núcleos

- $A = 4n$ serie del Torio,
- $A = 4n + 1$ serie del Neptunio,
- $A = 4n + 2$ serie del Uranio-Radio,
- $A = 4n + 3$ serie del Uranio-Actinio,

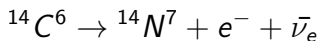
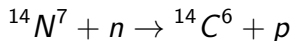
Vidas medias

- $t_{\frac{1}{2}}(^{232}\text{Th}^{90}) = 9,63 \times 10^9$ años
- $t_{\frac{1}{2}}(^{237}\text{Np}^{93}) = 1,5 \times 10^6$ años
- $t_{\frac{1}{2}}(^{238}\text{U}^{92}) = 3,12 \times 10^9$ años
- $t_{\frac{1}{2}}(^{235}\text{U}^{92}) = 4,96 \times 10^8$ años

Estabilidad: $^{208}\text{Pb}^{82}$ para el Th, $^{206}\text{Pb}^{82}$ para el $^{238}\text{U}^{92}$ y $^{207}\text{Pb}^{82}$ para el $^{235}\text{U}^{92}$

Datación de carbono

- $^{12}\text{C}^6$ y el $^{14}\text{N}^7$ abundantes en la atmósfera
- En particular el $^{12}\text{C}^6$ forma la molécula de CO_2
- Rayos cósmicos atmosféricos generando interacciones
- Neutrones lentos



$t_{\frac{1}{2}}(^{14}\text{C}^6) = 5730$ años por decaimiento β^-

Seres vivos

- Ambos isótopos forman CO_2
- Los seres vivos absorben CO_2 constantemente
- Una razón de $^{14}C^6 / ^{12}C^6 \approx 1,3 \times 10^{-12}$ en materia orgánica viva
- Ya sea medir la razón o la actividad y comparar con la inicial

Un ejemplo

Un pedazo de madera de 50gr, con una actividad de 320 desintegraciones por minuto, sabemos que la actividad de una planta viva es de 12 dsintegraciones/minuto/gramo y $t_{\frac{1}{2}} = 5730$ años

Un ejemplo II

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{\frac{1}{2}}} = \frac{\ln(2)}{1,8 \times 10^{11} \text{seg}} = 3,83 \times 10^{-12} \frac{1}{\text{seg.}}$$

$$\mathcal{A}_0 = 0,2 \text{Bq/gr} \times 50 \text{gr.} = 10 \text{Bq}$$

$$\mathcal{A}(t = ?) = 5,34 \text{Bq/}$$

Un ejemplo III

$$\mathcal{A}(t) = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

reacomodando $\frac{\mathcal{A}(t)}{\mathcal{A}_0} = e^{-\lambda t}$

despejando $t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\mathcal{A}_0}{\mathcal{A}(t)} \right)$

Un ejemplo IV

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{\mathcal{A}_0}{\mathcal{A}(t)} \right) \approx \frac{1}{3,83 \times 10^{-12} \frac{1}{\text{seg.}}} \ln \left(\frac{10 \text{Bq}}{5,34 \text{Bq}} \right)$$
$$\approx 1,64 \times 10^{11} \text{seg} \approx 5194 \text{ años}$$

La pieza de madera tienen alrededor de 5194 años, debe ser un fósil.

Otro ejemplo

1gr del manto de Turín ¿cuál debería ser su actividad actual de ser auténtica?

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{\frac{1}{2}}} = \frac{\ln(2)}{1,8 \times 10^{11} \text{seg}} = 3,83 \times 10^{-12} \frac{1}{\text{seg.}}$$

$$\mathcal{A}(0) = \lambda N_0 = 3,83 \times 10^{-12} \frac{1}{\text{seg.}} \times \left(\frac{N_A}{A} \times M_M \times \frac{\#^{14}\text{C}}{\#^{12}\text{C}} \right)$$

Otro ejemplo II

$$\begin{aligned}\mathcal{A}(0) &= \lambda N_0 = 3,83 \times 10^{-12} \frac{1}{\text{seg.}} \times \left(\frac{6,023 \times 10^{23} \text{ nuc/mol}}{12 \text{ gr/mol}} \times (1 \text{ gr.}) \times 1, \right. \\ &= 0,2512 \text{ Bq}\end{aligned}$$

La actividad tras 1989 años

$$\begin{aligned}\mathcal{A}(t = 1989 \text{ años}) &= (0,2512 \text{ Bq}) e^{-\lambda t} \\ &= (0,2512 \text{ Bq}) e^{-(3,83 \times 10^{-12} \frac{1}{\text{seg.}})(6,27 \times 10^{10})} = 0,197 \text{ Bq}\end{aligned}$$

Dosimetría

- No tenemos detectores naturales de radiación ionizante
- El principal daño se debe a la ionización o la energía depositada
- Hay fuentes de manera natural y artificial

Roentgen

La unidad más antigua de exposición

1 Roentgen = la cantidad de rayos X que producen una ionización de
 1 esu/cm^3
 $= 2,58 \text{ coul./kg}$ para aire en STP

Solo rayos X y γ en el aire. Ionización por electrones (efecto Compton).

- Depende: coeficiente de absorción de γ 's y la ionización específica de e^- 's

Razón de exposición o ionización por unidad de tiempo

Radiación isotrópica de un punto y despreciando atenuación en el aire

$$\text{Razón de exposición} = \frac{\Gamma \mathcal{A}}{d^2},$$

A la actividad, d la distancia a la fuente y Γ una constante de razón de exposición que depende del esquema de decaimiento, energía de γ 's, coeficiente de absorción en el aire.

Fuente	$\Gamma [R \cdot \text{cm}^2 / (\text{hr} \cdot \text{mCi})]$
^{137}Ce	3.3
^{57}Co	13.2
^{22}Na	12.0
^{60}Co	13.2
^{222}Ra	8.25

Ejercicio de razón de exposición

Para $1R$ de radiación γ ¿cuál es la razón de exposición trabajando a $50cm$ de una fuente de ^{22}Na con una actividad de $100\mu Ci$?

$$\begin{aligned}\text{Razón de exposición} &= \frac{\Gamma \mathcal{A}}{d^2} = \frac{12,0 \frac{R-cm^2}{hr-mCi}}{5cm} \\ &= 4,8 \times 10^{-4} R/hr\end{aligned}$$

Dosis absorbida

$$1\text{rad} = 100\text{erg/gr}$$

$$1\text{Gray} = 1\text{Joule/kg} = 100\text{rad}$$

No diferencia entre fuentes ni la razón de la absorción.

Continuando el ejemplo anterior

¿Cuál sería ahora la razón de dosis absorbida trabajando a 50cm de una fuente de ^{22}Na con una actividad de $100\mu\text{Ci}$?

- Para eso debemos calcular la dosis absorbida para $1R$ de rayos γ en aire.
- Para la creación de pares ión-electrón $\approx 33,7\text{eV}$

$$1R = 2,58\text{coul./kg} \times \frac{1}{1,6 \times 10^{-19}\text{coul./elect}} = 1,61 \times 10^{-15}\text{pares/kg.}$$

Más aún del ejemplo anterior

Si ese γ produce ionizaciones en el tejido blando

$$\begin{aligned} 33,7\text{eV} \times 1,61 \times 10^{-15} \text{ pares/kg.} &= 5,43 \times 10^{16} \text{ eV/kg} \\ &= 8,7 \times 10^{-3} \text{ J/kg.} = 8,7 \times 10^{-3} \text{ Gy.} \end{aligned}$$

El fin del ejercicio

La razón de la dosis absorbida entonces sería

$$8,7 \times 10^{-3} \text{Gy} \times 4,8 \times 10^{-4} \text{R/hr} = 4,17 \times 10^{-6}$$

Efectividad biológica relativa y dosis equivalente

La ionización depende de la transferencia de energía lineal (dE/dx)

	γ	β	p	α	n rap.	n term.
RBE	1	1	10	20	10	3

$$\text{rem} = \text{RBE} \times \text{rad}$$

$$\text{Sievert}(Sv) = \text{RBE} \times \text{Gray} \quad (1Sv = 100rem)$$

Dosis típicas

Fuentes naturales	
Rayos cósmicos	28mrem/año
Fondo natural (U, Th, Ra)	26mrem/año
Fuentes radiactivas dentro del cuerpo (^{40}K , ^{14}C)	26mrem/año
Fuentes ambientales	
Debidas a la tecnología	4mrem/año
Contaminación radiactiva global	4mrem/año
Energía nuclear	0,3mrem/año

Dosis típicas II

Fuentes médicas	
Diagnostico	78mrem/año
Rayos X	100 – 200mrem/año
Fármacos	14mrem/año
Ocupacional	1mrem/año
Productos (TV)	5mrem/año

Efectos de dosis

De 4 – 6Sv en un tiempo corto

Tiempo	Efecto
0-48 hrs	Pérdida del apetito, náusea, vómito, fatiga y postración
2 días a 6-8 semanas	Los síntomas desaparecen y el paciente se siente bien
2-3 semanas o de 6-8 semanas	hematomas, hemorragias, diarrea, pérdida del cabello, fiebre, letargo, muerte
6-8 semanas	etapa de recuperación

Valores de umbral

Etapa de desarrollo	Efecto	Umbral (Sv)
Embrión	Microcefalia	0.04
Feto	Crecimiento lento/ de cuna	0.2
Niño	Hipotiroidismo	5
Adulto	Opacidad en los ojos	2.5
Adulto	Muerte	2-3
Adulto	Envejecimiento prematuro	3
Adulto	Opacidad en los ojos	2.5
Adulto	Eritema	3-10
Adulto masculino	Esterilidad temporal	0.5-1
	Esterilidad permanente	> 5
Adulta femenino	Esterilidad permanente	3-4

Dosis bajas

- Alrededor de 0,2Gy
- Cáncer y efectos genéticos
- Dependen de la dosis acumulada
- Efectos estocásticos

Hubble y el corrimiento al rojo

- 1929 en las líneas espectrales de gases
- Mientras más lejos mayor el corrimiento

$$v = H_0 r$$

$H_0 \sim 70 \text{ km/s/Mparsec}$ con $1 \text{ Mparsec} = 3,09 \times 10^{19} \text{ km}$

- Realmente no es una constante
- Gamow propone una bola de neutrones sumamente caliente, bañada en radiación y muy compacta.
- 14 billones de años la edad del universo

Inicios del universo

- Singularidad o fluctuación del vacío
- Difícil medir tiempos por debajo de $\hbar c^{-2} \sqrt{G/\hbar c} \approx 10^{-43} \text{seg.}$
- Al inicio todas las fuerzas unificadas, tras la primera transición de fase se desacopló la fuerza gravitacional.
- Era de la gran unificación (débil y fuerte unidas) hasta los 10^{-10}seg.
- Nuclear débil se separa y vuelve de corto alcance.
- Antes de eso las partículas no tenían masa
- Razón de bariones/fotones = 6×10^{-10} se vuelve constante.

Continuación del universo

- 10^{-6} segundos inicia la hadronización, transición de fase de QCD
- 3 minutos inicia nucleosíntesis
- Se pueden generar pares
- Partículas desacopladas o congeladas

Física nuclear y de partículas en la astrofísica

Edad	Temperatura (K)	Energía (eV)	Transición	Era
$1,4 \times 10^{10}$ años	2,7	$\sim 10^{-4}$		Epoca actual, estrellas
4×10^5 años	3×10^3	$\sim 10^{-1}$	Plasma a átomos	Fotón
3 minutos	10^9	$\sim 10^5$	Nucleosíntesis	Partículas

Física nuclear y de partículas en la astrofísica

Edad	Temperatura (K)	Energía (eV)	Transición	Era
10^{-6} seg.	10^{12}	$\sim 10^8$	Cuarks (hadronización)	Cuark
10^{-10} seg.	10^{15}	$\sim 10^{11}$	Unificación electrodébil	Electrodébil
10^{-33} seg.	$10^{28} i?$	$\sim 10^{24}$	Inflación	Inflación
10^{-43} seg.	10^{32}	$\sim 10^{28}$	Todas las fuerzas unificadas	SUSY, Planck
0			Vacío a materia	