

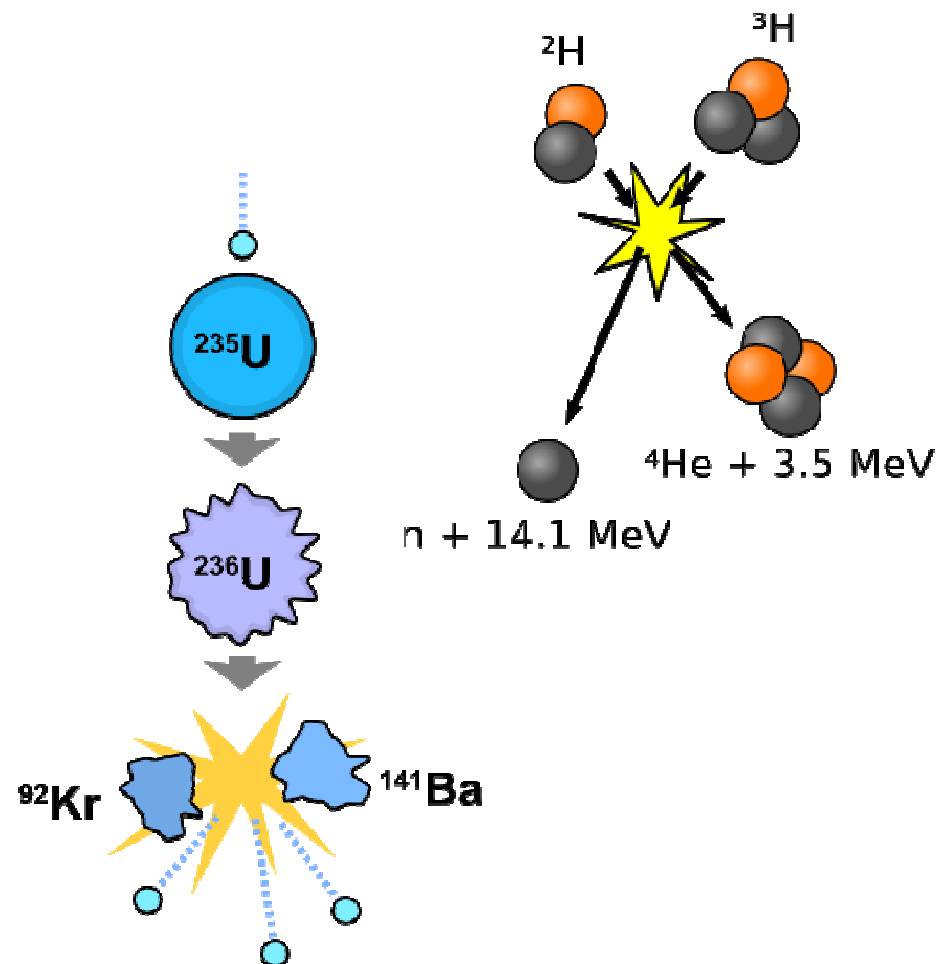
Fisión y fusión nuclear.

■ Fisión nuclear.

- ❑ Introducción fisión nuclear.
- ❑ Modelo de la gota líquida y fórmula semiempírica de masas.
- ❑ Características de la Fisión nuclear.
- ❑ Energía en la fisión inducida.
- ❑ Reacciones de fisión controlada.
- ❑ Reactores de Fisión.
- ❑ Tipos de reactores de Fisión.
- ❑ Explosivos de fisión.

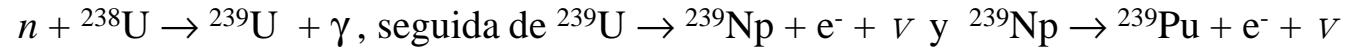
■ Fusión nuclear.

- ❑ Introducción Fusión nuclear.
- ❑ Procesos básicos de fusión.
- ❑ Características de las reacciones de fusión.
- ❑ Procesos de Fusión solar.
- ❑ Reacciones de fusión controlada.
- ❑ Explosivos termonucleares.

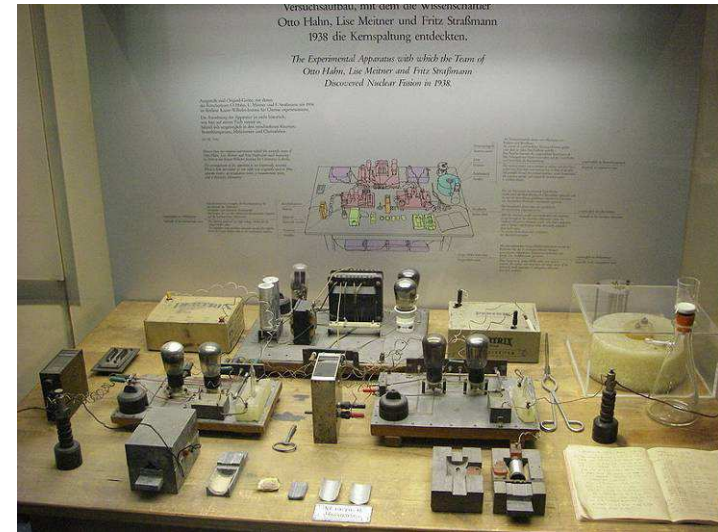


Introducción fisión nuclear.

- Poco después del descubrimiento del neutrón en 1932, Fermi y sus colaboradores expusieron elementos a flujos de neutrones. Descubrieron que muchos elementos decaían por emisión β para compensar el exceso de neutrones.



- El paso natural fue utilizar dicha técnica para generar elementos *transuránicos*. Hahn y Strassmann determinaron la presencia de Bario en una muestra de uranio que había sido bombardeado por neutrones. Medidas posteriores determinaron la existencia de un proceso por el cual se generaban núcleos de masa intermedia a partir de uranio bombardeado con neutrones liberando en el proceso energías de unos 100-200 MeV, mucho mayor que todos los decaimientos α conocidos.

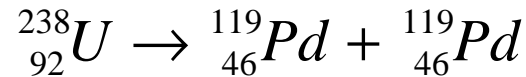


- Meitner y Frisch propusieron en 1939 que el núcleo de uranio tras una captura neutrónica era inestable y se dividía (fisionaba) en fragmentos de masas similares.

Aspectos generales de la fisión.

- La fisión es consecuencia de la competición entre las fuerzas nucleares (atractivas $\propto A \propto Z$) y la repulsión culombiana ($\propto Z^2$)

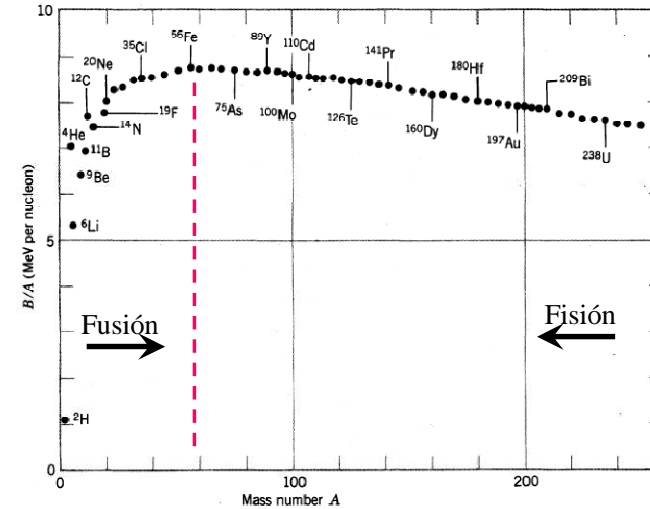
- Veamos un ejemplo de fisión espontánea del ^{238}U



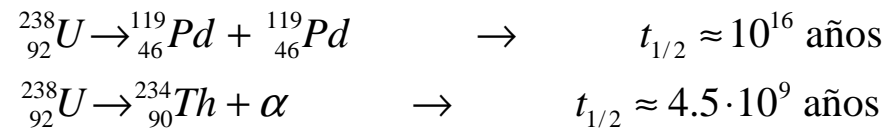
- Energías de ligadura y calor de reaccion:

$$\left. \begin{aligned} B_i({}^{238}\text{U}) &= 238 \cdot 7.6 = 1809 \text{ MeV} \\ 2 \cdot B_f({}^{119}\text{Pd}) &= 2 \cdot 119 \cdot 8.6 = 2033 \text{ MeV} \end{aligned} \right\}$$

$$\rightarrow Q = m_i - m_f = B_f - B_i = 214 \text{ MeV}$$



- En general , la fisión será exoenergética si $\left. \frac{B}{A} \right|_{\text{Padre}} < \left. \frac{B}{A} \right|_{\text{hijos}}$. Esto será cierto para $A > 56$
- El hecho de que sea posible no implica que sea competitiva, por ejemplo



- En general, la fisión es competitiva para $A > 250$

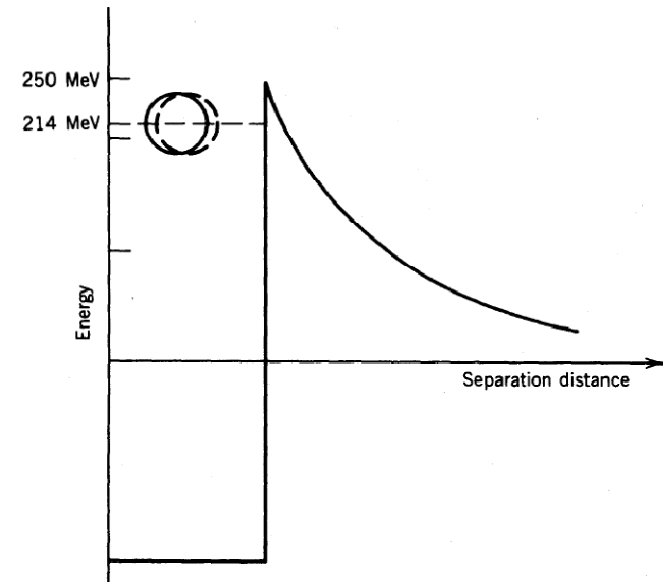
Aspectos generales de la fisión.

- El responsable de inhibir el proceso es la presencia de la barrera coulombiana (al igual que ocurría en el caso de la partícula α).
- Si consideramos la fisión como un proceso similar al decaimiento α tendríamos que el fragmento se encuentra cerca del límite del potencial, donde la barrera es más fácilmente penetrable.
- Ejemplo: ^{238}U

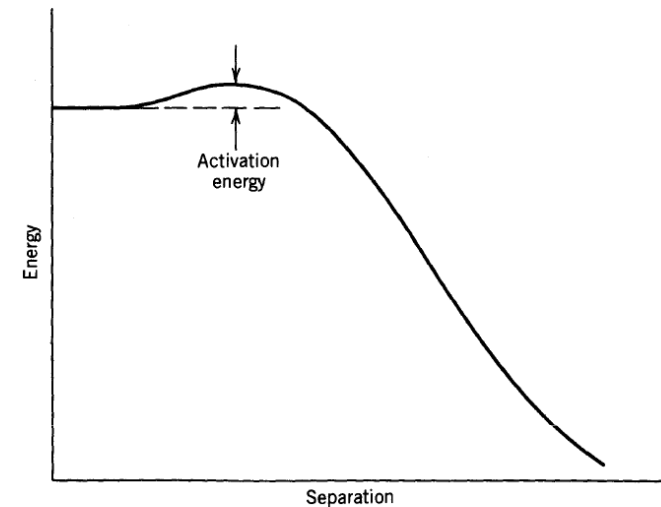
- Si dividimos el ^{238}U en dos fragmentos idénticos rozándose

$$V(R_1 + R_2) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2} \approx 250 \text{ MeV}$$

- La diferencia entre la altura de la barrera ($\sim 250 \text{ MeV}$) y la energía disponible ($\sim 214 \text{ MeV}$) inhibe la fisión espontánea. Sólo podría darse por penetración de la barrera y ese proceso es muy poco probable.
- Esta estimación es sólo aproximada, ya que:
 - Los fragmentos de fisión no son en general idénticos
 - Se liberan algunos neutrones y eso puede generar estados más estables.



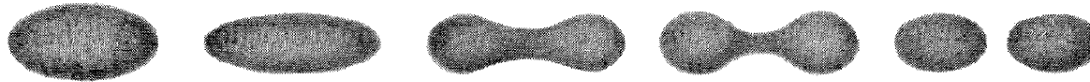
- Para núcleos pesados ($A > 250$), la altura de la barrera está muy poco por encima de la energía disponible, por lo que la penetración de la barrera es probable \Rightarrow **fisión espontánea**
 - Para $A > 300$, las estimaciones indican que la diferencia es nula y por lo tanto estos núcleos no podrán existir en la naturaleza.
- Para los núcleos en los que la altura de la barrera sea demasiado elevada, la absorción de una pequeña cantidad de energía, como un fotón o neutrón de baja energía, puede permitir formar un estado intermedio (núcleo compuesto) cuya energía es similar o superior a la barrera \Rightarrow **fisión inducida**
 - Si el estado intermedio está por debajo de la barrera \Rightarrow fisión inhibida \Rightarrow otros procesos dominan (por ejemplo, desintegración β o α , o la reemisión de la partícula)
 - **Energía de activación:** Diferencia de energía entre el estado fundamental y la máxima altura de la barrera coulombiana.
- Si $Q \approx E_{act}$ se puede producir la fisión espontánea (^{262}Ha)
- Si $Q > E_{act}$ se produce fisión instantánea
- Si $Q < E_{act}$ se puede producir la fisión inducida (^{235}U)



*Barrera de potencial realista en la fisión
(ejemplo de ^{238}U)*

Modelo de la gota líquida y fórmula semiempírica de masas


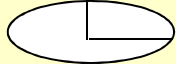
- El proceso de fisión de un núcleo puede entenderse en sus aspectos principales en base al modelo de la gota líquida y la fórmula semiempírica de la masa
- Si partimos de un núcleo esférico, el proceso de fisión requerirá un estiramiento del mismo



- Si este proceso tiene lugar a volumen constante, la desviación del elipsoide respecto de la esfera vendrá determinada por el parámetro de excentricidad:

$$a = R(1 + \varepsilon) \quad b = R(1 + \varepsilon)^{-1/2} \quad R^3 = ab^2$$

- Como la deformación es a volumen constante, solo los términos de superficie y de Culomb se verán afectados en la fórmula semiempírica de masas:

	$V = \frac{4}{3}\pi R^3$		$V = \frac{4}{3}\pi ab^2$
$S \propto R^2$		$S \propto R^2(1 + \frac{2}{3}\varepsilon^2 + \dots)$	
$E_c \propto R^{-1}$		$E_c \propto R^{-1}(1 - \frac{1}{3}\varepsilon^2 + \dots)$	

- Disminución en la energía de ligadura:

$$\Delta E = B(\varepsilon) - B(\varepsilon = 0) = -a_s A^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2 + \dots\right) - a_c Z^2 A^{-1/3} \left(1 - \frac{1}{5}\varepsilon^2 + \dots\right) + a_s A^{2/3} + a_c Z^2 A^{-1/3}$$

$$\Delta E \cong \varepsilon^2 \left\{ -\frac{2}{5}a_s A^{2/3} + \frac{1}{5}a_c Z^2 A^{-1/3} \right\}$$

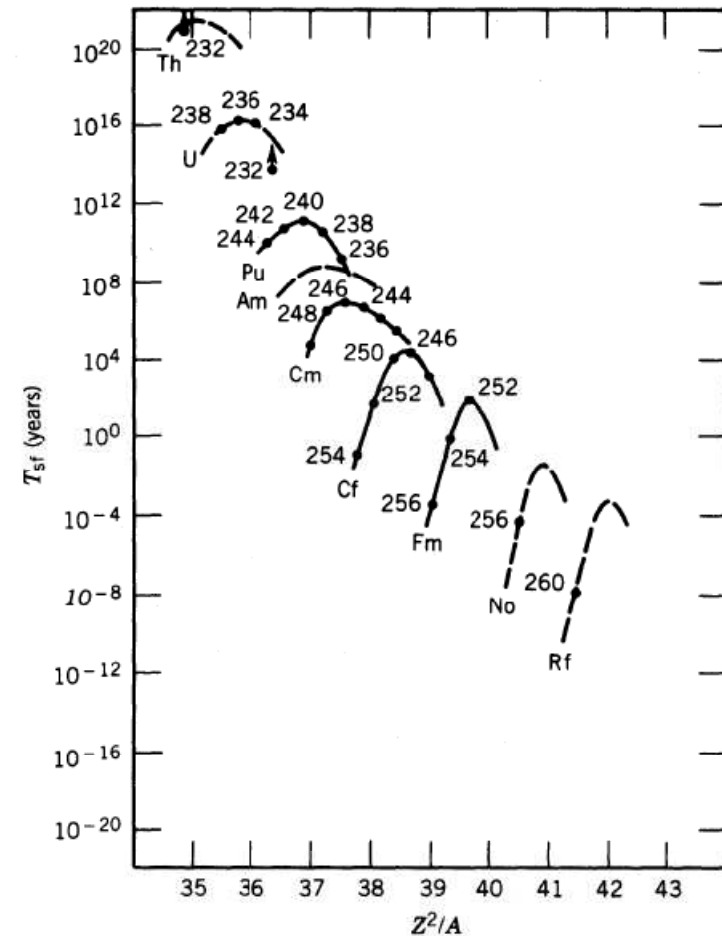
- Se producirá fisión espontánea si el estiramiento es energéticamente favorable, $\Delta E > 0$, lo que requiere

$$a_c Z^2 A^{-1/3} > 2a_s A^{2/3}$$

- Tomando $a_s = 16.8$ MeV y $a_c = 0.72$ MeV:

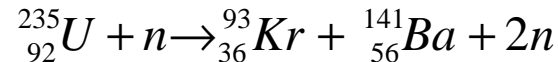
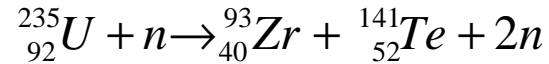
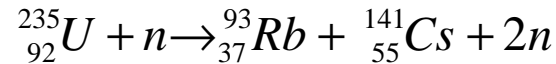
$$\frac{Z^2}{A} > 47$$

- Esta estimación no tiene en cuenta:
 - El factor de penetración de la barrera de potencial
 - La deformación permanente de los núcleos pesados
- No obstante, el factor Z^2/A es un buen indicador de la probabilidad de fisión espontánea
 - Cuanto mayor es Z^2/A mayor probabilidad de fisión
 - Si es mayor que 47 \Rightarrow fisión instantánea
 - Esta estimación es consistente con el hecho de que la energía de activación para núcleos con $A > 300$ sea nula



Características de la Fisión.

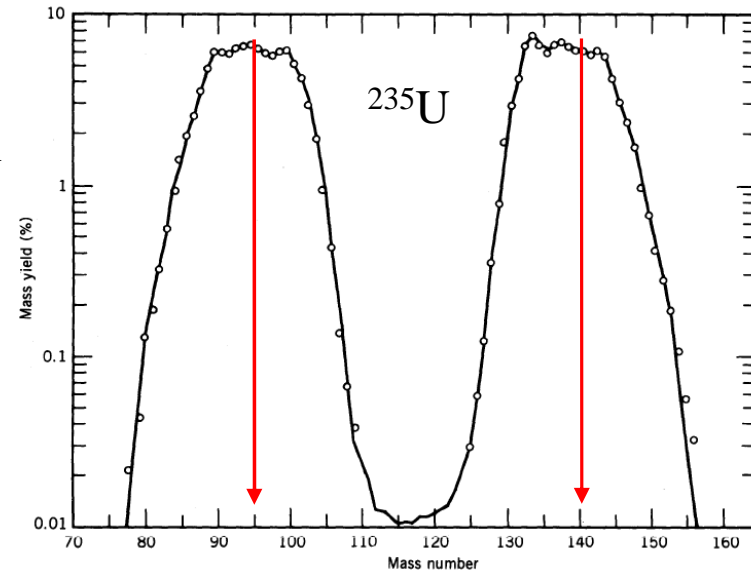
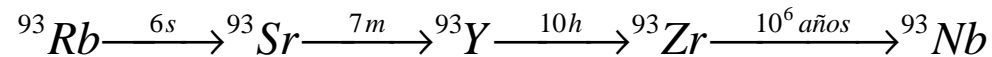
- Distribución en masa de los fragmentos.
 - Los productos de fisión no están definidos unívocamente, sino que existe una distribución de masas de los fragmentos



- La distribución de masas de los fragmentos es asimétrica: Pica en x y $A-x$, y tiene un mínimo en $x=A/2$, en torno a ese mínimo es simétrica.
- La fisión inducida con neutrones térmicos muestra un mínimo en $A/2=A_1 \approx A$
- Sin embargo, la fisión con partículas energéticas presenta el comportamiento contrario, mostrando un máximo en torno a $A_1 \approx A_2$.
 - Todavía no existe explicación clara de este comportamiento.

- Cadena de decaimientos.

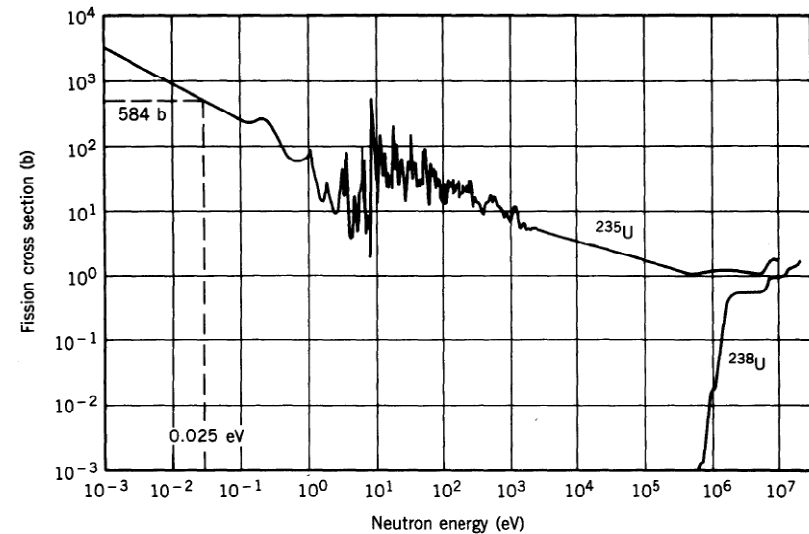
- Los productos de fisión obtenidos son altamente radioactivos, por lo que decaen inmediatamente hacia isóbaros estables. Estos productos forman los desechos de los reactores nucleares.



- Número de neutrones emitidos.
 - Los núcleos resultantes de la fisión son muy ricos en neutrones, por lo que emiten los sobrantes de forma instantánea (10^{-6} s).
 - Estos neutrones, con energías del orden del MeV, se denominan inmediatos o *prompt*.
 - El número medio de neutrones *prompt*, ν , es característico del proceso particular de fisión,

$$\bar{\nu}({}^{233}\text{U} + n_{\text{ter}}) = 2.48 \quad \bar{\nu}({}^{235}\text{U} + n_{\text{ter}}) = 2.42 \quad \bar{\nu}({}^{239}\text{Pu} + n_{\text{ter}}) = 2.86$$

- La desviación estándar sobre esta media, en cambio, es prácticamente universal, 1,08
 - Además de estos neutrones, hemos visto en el tema 10 como pueden emitirse neutrones de forma retardada tras una emisión β . El tiempo en que son emitidos son del orden de segundos.
- Sección eficaz de fisión.
 - Se observa como la sección eficaz de fisión inducida del ${}^{235}\text{U}$ es mucho mayor para neutrones térmicos ($E \approx 0.025$ eV) que para neutrones rápidos ($E \approx 0.1-10$ MeV).
 - Por lo tanto los neutrones rápidos deberán ser moderados (perder energía) si han de ser utilizados en procesos de fisión.
 - En el caso del ${}^{238}\text{U}$ sólo es posible la fisión utilizando neutrones rápidos.



Energía en la fisión inducida.

- ¿Qué es lo que hace que el ^{235}U y el ^{238}U sean tan distintos en el caso de neutrones térmicos?

$$\left. \begin{array}{l} n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{236}\text{U}^* \Rightarrow E_{exc} = m({}^{236}\text{U}^*) - m({}^{236}\text{U}) \\ n + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{U}^* \Rightarrow E_{exc} = m({}^{239}\text{U}^*) - m({}^{239}\text{U}) \end{array} \right\} \begin{array}{l} T_n \approx 0 \\ \text{Neutrones térmicos} \end{array} \quad \begin{cases} E_{exc} = [m({}^{235}\text{U}) + m_n] - m({}^{236}\text{U}) = 6.5 \text{ MeV} \\ E_{exc} = [m({}^{238}\text{U}) + m_n] - m({}^{239}\text{U}) = 4.8 \text{ MeV} \end{cases}$$

- Sus energías de activación pueden obtenerse a partir de un modelo de gota líquida (formula semiempírica de masas):

$$E_{act}({}^{235}\text{U}) = 6.2 \text{ MeV}$$

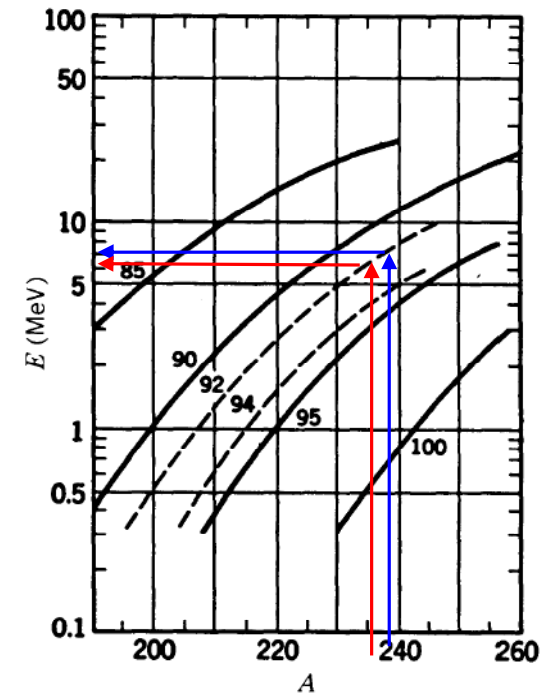
$$E_{act}({}^{238}\text{U}) = 6.6 \text{ MeV}$$

- Luego tenemos que para la fisión del uranio se verifica

$$E_{act}({}^{235}\text{U}) < E_{exc}({}^{235}\text{U}) \rightarrow \text{Fisión por neutrones térmicos}$$

$$E_{act}({}^{235}\text{U}) > E_{exc}({}^{235}\text{U}) \rightarrow \text{Fisión por neutrones rápidos}$$

- Por lo tanto la diferencia en la fisionabilidad se encuentra en sus energías de excitación. Por qué núcleos con A, Z muy similar (y por tanto similares energías de activación) se comportan muy distinto se puede entender a partir del término de apareamiento en la fórmula semiempírica de masas.



- El término de apareamiento.

$$\delta = \begin{cases} a_p A^{-3/4} & \text{A par, Z, N par} \\ -a_p A^{-3/4} & \text{A par, Z, N impar} \\ 0 & \text{A impar} \end{cases}$$

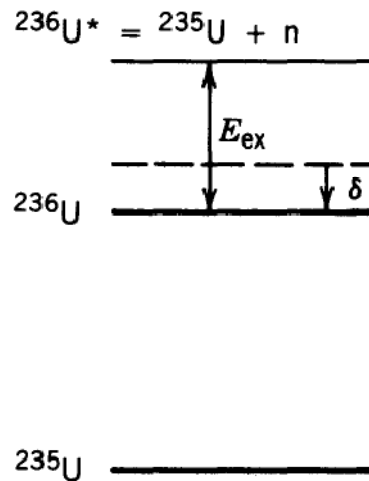
Por tanto, la elevada fisionabilidad del ^{235}U , ^{239}U y ^{232}Pa se entiende considerando la fuerza de apareamiento nuclear

$\delta(^{236}_{92}\text{U}) > 0 \text{ MeV} \rightarrow$ Ligadura aumenta, luego el estado disminuye su energía total

$\delta(^{235}_{92}\text{U}) = 0 \text{ MeV} \rightarrow$ El estado permanece inalterado



E_{exc} aumenta un valor δ

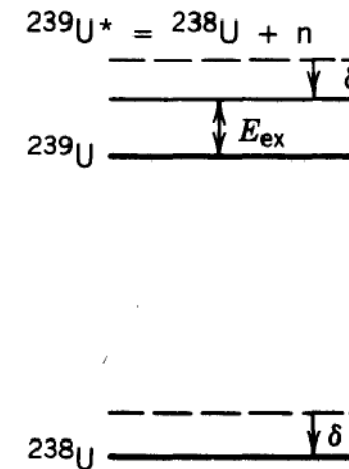


$\delta(^{238}_{92}\text{U}) > 0 \text{ MeV} \rightarrow$ Ligadura aumenta, luego el estado disminuye su energía total

$\delta(^{239}_{92}\text{U}) = 0 \text{ MeV} \rightarrow$ El estado permanece inalterado



E_{exc} disminuye un valor δ

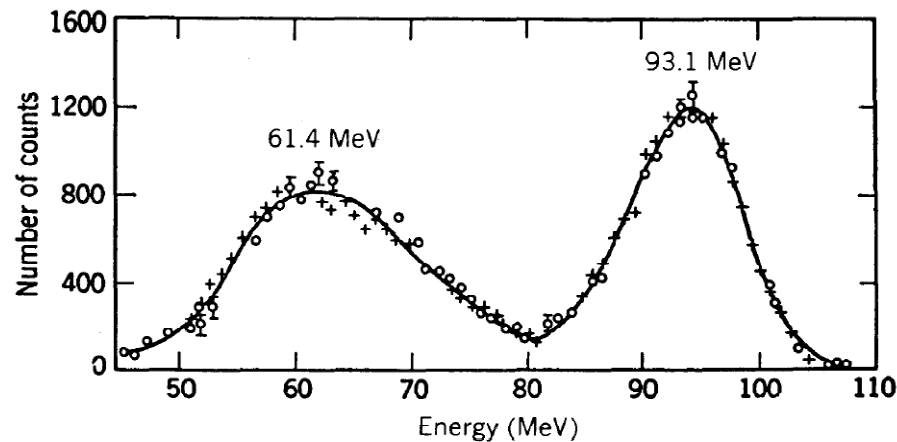


■ Reparto de energía.

- Consideremos una reacción típica como el $^{235}\text{U} + n \rightarrow X_1 + X_2 + n's$, con un valor $Q \approx 200$ MeV.
- Dicha energía se distribuye entre
 - Energía cinética de los fragmentos de fisión ($\approx 80\% \rightarrow \approx 165$ MeV)
 - Los dos picos corresponden al fragmento ligero y al pesado. Despreciando el momento de los n :

$$M_1 v_1 = M_2 v_2 \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \frac{\frac{1}{2} M_1 v_1^2}{\frac{1}{2} M_2 v_2^2} = \frac{M_1}{M_2} \approx \frac{95}{140} \approx 0.68 \approx \frac{61}{93}$$

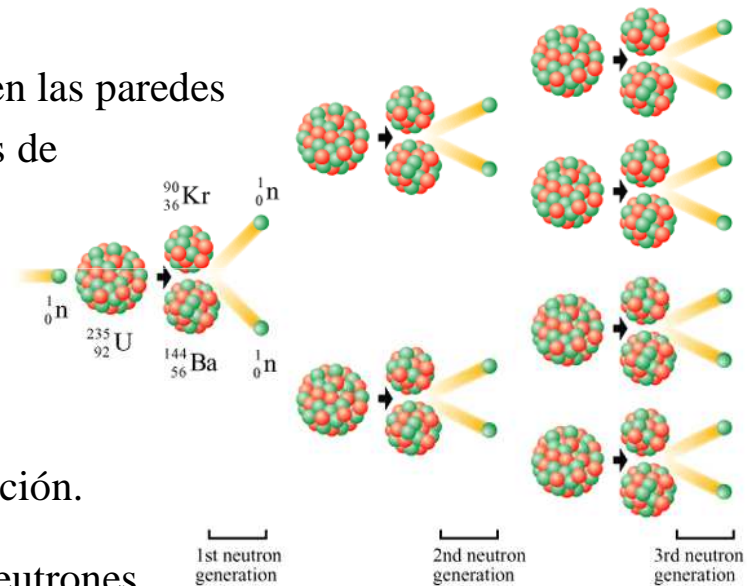
- Neutrones *prompt* ($\approx 2\%$): ≈ 2.5 n/fisión $\times 2$ MeV/n (promedio) = 5 MeV
- Rayos γ *prompt* ($\tau \approx 10^{-14}$ s) ≈ 8 MeV
- Desintegración β de los fragmentos ≈ 19 MeV. $\approx 30\text{-}40\%$ a partículas β y el resto (≈ 12 MeV) a neutrinos
- Desintegración γ de los fragmentos ≈ 7 MeV



Distribución energética de los fragmentos de la fisión por neutrones térmicos del ^{235}U

Reacciones de Fisión controlada

- Consideremos un bloque infinito de uranio natural (0.72% de ^{235}U y 99.28% de ^{238}U).
- En promedio 2.5 neutrones rápidos por cada fisión inducida por un n térmico.
- Aproximadamente 200 MeV/fisión en forma de energía cinética (calor) y radiación.
- **Factor de multiplicación infinito, k_{∞} .**
 - Medio infinito \equiv no existe pérdida de neutrones en las paredes
 - Indica el cambio neto en el número de n térmicos de una generación a la siguiente
 - Para mantener la reacción en cadena, $k_{\infty} > 1$.
- Sin embargo, como los neutrones liberados en la fisión son rápidos, y la sección eficaz para n rápidos es tan pequeña, es preciso “termalizarlos” \Rightarrow moderación.
- Para ello se introducen materiales en los cuales los neutrones pierden energía cinética. Pila de reacción en cadena es la combinación de combustible y material moderador (grafito) alternados



- **Factor de multiplicación finito, k .**

- Medio finito
- $k = 1$ Pila *crítica* (reacción segura y controlada)
- $k < 1$ Pila *subcrítica* (extinción)
- $k > 1$ Pila *supercrítica* (explosión)

- **Fórmula de los cuatro factores, $k_{\infty} = \eta \epsilon p f$.**

- Factor de regeneración, η .

- Dados N neutrones en una generación dada definimos η como el número promedio de neutrones producidos en la fisión por cada neutrón (térmico) inicial.

- Si σ_{fis} y σ_{abs} son las secciones eficaces de fisión y absorción tenemos que $\eta = \nu \frac{\sigma_{\text{fis}}}{\sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{fis}}}$

$$\sigma_{\text{fis}}(^{235}\text{U}) = 584 \text{ b} \quad \sigma_{\text{abs}}(^{235}\text{U}) = 97 \text{ b}$$

$$\sigma_{\text{fis}}(^{238}\text{U}) = 0 \text{ b} \quad \sigma_{\text{abs}}(^{238}\text{U}) = 2.75 \text{ b}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{fis}}(\text{U natural}) &= 0.0072\sigma_{\text{fis}}(^{235}\text{U}) + 0.9928\sigma_{\text{fis}}(^{238}\text{U}) = 4.20 \text{ b} \\ \sigma_{\text{abs}}(\text{U natural}) &= 0.0072\sigma_{\text{abs}}(^{235}\text{U}) + 0.9928\sigma_{\text{abs}}(^{238}\text{U}) = 3.43 \text{ b} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \eta(\text{U natural}) = 1.33$$

- El uso de uranio enriquecido (3% ^{235}U) elevaría el valor de η a 1.84.

N neutrones térmicos iniciales $\rightarrow N\eta$ neutrones rápidos finales

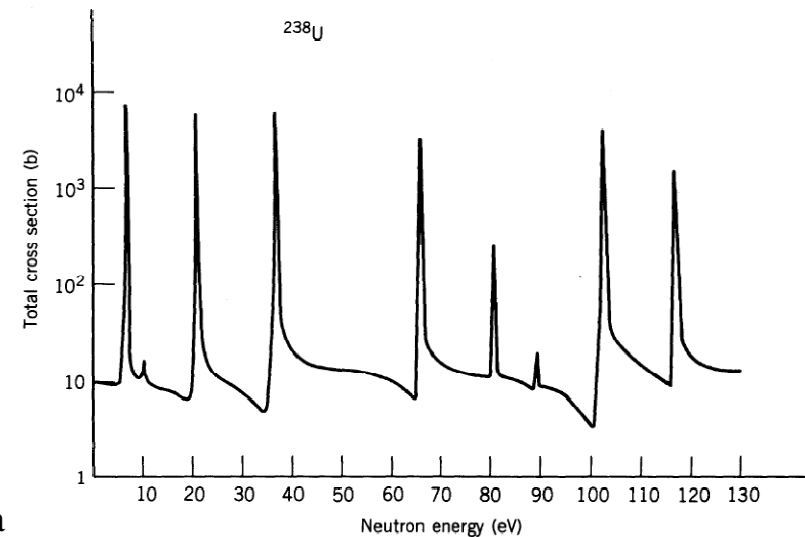
□ Factor de regeneración rápida, ϵ .

- Cuando un neutrón rápido atraviesa el material puede fisiónar uranio a pesar de tener una sección eficaz muy pequeña y generar neutrones adicionales.
- $\epsilon \approx 1.03$.

N neutrones térmicos iniciales $\rightarrow N\eta\epsilon$ neutrones rápidos finales

□ Factor de escape de las resonancias, p .

- Al ser moderados los neutrones pueden ser absorbidos por el ^{238}U si su energía alcanza la zona de resonancias por debajo de 100 eV dentro del mismo.
- Para evitarlo moderadores y combustible no se mezclan, sino que se intercalan. De tal forma que los neutrones recorren espacio suficiente como para que su energía disminuya por debajo de 10 eV debido a las colisiones en el moderador (19 cm).
- p nos indica la cantidad de neutrones perdidos en la zona de resonancia, $p \approx 0.9$.



N neutrones térmicos iniciales $\rightarrow N\eta\epsilon p$ neutrones termicos

□ Factor de utilización térmica, f .

- Tiene en cuenta los neutrones térmicos capturados por el moderador y los componentes estructurales.
- $f \approx 0.9$

N neutrones térmicos iniciales $\rightarrow N\eta\epsilon p f$ neutrones termicos disponibles para la fisión

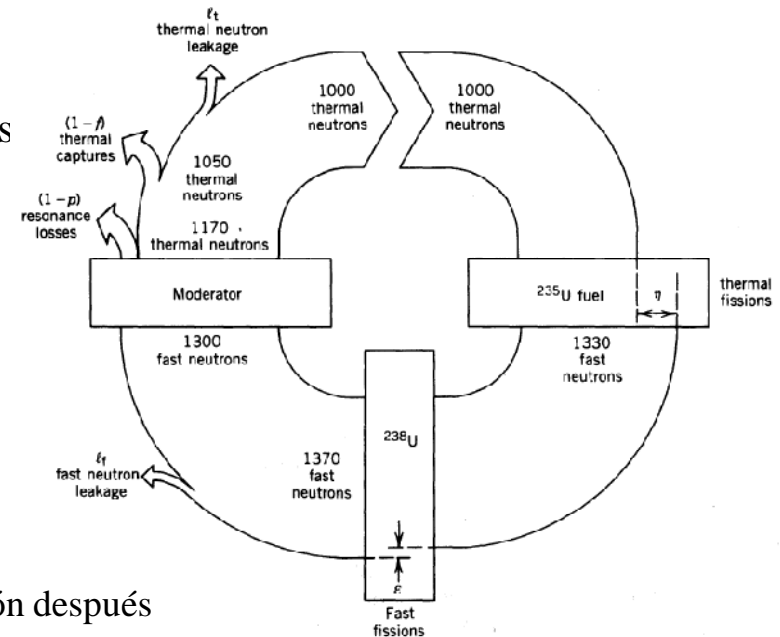
- En el caso de una pila de tamaño finito únicamente restaría tener en cuenta los neutrones perdidos, térmicos y rápidos, que se escapan por las paredes de la pila.

$$k = k_{\infty} (1 - l_r)(1 - l_t)$$

- Evolución temporal del número de neutrones.

$$dN = (kN - N) \frac{dt}{\tau} \rightarrow N(t) = N_0 e^{\frac{k-1}{\tau} t}$$

- τ es constante de tiempo neutrónica. Incluye:
 - Tiempo de moderación ($\sim 10^{-6}$ s) + tiempo de absorción después de termalizarse ($\sim 10^{-3}$ s)
- Si $k = 1 \Rightarrow N$ constante
- Si $k < 1 \Rightarrow N$ decrece exponencialmente
- Si $k > 1 \Rightarrow N$ crece exponencialmente con el tiempo
- Ejemplo numérico: $k = 1.01$ $N(t = 1s) / N_0 = e^{\frac{1.01-1}{10^{-3}} \cdot 1} = e^{10} \approx 22.000 !!!$
- Por tanto, se requiere un elevado control del factor de multiplicación neutrónica
 - **Neutrones retrasados** ($\sim 1-2\%$ del total de neutrones emitidos)
 - **Barras de control:** se insertan en la pila barras con un material con elevada sección eficaz de absorción de neutrones térmicos
 - Se emplea cadmio, boro, samario
 - Barras de parada, de control grueso y de control fino



Reactores de fisión

- La ingeniería de reactores es una disciplina compleja, de modo que discutimos aquí sólo las propiedades generales y categorías de reactores

- Componentes principales:

- *Combustible o material fisible*

- Uranio natural (0.72 % de ^{235}U)
- Uranio enriquecido (2-3% de ^{235}U)

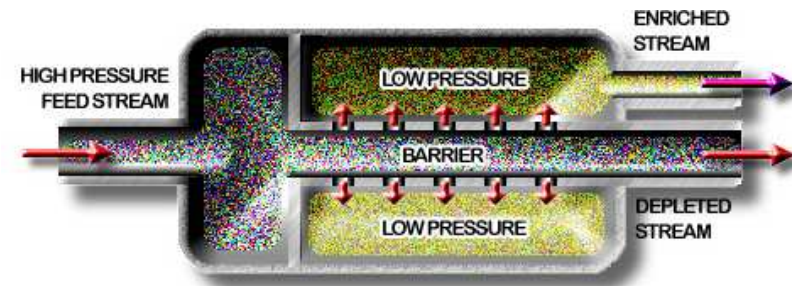
- Costoso de producir, generalmente por medio de difusión gaseosa de hexafluoruro de uranio (UF_6)

- Material moderador clave en el diseño del reactor. El moderador ideal debe ser:

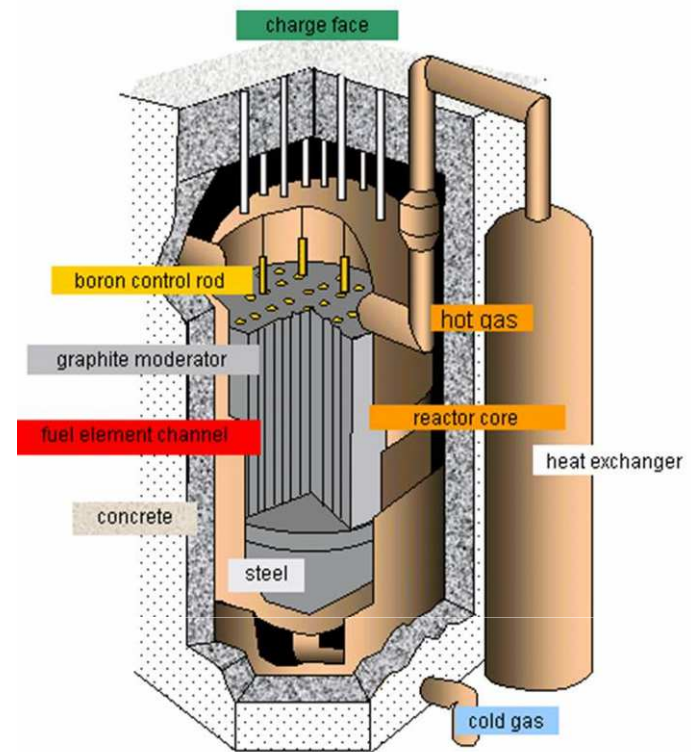
- (i) abundante y barato.
- (ii) químicamente estable.
- (iii) A cercano a 1 (máxima energía en una colisión).
- (iv) elevada densidad (sólido o líquido).
- (v) baja σ de captura de n .



- Carbón (grafito): A alto, y debe compensarse con una elevada cantidad. Sólido manejable y barato
- Agua ligera (H_2O): muy alta σ de captura de n ($n + p \rightarrow d + \gamma$)
- Agua pesada (D_2O): resuelve el problema del agua ligera, pero produce tritio (radiactivo) tras la captura neutrónica y es costosa de producir
- Be ó BeO: difícil de manejar y altamente tóxico (venenoso)



- ❑ Reflector alrededor del núcleo (combustible +moderador), para evitar pérdidas de neutrones y disminuir el tamaño crítico de la pila
- ❑ Vasija de contención, para evitar el escape de los productos de fisión (algunos son gaseosos).
- ❑ Blindaje para rayos γ y neutrones, para evitar daño biológico al personal en las cercanías
- ❑ Refrigerante para efectuar el intercambio de calor con el núcleo (aire, CO_2 , helio, agua, otros líquidos e incluso líquidos pesados – alta capacidad calorífica –, como sodio y litio)
 - Sin él el núcleo del reactor se fundiría
 - La eficiencia de la transferencia de calor entre el núcleo y el exterior es especialmente importante en los reactores de potencia (eficiencia de Carnot)
- ❑ Sistema de control, para controlar el nivel de potencia y mantenerlo constante
- ❑ Sistemas de emergencia, para prevenir situaciones de fallos en los sistemas de refrigeración y/o de control

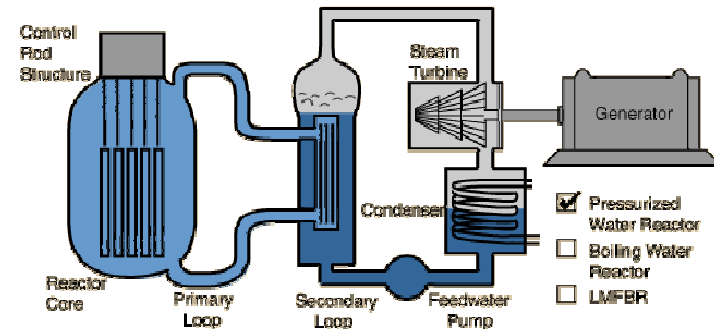


Tipos de reactores de fisión.

- Reactores de potencia: Generan potencia eléctrica a partir del calor generado en el núcleo (energía cinética de los productos). 1 kg de carbón genera 9.3 kWh, 1 kg de ^{235}U genera 2.9×10^7 kWh y 1 m² de panel solar genera 0.5 kWh/día.

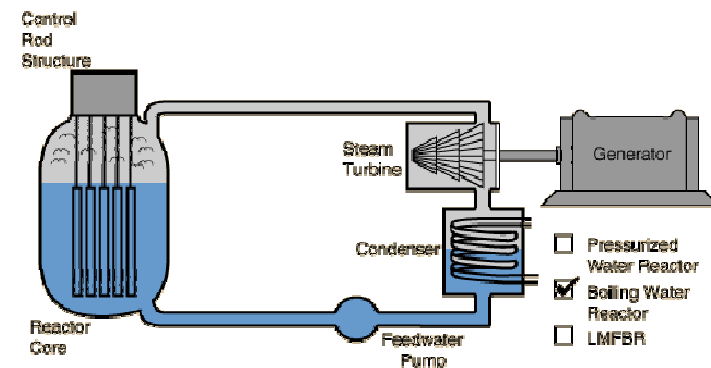
- Reactores de agua presurizada (PWR)

- El agua ligera hace de moderador y refrigerante, sin hervir (~160 atm)
- Si es de potencia, el vapor que acciona la turbina se produce en el circuito secundario
- Alta eficiencia de Carnot
- Uranio enriquecido 2-3%
- Ejemplos: Almaraz, Ascó y Trillo



- Reactores de agua en ebullición (BWR)

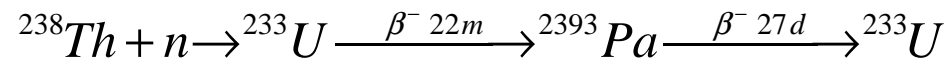
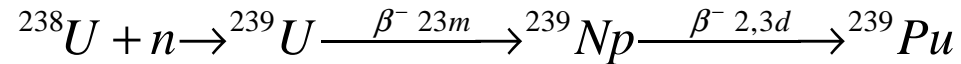
- El agua ligera hace de moderador y refrigerante, en ebullición (~70 atm)
- El mismo circuito acciona la turbina
- Uranio enriquecido 2-3%
- Técnicamente más sencillo que el PWR
- Las desventajas:
 - Pequeña fracción de ^{18}O por captura neutrónica y activación de impurezas
 - Cualquier fuga de combustible puede contaminar el agua
 - Menor eficiencia de Carnot
- Ejemplo: Cofrentes



- Reactores de investigación
 - Diseñados para producir grandes flujos de neutrones ($\sim 10^{13}$ n / cm² s, y en algunos casos varios órdenes de magnitud mayores) y neutrinos

- Reactores convertidores

- Convierten material no fisible por neutrones térmicos (material fértil) en fisible:

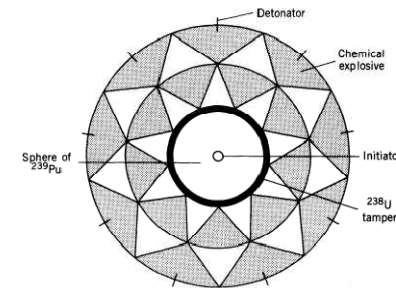
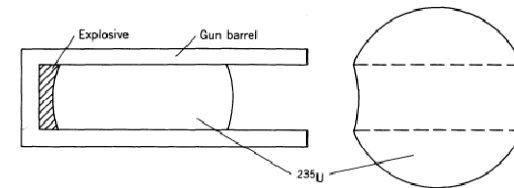


- Se requiere $\eta > 2$ para que el reactor produzca más material fisible que el que consume \Rightarrow reactor tipo *breeder*
- Los más interesantes son los tipo *fast breeder*, ya que usualmente η es mayor para neutrones rápidos (MeV) que para térmicos y eso permite mantener el ciclo más fácilmente.
 - Ejemplo: $\eta({}^{239}\text{Pu}, n \text{ térmicos}) = 2.1$, $\eta({}^{239}\text{U}, n \text{ rápidos}) = 3$
- El material fisible producido puede separarse del fértil por medios químicos \Rightarrow mucho más fácil y rentable que la separación isotópica (ej. ${}^{235}\text{U}/{}^{238}\text{U}$)

- Existen otros tipos de reactores que no hemos discutido, entre ellos los reactores de agua pesada presurizada (PHWR o CANadian-Deuterium-Uranium), reactores enfriados por gas (GCR o AGCR) y reactores *liquid metal fast breeder* (LMFBR).

Explosivos de fisión.

- Desarrollo de la tecnología de fisión impulsado en buena medida por el desarrollo de explosivos (Segunda Guerra Mundial y proyecto Manhattan)
- El concepto del diseño no es muy distinto del de reactores, y es público en sus aspectos esenciales
- Detalles del diseño y procedimientos para la obtención del material fisible están clasificados
- Principal problema en el diseño es la eficiencia de consumo de material combustible antes de la destrucción de la bomba
- Uranio enriquecido o plutonio
- Idea básica: distintas piezas subcríticas son ensambladas a tamaño supercrítico por medio de un explosivo químico + la inyección de neutrones (detonación)
- Dos tipos esenciales de bombas A (ó de fisión)
 - Tipo cañón
 - “Little Boy”, Hiroshima, ~20 kilotones
 - Implosión
 - “Fat Man”, Nagasaki, ~20 kilotones
- Hoy, hasta ~500 kilotones



Aspectos generales de la fusión nuclear

- Se trata del proceso opuesto a la fisión nuclear. Si unimos dos núcleos ligeros para formar un núcleo con $A < 56$ se libera energía.
 - Por una parte los núcleos ligeros son abundantes y fáciles de obtener y los productos finales son ligeros y estables.
 - Por otra parte antes de poder combinarse los núcleos ligeros deben superar la repulsión coulombiana entre ellos y por tanto no se pueden utilizar proyectiles de baja energía (neutrones térmicos)

- Balance energético.

- Un caso típico es

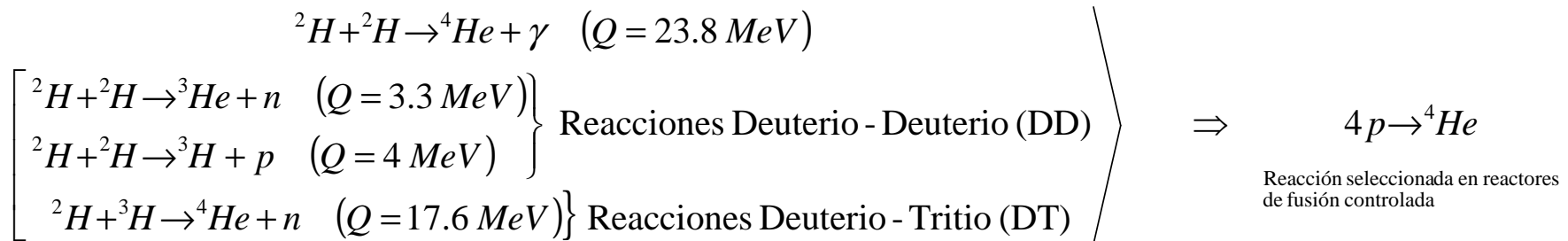
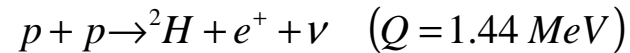


- La repulsión coulombiana cuando las superficies están en contacto es de $E_{\text{coulomb}} = 21.2 \text{ MeV}$, por lo que la energía cinética de los núcleos de Ne debe ser de $E_{\text{cinética}} = 21.2 \text{ MeV}$ para obtener una energía total final de $E_{\text{final}} = 21.2 + 20.7 = 41.9 \text{ MeV}$
- ¿Cómo alcanzar dichas energías cinéticas?
 - Reacción entre iones pesados acelerando iones de ${}^{20}\text{Ne}$ hasta energías de 21.2 MeV
 - El principal inconveniente es que las intensidades de haces de iones y las secciones eficaces de fusión son muy pequeñas, por lo que la potencia de salida es insignificante.
 - Fusión termonuclear. Implica calentar un gas de Ne a alta temperatura de tal forma que la energía cinética aumente y los núcleos puedan colisionar.

$$E_{\text{He}} = \frac{1}{2}(21.2 \text{ MeV}) = \frac{3}{2}kT \Rightarrow T \approx 10^{11} \text{ K}$$

Procesos básicos de fusión.

- La fusión no es un proceso que se pueda dar en la superficie terrestre de forma espontánea (barrera coulombiana).
- El proceso más sencillo posible $p + p \rightarrow {}^2\text{He}$ no se observa ya que el ${}^2\text{He}$ es inestable y decae inmediatamente.
- Por lo tanto la cadena de procesos más habituales es



- La reacción $4p \rightarrow {}^4\text{He}$ (que ocurre en varias etapas) es la reacción termonuclear básica en estrellas similares al Sol
- Las reacciones
 - ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$ No se observa puesto que el ${}^8\text{Be}$ decae en 10^{-16} s
 - ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ Muy poco probable. Sólo se da en estrellas muy calientes (viejas), debido a que la barrera coulombiana en núcleos de ${}^4\text{He}$ es mayor que en núcleos de ${}^2\text{H}$

Características de las reacciones de fusión.

- Energía liberada.

$A + X \rightarrow B + Y$ A temperatura ambiente, las energías cinéticas iniciales son despreciables, $T_A, T_X \approx 1-10 \text{ keV} \ll Q$

$$\frac{1}{2} m_B v_B^2 + \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 \approx Q \quad p_A \approx p_X \approx 0 \rightarrow m_B v_B \approx m_Y v_Y$$

$$T_B \cong \frac{Q}{1 + \frac{m_B}{m_Y}} \quad T_Y \cong \frac{Q}{1 + \frac{m_Y}{m_B}} \quad \frac{T_Y}{T_B} = \frac{m_B}{m_Y}$$

$$DT \Rightarrow {}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n \quad T_n \approx 0.80 Q$$

$$DD \Rightarrow {}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + p \quad T_p \approx 0.75 Q$$

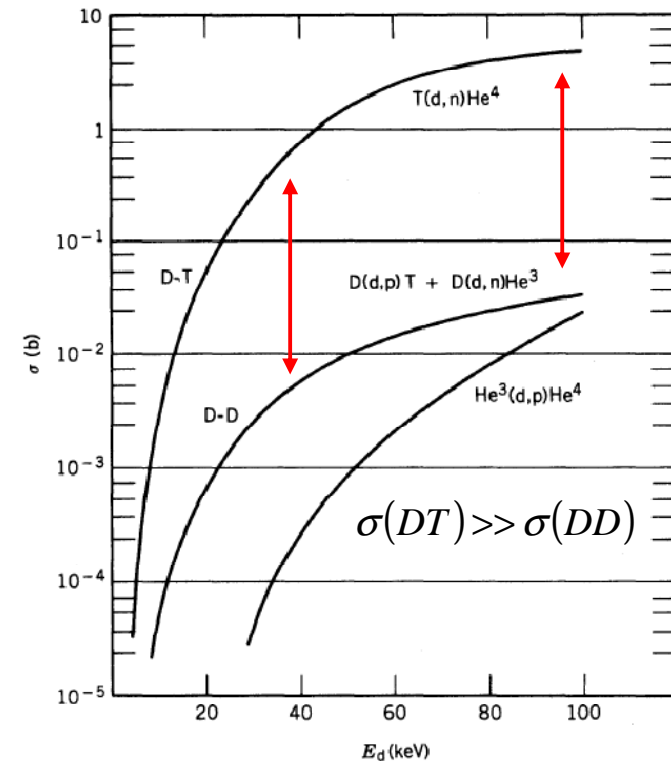
- Barrera Coulombiana

Si R_A y R_X son los radios de las partículas que se fusionan,

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_A Z_X}{R_A + R_X} \quad \text{Para el caso DT } V_c \approx 0.4 \text{ MeV}$$

- Sección eficaz

La sección eficaz es $\propto \frac{1}{v^2} e^{-2G}$. Donde v es la velocidad relativa de los núcleos y G es un factor de penetración de barrera análogo al caso del decaimiento α .



- Tasa de reacción.

- La tasa a la que se produce una reacción nuclear depende del producto σv .

- La velocidad relativa depende de la temperatura según la distribución de Maxwell-Boltzmann.

$$n(v) \propto e^{-mv^2/2KT}$$

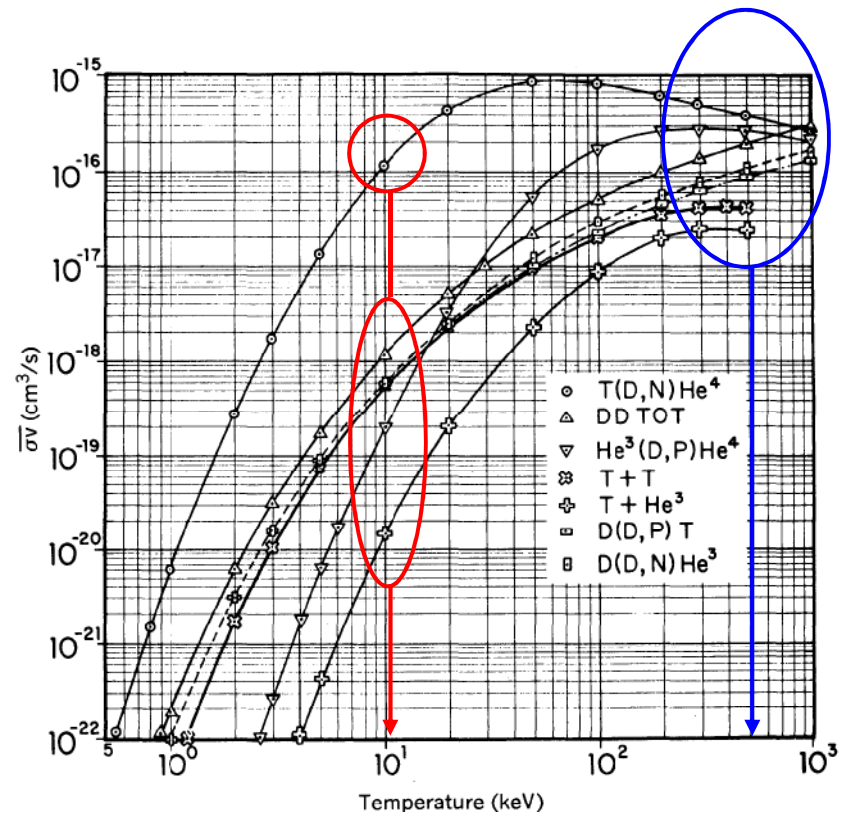
- La probabilidad de encontrar una partícula con velocidad entre v y $v+dv$ es $n(v) v^2 dv$

- Por lo tanto el valor promedio será

$$\langle \sigma v \rangle \propto \int \frac{1}{v} e^{-2G} n(v) v^2 dv$$

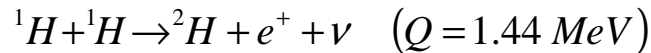
- Para energías del orden de 1-10 keV (equivalente a temperaturas de 10^7 - 10^8 K) la reacción DT esta favorecida

- Para valores más altos de la energía eso es necesariamente cierto.



Procesos de Fusión solar.

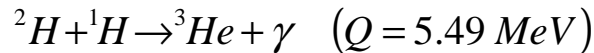
- El sol es el prototipo ideal de reactor termonuclear autosostenido de potencia constante durante los últimos 10^9 años.
- El proceso básico es la fusión de Hidrógeno en Helio
 - El primer paso es un proceso débil denominado “cuello de botella” por su escasa probabilidad



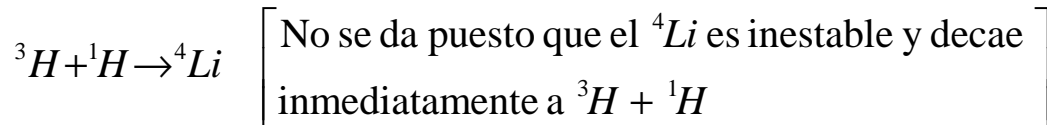
$$T_p \approx \text{keV} \rightarrow \sigma \approx 10^{-33} \text{ b} \rightarrow \langle \sigma v \rangle (T = 10^7 \text{ K}) \approx 10^{-18} \text{ s}^{-1} \text{ por proton}$$

Esto nos dice que se forma 1 d por cada 10^{18} protones. Si tenemos en cuenta la masa del Sol se tiene que $\langle \sigma v \rangle (T = 10^7 \text{ K}) \approx 10^{38} \text{ s}^{-1}$

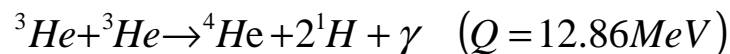
- Las siguientes reacciones son mucho más rápidas.



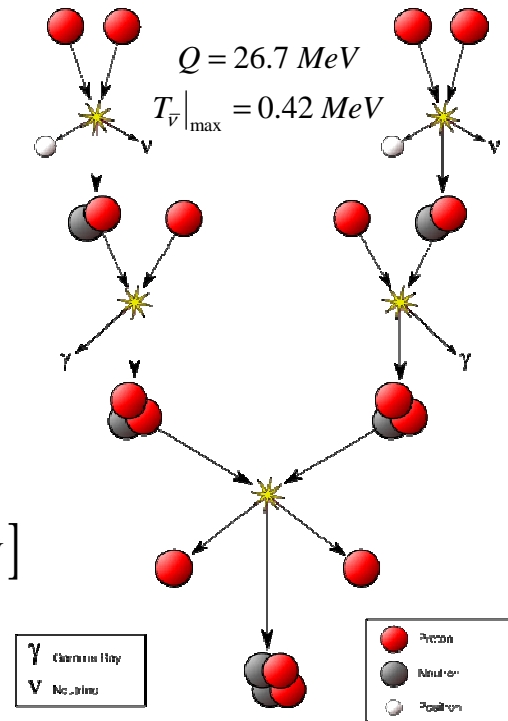
[DD no se da puesto que hay muchos más ${}^2\text{H}$ que ${}^1\text{H}$]



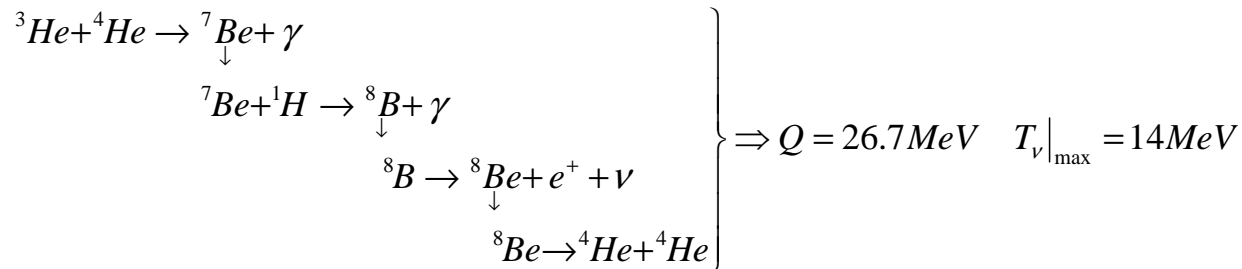
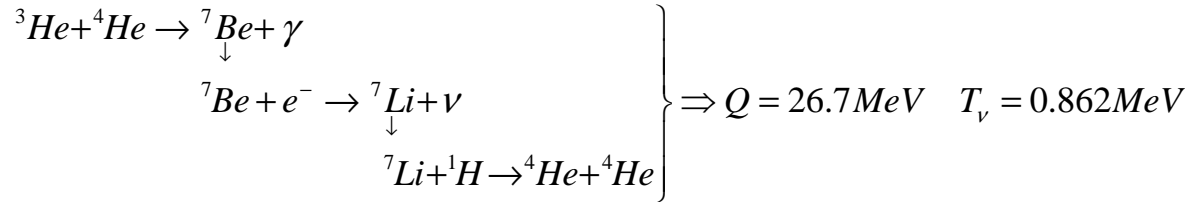
Luego la reacción que si se da es



y se conoce como el ciclo protón - protón

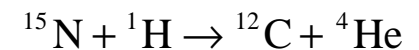
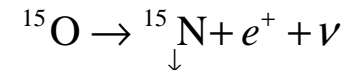
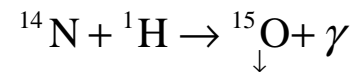
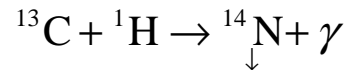
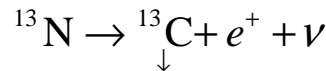
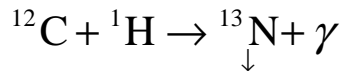


- Existen caminos alternativos para quemar el ${}^3\text{He}$ dependiendo de la edad y la composición de la estrella.



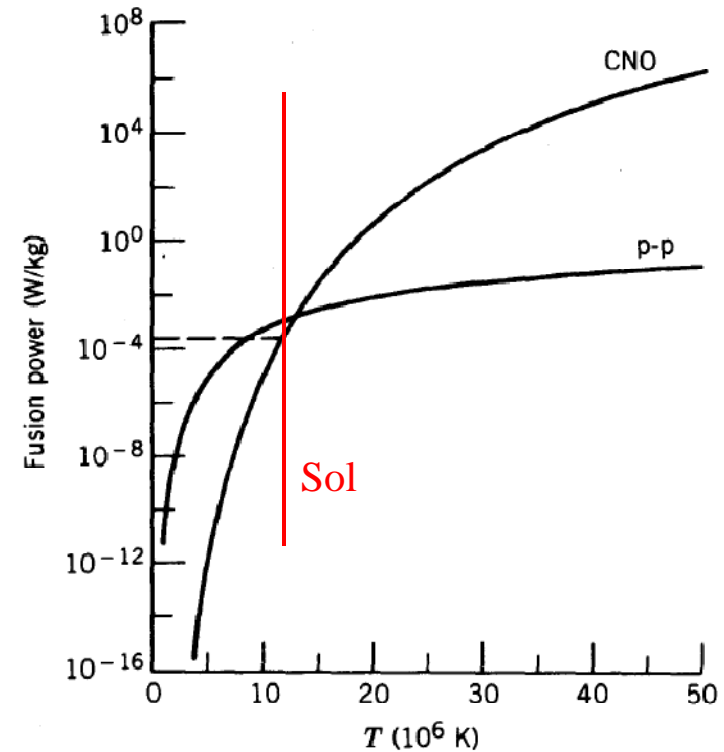
- Analizando los neutrinos emitidos se determina el proceso. Tal y como vimos en temas anteriores únicamente se registran 1/3 de las neutrinos esperados.

- Otra posibilidad es el ciclo del carbono, CNO, donde el ${}^{12}\text{C}$ actúa como catalizador de la reacción. Este proceso es más rápido puesto que no existe “cuello de botella”, pero requiere una mayor temperatura debido a que la barrera coulombiana es 6-7 veces mayor y por tanto sólo se da en estrellas mucho más calientes que el Sol.



- Sol:

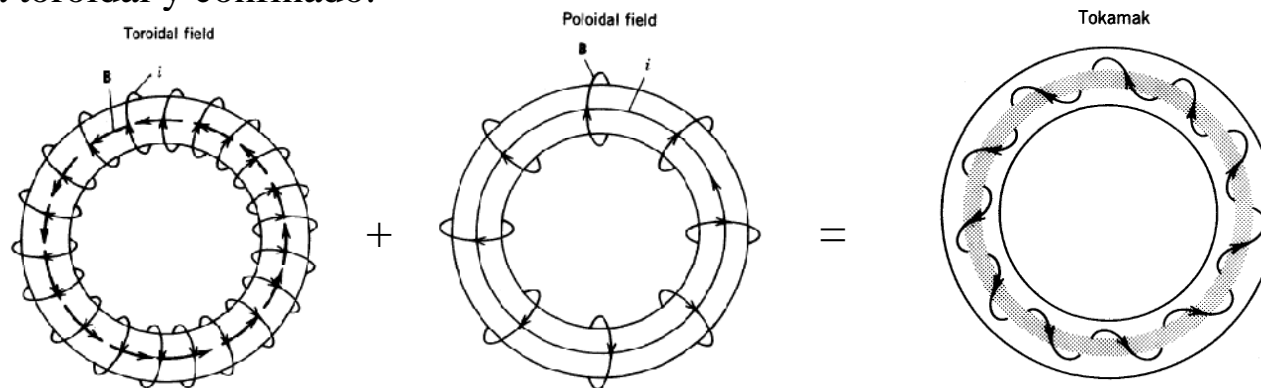
- Radiación solar media en la Tierra:
 $\approx 1,4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$
- Potencia total del Sol:
 $\approx 4 \times 10^{26} \text{ W}$
- Energía por fusión:
 $\approx 25 \text{ MeV}$
- Número de fusiones:
 $\approx 10^{38} \text{ fusiones/s}$
- Número de protones consumidos:
 $\approx 4 \times 10^{38} \text{ protones/s}$
- Vida futura estimada del Sol:
 $\approx 10^{10} \text{ años}$

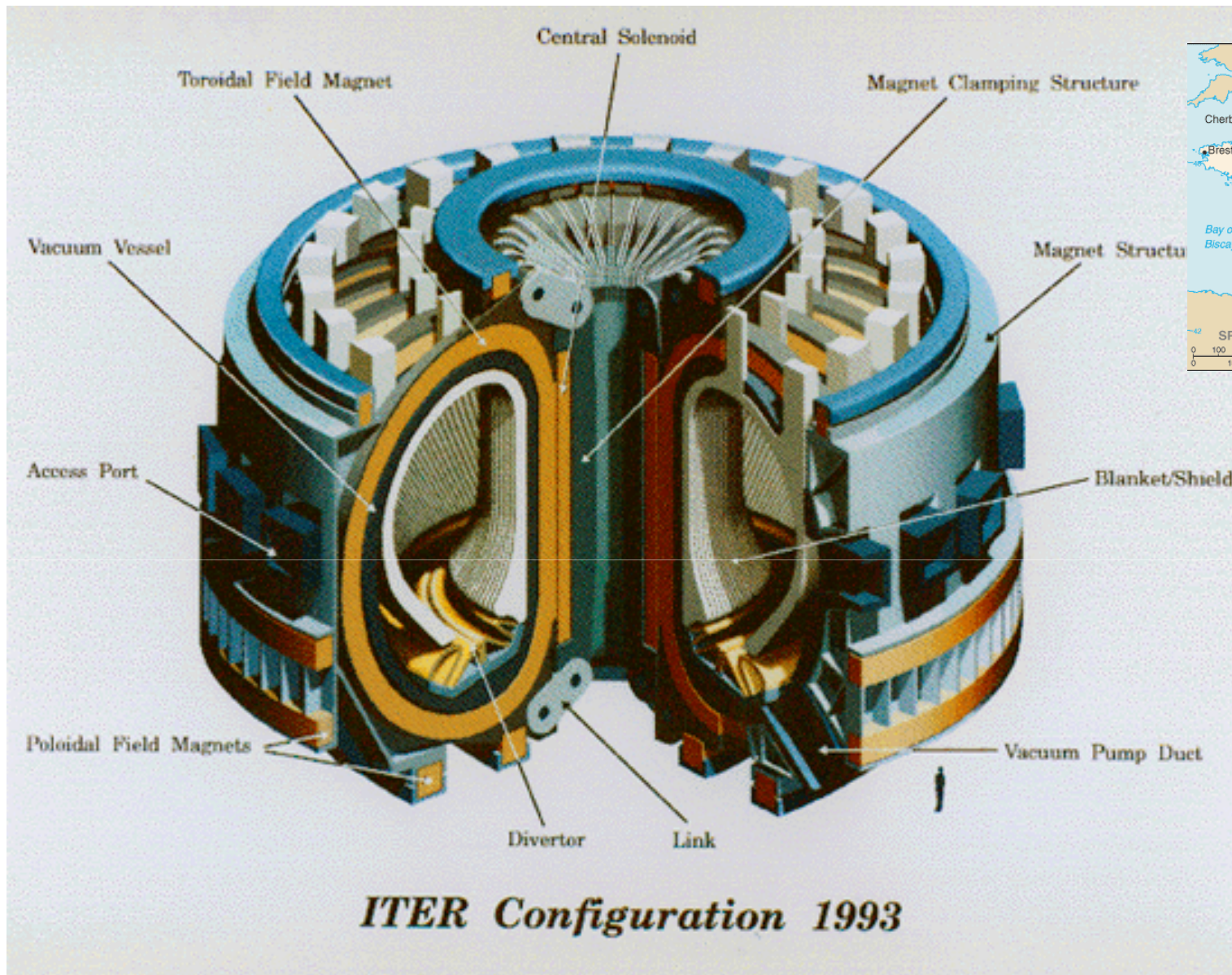


- Una vez consumido el combustible de hidrógeno, se puede quemar helio, a temperaturas mayores –incremento de la barrera de Culomb- (por ej. $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$), y se puede seguir luego con otros núcleos ligeros hasta llegar al ^{56}Fe a partir del cual ya no hay ganancia de energía
- Este mecanismo ayuda a entender las distintas categorías de estrellas y las abundancias relativas de diversas especies nucleares

Reacciones de fusión controlada.

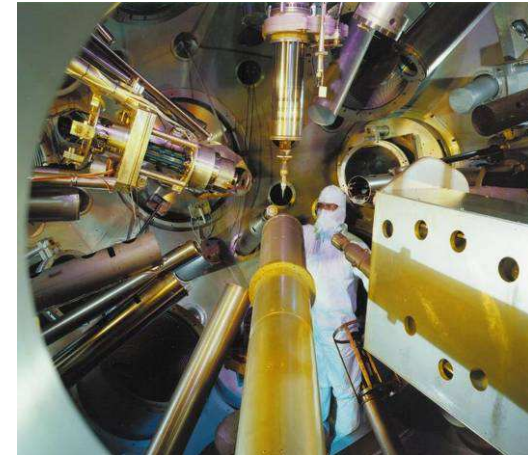
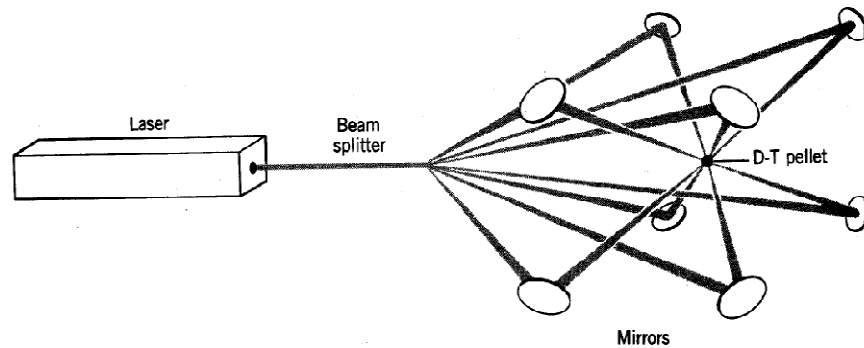
- Para lograr reacciones de fusión controlada y extraer potencia utilizable se requiere:
 - Calentar el combustible a temperaturas $\approx 10^8$ K ($T \approx 10$ keV)
 - Alcanzar una densidad suficientemente alta durante un tiempo suficientemente largo
- A estas T los átomos están ionizados \Rightarrow mezcla neutra de nubes de iones positivos y electrones negativos \Rightarrow **Plasma**
- El material más resistente a la temperatura es el Ta_4HfC_5 . Dicho material funde a 4500 K, por lo tanto no existe ningún sólido capaz de aguantar las temperaturas a las que se encuentra el plasma.
- Métodos de confinamiento:
 - Confinamiento magnético: Utiliza campos magnéticos para fijar el plasma en una trayectoria circular. Entre ellos cabe destacar los Tokamak, en los que el plasma es calentado en una vasija toroidal y confinado.





ITER (Colaboración Internacional)

- Confinamiento inercial: Una pastilla de combustible es calentada y comprimida al bombardearla simultáneamente desde múltiples direcciones con haces intensos de fotones o partículas.



→ Radiation

→ Blowoff

→ Inward transported thermal energy



Laser beams or laser-produced x rays rapidly heat the surface of the fusion target, forming a surrounding plasma envelope.

Fuel is compressed by the rocketlike blowoff of the hot surface material.

During the final part of the capsule implosion, the fuel core reaches 20 times the density of lead and ignites at 100,000,000°C.

Thermonuclear burn spreads rapidly through the compressed fuel, yielding many times the input energy.



■ Criterio de Lawson.

- La energía liberada por unidad de volumen en la reacción de fusión es

○ n : densidad atómica de deuterio o tritio.

○ τ : tiempo de confinamiento del plasma

○ $Q = 17.6 \text{ MeV}$ y $\langle \sigma v \rangle \approx 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ para D-T

$$E_{lib} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle Q \tau = \left(n_D = n_T = \frac{1}{2} n \right) = \\ = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau$$

- La energía térmica necesaria para calentar los iones a temperatura T es

$$E_T = \frac{3}{2} nkT \Big|_{\text{iones}^+} + \frac{3}{2} nkT \Big|_{\text{iones}^-} = 3nkT$$

- Habrá producción neta de energía si

$$E_{lib} > E_T \rightarrow n\tau > \frac{12kT}{\langle \sigma v \rangle Q}$$

$$\text{Para } DT \rightarrow T = 10 \text{ keV} \rightarrow n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$$

$$\text{Para } DD \rightarrow T = 100 \text{ keV} \rightarrow n\tau > 10^{22} \text{ s/m}^3$$

Por tanto requiere 100 veces más tiempo o densidad obtener ganancia de energía utilizando DD que DT .

- El Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) en Princeton ha alcanzado la mayor temperatura registrada, $5.1 \cdot 10^8 \text{ K}$, temperatura más que suficiente para inicial la fusión DT y se ha aproximado al criterio de Lawson, aunque las densidades necesarias nunca se han alcanzado junto con dicha temperatura.

Explosivos termonucleares.

- Las bombas H ó termonucleares ~ 1-10 megatones
- El concepto del diseño no es muy distinto del de reactores, pero los detalles están clasificados
- Suelen usar una mezcla ${}^6\text{Li}$ -deuterio sólido
- Una bomba-detonador de fisión permite alcanzar la temperatura y densidad necesarias para iniciar la fusión, y suministra los n para producir tritio:



- El ${}^3\text{H}$ tiene bastante energía (2.7 MeV) para penetrar la barrera coulombiana de la reacción D-T
- El calor (de la radiación γ , X y los fragmentos de fisión), los n y α actúan como la técnica de confinamiento inercial hasta que la expansión apaga la reacción
- Los n rápidos de la reacción D-T pueden usarse a su vez para una segunda etapa de fisión, rodeando la cápsula de fusión por ${}^{238}\text{U} \Rightarrow$ ciclo fisión-fusión-fisión
 - El ${}^{238}\text{U}$ produce bombas “sucias” (productos de fisión de muy larga vida media)
- Los rayos γ y X ionizan el aire \Rightarrow los electrones son acelerados por el \mathbf{B} terrestre \Rightarrow pulso e.m. con campos eléctricos $\sim 10^4 \text{ V/m}$ / megatón \Rightarrow destrucción de redes eléctricas y comunicaciones
- Bombas estratégicas de neutrones: “pequeñas” bombas H (~kilotón) sin recubrimiento de ${}^{238}\text{U}$ que producen un intenso flujo de $n \Rightarrow$ dosis letales (20 Sv a 1 km) localizadas con “reducida” destrucción

