

Fusión y fisión.

Félix Pérez Rubio.

Índice

1. Resumen	3
2. Fisión	4
2.1. Introducción histórica.	5
2.2. Mecanismo físico.	7
2.3. Características de la fisión.	8
2.4. Reacciones de fisión controlada.	12
2.5. Reactores de fisión.	16
2.6. Armas de fisión.	21
3. Fusión	25
3.1. Introducción.	26
3.2. Procesos básicos de fusión nuclear.	27
3.3. Características de la fusión.	27
3.4. Fusión Solar.	30
3.5. Reactores de fusión controlada.	34
3.6. Armas termonucleares.	36

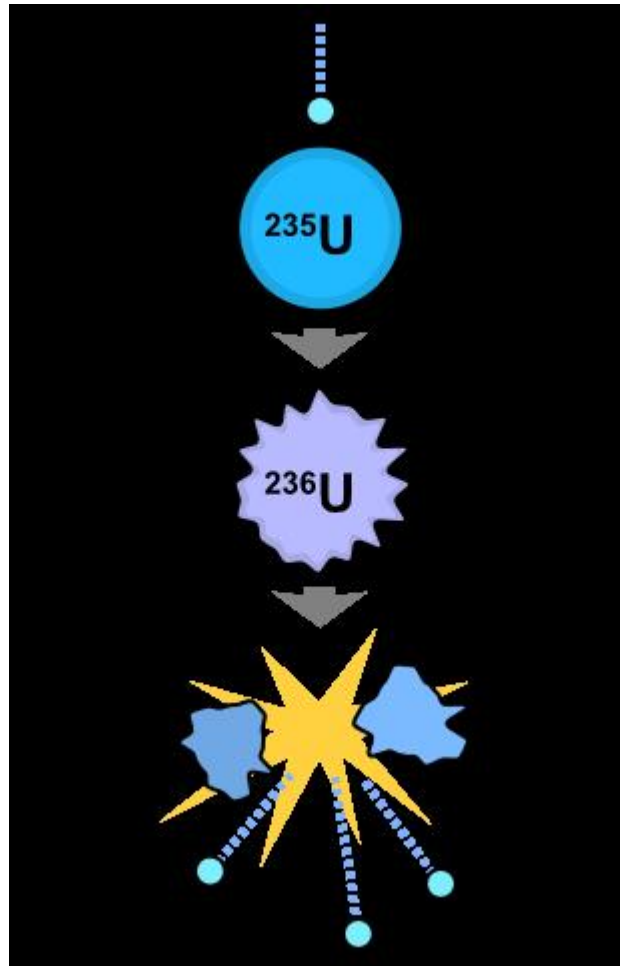
1. Resumen

Se denominan fisión y fusión nuclear a dos procesos nucleares exoenergéticos con importantes aplicaciones. Ambos procesos producen cantidades extraordinariamente elevadas de energía, y ambos procesos son básicos en la concepción de los reactores nucleares utilizados en la producción de energía eléctrica.

La fisión es un fenómeno que atañe a los núcleos más pesados (uranio y plutonio principalmente). La fusión, sin embargo, es un proceso que tiene lugar de forma natural en las estrellas. Por eso brillan (emiten fotones) y además emiten otras partículas de gran interés para la astrofísica.

A lo largo de este breve resumen acerca de la fisión y fusión se hará una introducción a los mecanismos y reacciones nucleares que tiene lugar en ambos procesos y también se tratarán los dos usos prácticos más importantes que se extraen de estos dos fenómenos que son la generación de energía con los reactores nucleares y las armas nucleares. En el apartado dedicado a la fusión también se analiza al Sol como reactor termonuclear.

2. Fisión



2.1. Introducción histórica.

El desarrollo de la Física Nuclear ocurrió con mucha velocidad en la década de 1930. Siguiendo al descubrimiento del neutrón por parte de Chadwick en 1932, el siguiente paso fue estudiar los efectos de la exposición de varios núcleos a los neutrones. Enrico Fermi y sus colaboradores en Italia expusieron algunos a los neutrones y estudiaron la radioactividad inducida que sigue a la captura electrónica. Descubrieron que de esos muchos núcleos decaían por emisión de β^- al intentar el núcleo compensar el exceso de neutrones convirtiendo un neutrón en un protón. El resultado es un núcleo residual de número atómico una unidad mayor. (Este trabajo le valió a Fermi el premio Nobel en 1938).

A continuación se hizo uso de esta técnica para aumentar el número atómico para producir elementos transuránicos, que son los que resultan ser más pesados que el uranio. Fue en el transcurso de estos trabajos cuando Hahn (Premio Nobel de química en 1944) y Strassmann advirtieron la existencia de la fisión inducida por neutrones, una reacción exoenergética que, al existir la posibilidad de reacción en cadena, se convirtió en una reacción que tiene aplicaciones prácticas como fuente de energía y que posibilitó la realización de reactores de fisión.

Cuando a principios de 1939 se verificó que se emitían neutrones en el proceso de fisión, y que al parecer eran suficientes como para mantener una reacción en cadena en una “pila” de uranio y grafito¹. Este trabajo fue liderado por Fermi, que se trasladó a los Estados Unidos, y culminó en el desarrollo del primer reactor nuclear operativo, el 2 de Diciembre de 1942, en Chicago. Debido al momento en el produjo el desarrollo de la fisión nuclear los primeros objetivos fueron de carácter bélico, como la producción de plutonio-239 (²³⁹Pu), que era considerado un material apropiado para una bomba de fisión.

La producción de ²³⁹Pu requirió de la fabricación de reactores mucho más grandes que el de Chicago.

Al concluir la guerra el interés científico seguía focalizado en desarrollos armamentísticos, pero ya se empezaron a buscar usos civiles de entre los cuales destaca el desarrollo de la generación eléctrica con centrales nucleares. Debido a la sobreabundancia de combustibles fósiles no era necesaria una rápida implementación de estas técnicas.

¹El uranio actúa como combustible y el grafito actúa como moderador. En la sección 2.4 se explica más acerca del concepto del moderador.

El primer uso de reactores nucleares para producción de energía fue desarrollado por la U.S. Navy para sus flotas de submarinos en 1953. EL primer reactor “civil” se construyó en Shippingport, Pennsylvania y se puso en funcionamiento en 1957. Tenía una capacidad inferior a 100MW y era un reactor de agua ligera². A partir de este momento se produjo un rápido crecimiento en el número de reactores operativos, en 1960 ya se encontraban en funcionamiento 14 reactores en los Estados Unidos. Este desarrollo continuó hasta finales de los años setenta momento en el que dejaron de construirse nuevos reactores, hasta el día de hoy en Estados Unidos no se han desarrollado nuevos reactores nucleares, aunque en otros países sí que se ha continuado con el desarrollo de esta forma de producción de energía, ya sea porque en ellos existe una política energética diferente (Francia) o porque en esos países el desarrollo de la energía nuclear fue más tardío.

Actualmente los reactores nucleares se usan hoy día en 31 países para la generación de electricidad. Suministrando aproximadamente un sexto de la electricidad total. En noviembre de 2003 estaban operativos 440 reactores nucleares para la producción eléctrica, con una capacidad total de 360 GWe.

²Ver sección...

2.2. Mecánismo físico.

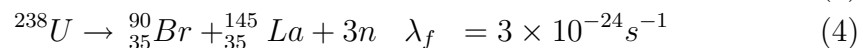
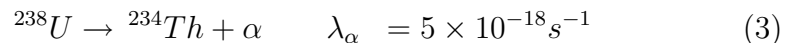
La fisión tiene resultado en principio por la competencia entre las fuerzas coulombianas y nucleares en los núcleos pesados. La energía de ligadura debida a la fuerza nuclear crece aproximadamente en proporción a A , mientras que la fuerza de repulsión columbiana entre los protones crece mas rápido, como Z^2 . Si pensamos en los núcleos pesados vemos que estos se encuentran muy cerca del extremo de la barrera de potencial, el potencial coulombiano es entonces muy fino y fácil de atravesar. La fisión ocurre entonces de forma espontanea. Veamos un ejemplo:



En este caso el núcleo de uranio se escinde en dos núcleos que tendrán aproximadamente la mitad del número másico. Como la energía por nucleón de uranio es aproximadamente de 7.6 MeV y la energía por nucleón del paladio es de 8.5 MeV, tenemos un balance energético:

$$\Delta E = E_{ini} - E_{fin} \approx 238(8,5 - 7,6) = 214 \text{ MeV} \quad (2)$$

La reacción es exotérmica, desprendiendose 214 MeV, que aparece en su mayoría (80%) en forma de energía cinética de los fragmentos desprendidos. El hecho de que la desintegración por fisión sea posible no quiere decir sea probable; en el caso del ${}^{238}\text{U}$ es mucho más importante la desintegración α :



La fisión espontanea representa por tanto una fracción 6×10^{-7} de los casos.

La fisión no se convierte en un proceso de desintegración significativo hasta que trabajamos con núcleos de masa superior a 250 uma. En la figura 1 podemos observar como para los elementos de masa cercana a la del uranio el balance energético es positivo al fisionarse en dos elementos cuya masa sea aproximadamente la mitad.

Como ya hemos visto en el ejemplo y en la gráfica 1 la fisión espontanea es posible pero poco probable. Si deseamos que ésta tenga lugar debemos de

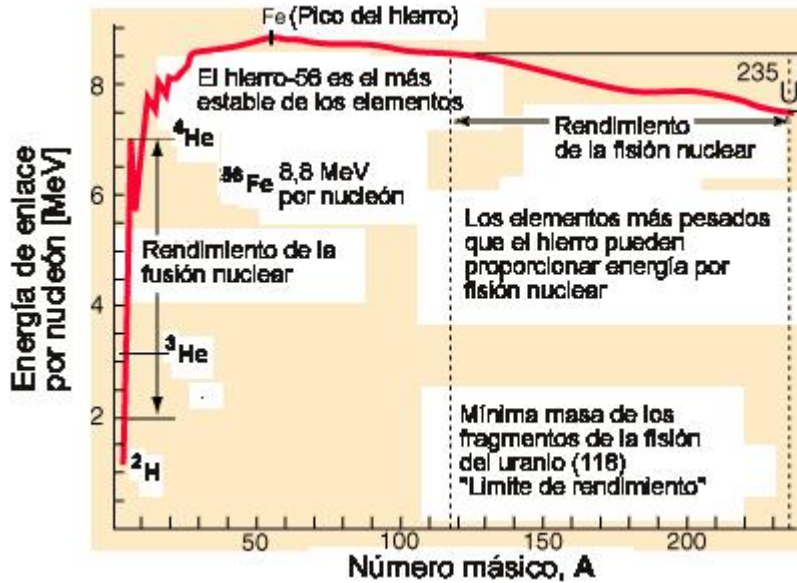
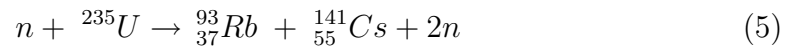


Figura 1: Energía de enlace de los nucleones.

activar la fisión, bombardeando el núcleo pesado con neutrones térmicos, que son neutrones con una energía cercana a 0.025 eV (el equivalente de kT para la temperatura ambiente). La reacción típica es:



Se da la circunstancia de que el ${}^{236}\text{U}$ que se forma tras la captura electrónica tiene una energía de excitación; $E_{exc} = 6,5\text{MeV}$, que es superior a la energía de excitación necesaria para superar la barrera de fisión, que es de $E_f = 6,2\text{MeV}$. En la figura2 observamos la variación de la energía de fisión con el número másico y podemos ver que para núcleos con $A \geq 300$ se convierte en el efecto dominante.

2.3. Características de la fisión.

- *Distribución de la masa de los fragmentos.*

Ya hemos visto que la típica reacción de fisión inducida, al incidir con neutrones térmicos, es 5. Pero estos productos no son los únicos que se

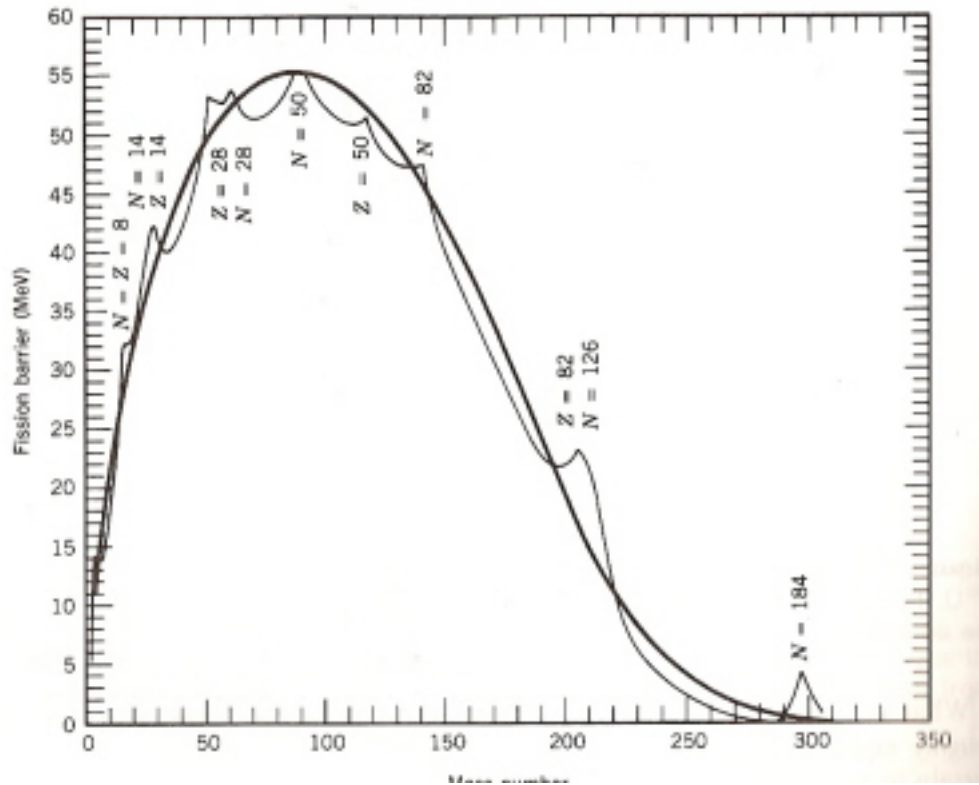


Figura 2: Energía de activación de la fisión frente al número másico.

pueden dar³, sino que hay una distribución de la probabilidad de obtener una determinada masa en los productos, tal y como se muestra en la figura 3. La distribución debe de ser simétrica respecto al centro, que sería aproximadamente la mitad de la masa del núcleo que se fisiona. La probabilidad de que se produzca la fisión en dos núcleos de masa similar ($A_1 \approx A_2$) es unas 600 veces menos probable que la fisión en núcleos de masa $A_1 \cong 95$ y $A_2 \cong 140$. Sorprendentemente no existe explicación para esta distribución de las masas característica de los procesos de fisión con bajas energías. Los procesos de fisión inducidos por partículas de alta energía favorecen sin embargo la creación de núcleos de igual masa.

³Otras posibilidades son: ${}_{40}\text{Zr} + {}_{52}\text{Te}$, ${}_{36}\text{Kr} + {}_{56}\text{Ba}$, etc.

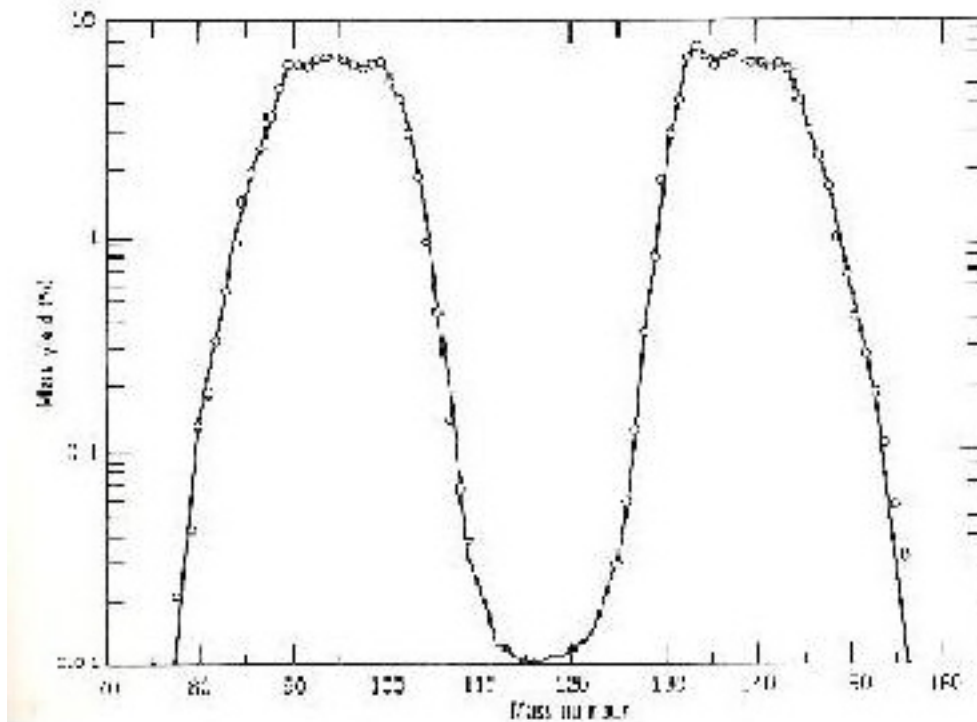


Figura 3: Energía de enlace de los nucleones. Se representa la probabilidad de cada uno de los núcleos frente a su masa.

- *Número de neutrones emitidos.*
 Los núcleos que se crean, supongamos la situación más probable, $A=95$ y $A=140$ deben compartir 92 protones. Supongamos que lo hacen en proporción a sus masas, entonces los núcleos formados serían: ${}_{37}^{95}\text{Rb}_{58}$ y ${}_{55}^{140}\text{Cs}_{85}$. Pero el número de neutrones del rubidio estable es 42 y en el caso del cesio es 58, hay por tanto un exceso de neutrones que son emitidos en el instante de la fisión se les llama neutrones “prompt”. El número de estos neutrones emitidos dependerá de los núcleos que se creen en la fisión pero independientemente del núcleo original presenta una distribución gaussiana.
- *Emisión de neutrones retardados.*
 Se les llama retardados porque se emiten unos segundos después de la fisión debido a la desintegración β de uno de los núcleos que se producen en la fisión. La figura 4 muestra un caso típico.

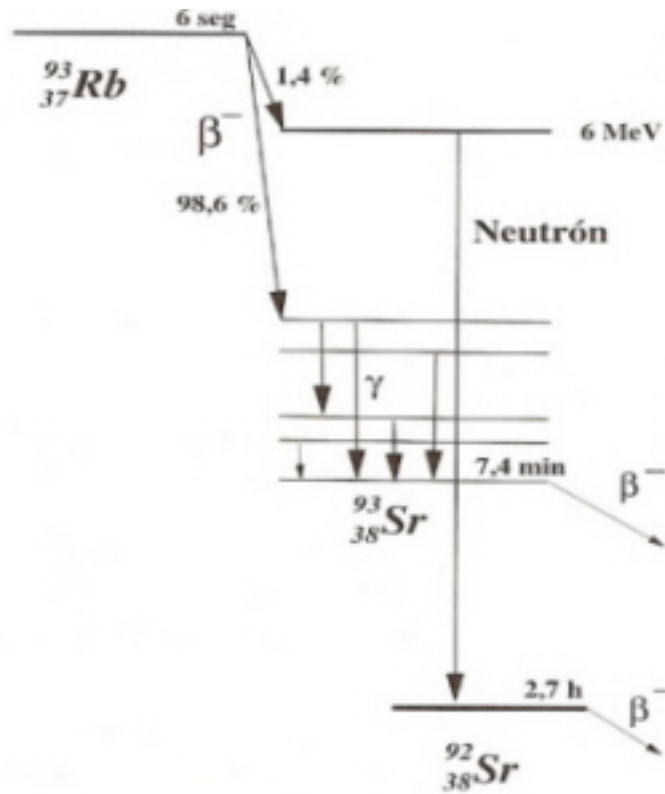
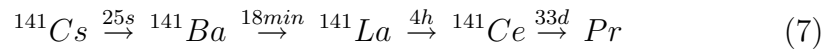
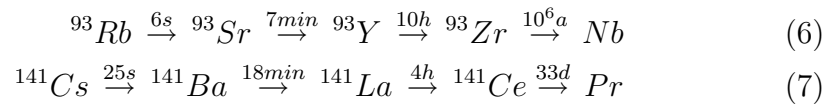


Figura 4: Esquema de la desintegración del $^{96}\text{Rb} \rightarrow ^{93}\text{Sr}$

■ *Cadenas radiactivas.*

Aparecen cadenas radiactivas que son debidas al elevado número medio de neutrones con los que se producen los núcleos resultantes de la fisión. Uno de los graves problemas prácticos de estas cadenas es que tienen miles o millones de años de semiperiodo. Unos ejemplos son:



Estos elementos de vida media larga conllevan problemas de almacenamiento, seguridad, transporte, etc.

■ *Sección eficaz de la fisión.*

La figura 5 muestra sección eficaz del ^{235}U y del ^{238}U . Observamos que

para el ^{235}U en la región térmica hay una dependencia de la sección eficaz en la forma $1/v$. También podemos observar numerosas resonancias en la región entre 1-100 eV. Es importante destacar que la sección eficaz en la zona térmica es varios órdenes de magnitud mayor que para neutrones rápidos. Por tanto, si queremos usar los neutrones rápidos emitidos en la fisión para producir nuevas fisiones deberán de ser primero frenados hasta el rango térmico. Para el ^{238}U es imposible la fisión en el rango térmico, solo puede ocurrir para neutrones rápidos.

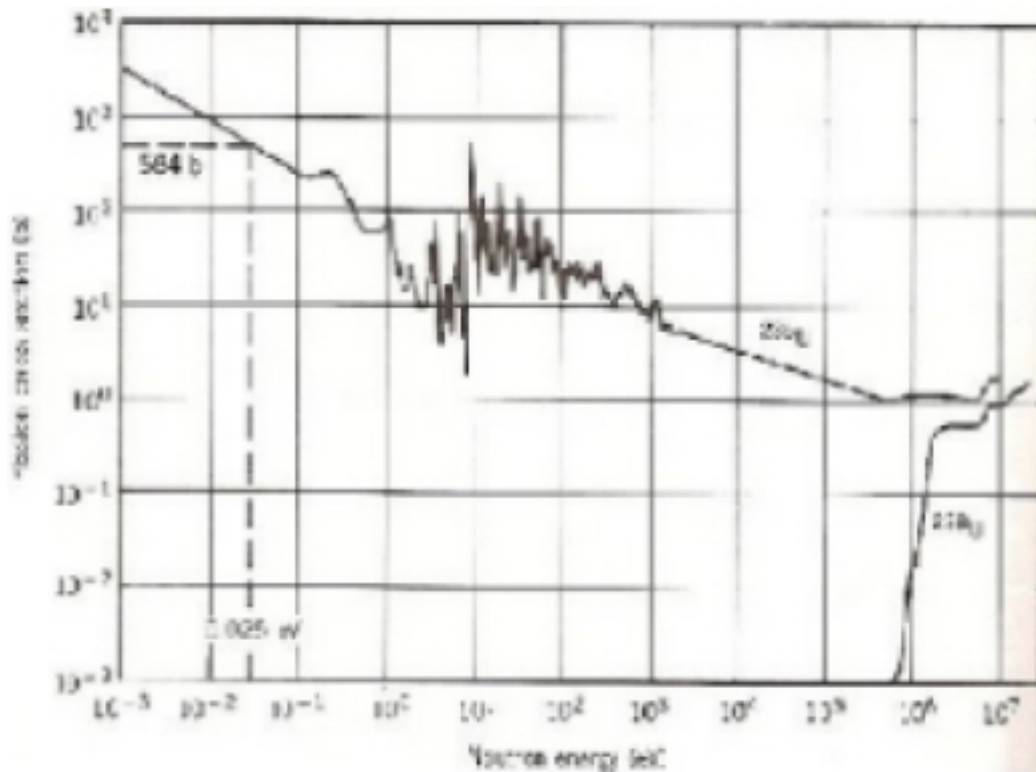


Figura 5: Sección eficaz para la fisión del ^{235}U y ^{238}U en función de la energía del neutrón incidente.

2.4. Reacciones de fisión controlada.

Consideremos una cantidad grande de uranio, que de momento asumiremos tiene la composición normal (0,72 % ^{235}U , 99,28 % ^{238}U). Un proceso

aislado de fisión producirá, en promedio, 2.5 neutrones. Cada uno de estos neutrones de segunda generación será capaz de producir otra fisión que seguirá produciendo neutrones y así sucesivamente. Cada una de estas reacciones desprende aproximadamente 250MeV.

Definiremos el factor de reproducción de neutrones k_∞ , este factor da el número de neutrones térmicos pasan de una reacción a la otra. Para que una reacción en cadena tenga continuidad es necesario que $k_\infty \geq 1$. Aunque que tenemos una media de 2.5 neutrones emitidos por fisión, son neutrones rápidos, para los que sabemos que la sección eficaz es pequeña. Es por tanto ventajoso moderar la velocidad de estos electrones hasta llegar a la velocidad térmica. En este proceso de frenado los 2.5 neutrones emitidos pueden llegar a ser menos que uno.

La mejor forma de frenar los neutrones con conexiones elásticas con núcleos ligeros, a los cuales los neutrones transfieren mucha energía. La elección más popular como moderador es carbón en forma de bloques de grafito. Una estructura de bloques de uranio alternado con bloques de grafito es lo que se llama *pila*⁴. Esta pila tendrá tres estados posibles:

$$k_\infty = 1, \textit{critica} \longrightarrow \textit{reaccion en cadena} \quad (8)$$

$$k_\infty < 1, \textit{subcritica} \longrightarrow \textit{se apaga la reaccion} \quad (9)$$

$$k_\infty > 1, \textit{supercritica} \longrightarrow \textit{explosion} \quad (10)$$

Para calcular el valor del factor de reproducción usamos la **fórmula de los cuatro factores**:

$$k_\infty = \eta \epsilon f p \quad (11)$$

El significado de los factores es el siguiente:

- η -Factor eta- Representa el número de neutrones producidos por fisión, por cada neutrón térmico absorbido por el combustible. Si partimos de N neutrones, quedarán η N neutrones aptos para causar la fisión. Se estima por la fórmula:

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a} \quad (12)$$

⁴Como ya hemos dicho la primera pila nuclear fue desarrollada por Fermi en una pista de squash!

donde ν es el número de neutrones por fisión, σ_f y σ_a son las secciones eficaces de fisión y absorción respectivamente. Para el ^{235}U al 3% se llega a $\eta = 1,84$.

- ϵ -Factor de fisión rápida- Da la ganancia en neutrones debidos a la fisión del ^{238}U ($\epsilon = 1,03$), producida por los neutrones “prompt”.
- p -Probabilidad de escape a la resonancia- Da el número de neutrones que son absorbidos por resonancias del ^{238}U al producirse el frenado, mientras pasan por la regione de 10-100 eV. Como podemos observar en la figura6 la sección eficaz de absorción de esas resonancias es muy grande y si dejamos que esos neutrones entren en contacto con los núcleos de ^{238}U perderemos todos los neutrones. Para evitar esto se colocan intercalados con los bloques de uranio bloques del moderador en donde los electrones alcanzan la energía térmica antes de volver a entrar en contacto con el uranio, la distancia típica en el gráfito es de 19 cm. En este caso $p \cong 0,9$.

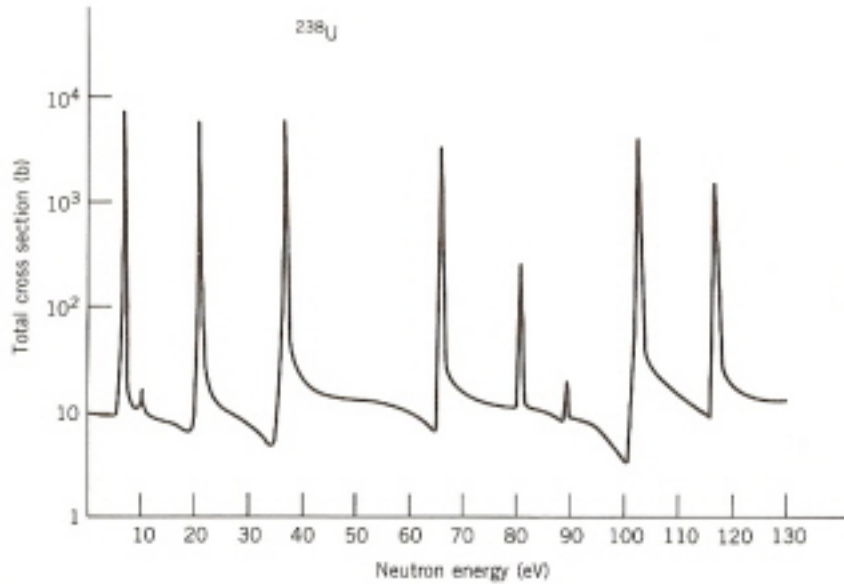


Figura 6: Región de resonancia en la captura de ^{238}U .

- f-Factor de utilización térmica- es el factor que corrige las pérdidas debidas a la captura de neutrones térmicos por parte del moderador, aunque la sección eficaz de captura es pequeña hay mucha cantidad de moderador lo que conduce a valores típicos de $f \cong 0,9$

De esta forma el factor de reproducción de neutrones sería $k_\infty = 1,11$ Pero esto sería sin tener en cuenta las pérdidas de neutrones en la superficie de los trozos de uranio, habría que considerar esta pérdida tanto para los neutrones rápidos y los térmicos. Si llamamos l_f y l_t a las fracciones que de neutrones perdidos para cada uno la fórmula completa para el factor de reproducción será:

$$k = \eta \epsilon f p (1 - l_f) (1 - l_t) \quad (13)$$

Cuanto más grande sea la pila menor será la superficie en relación al volumen y por tanto menor será la pérdida. Si l_f y l_t son pequeños, entonces $k_\infty - k \approx k(l_f + l_t)$. Supondremos que la pérdida total decrece conforme el área de la superficie aumenta. Además la pérdida aumentará con la distancia que el neutrón es capaz de recorrer antes de la absorción, que es lo que llamamos *longitud de migración* M . Esta longitud de migración incluye dos contribuciones: la longitud de difusión L_d para neutrones térmicos, que es la distancia que un neutrón térmico puede recorrer en promedio antes de ser absorbido, y la distancia de frenado L_s en la que los neutrones rápidos se frenan hasta la energía térmica:

$$M = (L_d^2 + L_s^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Si la pila tiene una dimensión R (radio, si es una esfera, o longitud del lado si es un cubo), entonces es razonable suponer que $(k_\infty - k) \propto R^{-2}$ y como también depende de M si no hay más parámetros involucrados debemos esperar que:

$$k_\infty - k \propto \frac{M^2}{R^2} \quad (15)$$

Tendremos un tamaño crítico si $k = 1$.

$$R_c \propto \frac{M}{\sqrt{k_\infty - 1}} \quad (16)$$

Si estamos en una pila esférica de uranio-grafito, en donde $l_d = 50,8cm$ y $l_s = 18,7cm$ y $k_\infty = 1,1$, entonces:

$$R_c = \frac{\pi M}{\sqrt{k_\infty - 1}} \quad R_c = 5m. \quad (17)$$

Estudiemos a continuación las constantes de tiempo que se dan en la multiplicación de neutrones. Los neutrones están caracterizados por una constante de tiempo τ , que incluye el tiempo necesario de frenado (alrededor de $10^{-6}s$) y el tiempo de difusión antes de la absorción (alrededor de $10^{-3}s$). Sea k el factor de reproducción y si hay N neutrones en un tiempo t , habrán en promedio kN neutrones en un tiempo $t + \tau$, de modo que:

$$N(t) = N_0 e^{(k-1)t/\tau} \quad (18)$$

Si el reactor es subcrítico el número de neutrones decae exponencialmente, si es crítico entonces $N = cte.$, si es supercrítico el número de neutrones crece exponencialmente. Los reactores operan en modo subcrítico, haciendo uso de los neutrones retardados para alcanzar el nivel crítico y empleando barras de control de materiales como el cadmio, que tienen gran probabilidad de capturar neutrones, logran controlar el número de neutrones en la pila.

2.5. Reactores de fisión.

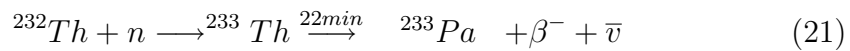
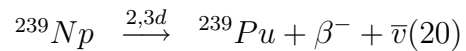
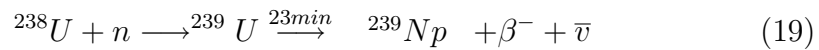
Todos los reactores consisten en los mismos elementos esenciales: el *combustible*, o material fisionable; un *moderador* para termalizar los neutrones (puede no existir en los reactores de neutrones rápidos); un *reflector* que rodea al núcleo (conjunto de combustible y moderador) para reducir la pérdida de electrones y el tamaño crítico del reactor; *blindaje* para evitar que los neutrones y rayos γ causen daños biológicos al personal; *refrigerante* para enfriar el núcleo; *sistemas de emergencia* y un *sistema de control*.

- **Tipos de reactor.** Comencemos clasificándolos según el uso que se pretende hacer de ellos, tenemos así tres tipos: Generación de energía, investigación y conversión.

- Generadores de energía son dispositivos para extraer la energía cinética de los fragmentos en forma de calor y transformandola en energía eléctrica, en la mayor parte de los casos haciendo hervir agua y llevando el vapor hasta las turbinas. Las consideraciones de diseño de los reactores están influidas por los factores termodinámicos de eficiencia de los dispositivos de calor tanto como por los factores de ingeniería nuclear. De hecho el ensamblaje del combustible supone una fracción pequeña de los costes del reactor, la mayor parte de los gastos estan asociados al blindaje, el aislamiento y el equipo de generación eléctrico.

Es por tanto más económico fabricar reactores grandes que varios reactores pequeños.

- Reactores de investigación en general se utilizan para producir neutrones para la investigación en áreas como la física del estado sólido o la propia física nuclear. Estos reactores suelen trabajar a bajos niveles de energía (1 - 10MW).
- Convertidores son reactores diseñados para convertir materiales no fisionables en otros que sí lo son bombardeandolos con neutrones térmicos. Las conversiones que se suelen dar son: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ y $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$. En ambos casos la conversión implica la captura de un electrón seguida de dos desintegraciones β :



Los isótopos como el ^{238}U y ^{232}Th que pueden transformarse en material fisible con neutrones térmicos son llamados isótopos *fértiles*. En principio es posible diseñar reactores en los que el valor de η sea como mínimo 2. Si uno de los neutrones va a mantener la reacción en cadena y el otro va al material fértil, entonces tomando un $\eta \geq 2$ el reactor produce más material fisible que el que consume y entonces diremos que es un productor.

- **Energía de los neutrones.** Es posible diseñar reactores que trabajen con neutrones térmicos, intermedios o rápidos. Anteriormente ya hemos tratado en profundidad lo relacionado con los neutrones lentos, respecto de los neutrones con energía intermedia (eV a keV) la ventaja que tienen es que requieren menos volumen que un reactor térmico, esos reactores fueron originalmente desarrollados para la propulsión en submarinos. Los reactores rápidos tienen la particularidad de que no necesitan ningún moderador, pero debido a que los neutrones rápidos tienen muy poca sección eficaz se necesita mucho más combustible que en un reactor térmico para proporcionar el mismo nivel de energía. Aunque su núcleo sea más pequeño porque no necesita moderador.
- **Tipo de combustible.** Los combustibles más usados son el uranio natural (0,72 %²³⁵U), el uranio enriquecido ($\geq 0,72$ %²³⁵U), ²³⁹Pu y ²³³U. Estos dos últimos combustibles se obtienen químicamente, con convertidores o productores. El uranio enriquecido, que es el combustible más usado para reactores generadores de energía, se produce en grandes cantidades usando procesos que explotan la pequeña diferencia de masa entre el ²³⁵U y el ²³⁸U. Uno de estos procesos es la *difusión gaseosa*; en la que se hace pasar UF₆ gas a través de una barrera porosa. El coeficiente de difusión de un gas es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su masa y entonces el isótopo más ligero fluirá más rápido. El enriquecimiento que se obtiene al atravesar la barrera es de un 0,4 % relativo, para poder obtener uranio enriquecido hay que realizar el proceso miles de veces.
- **Moderador.** Las características del moderador ideal son:

 1. Ser barato y abundante.
 2. Ser químicamente estable.
 3. Tener masa cercana a uno. (Para absorber la energía máxima al colisionar con los neutrones)
 4. Ser líquido o sólido. (Densidad alta)
 5. Tener sección eficaz de captura neutrónica baja.

El carbon en forma de grafito satisface las condiciones 1, 1, 4 y 5, y se puede compensar el que la pérdida de energía por choque sea

relativamente pequeña aumentando la cantidad de moderador. El agua normal satisface 1, 2, 3 y 4 pero los protones del agua tienen una gran sección eficaz de absorber a los neutrones ($n + p \rightarrow d + \gamma$). El agua pesada (D_2O) tiene una sección eficaz pequeña para la captura electrónica, pero cuando tiene lugar la captura se produce tritio, que es radioactivo y muy peligroso. Los reactores moderados con agua pesada pueden usar uranio natural como combustible, los de agua común sin embargo necesitan uranio enriquecido, porque absorben más neutrones.

- **Ensamblaje.** Normalmente decimos que un reactor es *heterogéneo* cuando el moderador y el combustible están separados en bloques y que es *homogéneo* cuando se encuentran mezclados. Los reactores homogéneos son más sencillos de analizar matemáticamente que los heterogéneos, donde calcular el factor de utilización térmico y la probabilidad de escape de la resonancia es particularmente complicado.
- **Refrigerante.** El refrigerante es un elemento fundamental del reactor sin el cual el calor generado podría fundir el núcleo. En el diseño de reactores generadores de energía es de especial importancia la capacidad del refrigerante de transferir el calor eficientemente. Los materiales refrigerantes pueden ser gases (aire, CO_2 , helio) agua o otros líquidos, o incluso metales líquidos, que tienen gran capacidad calorífica. Debido a que el vapor tiene poca capacidad calorífica cuando usamos agua como refrigerante debemos de mantenerla a altas presiones (100 atmósferas) para que se mantenga líquida a altas temperaturas, estos son los llamados **reactores de agua a presión**. Para los reactores rápidos de producción se usa el sodio líquido como refrigerante, aunque tiene las desventajas de ser altamente corrosivo y de que se vuelve radioactivo debido a su gran sección eficaz de captura electrónica.

Dentro de los reactores generadores de energía los tipos básicos en la actualidad son:

- **LWR-Light Water Reactors (Reactores de Agua Ligera):** Utilizan como refrigerante y moderador el agua. Como combustible uranio enriquecido. Los más utilizados son los BWR (Boiling Water Reactor ó Reactores de Agua en Ebullición) y los PWR (Pressure Water Reactor ó Reactores de Agua a Presión), estos últimos considerados en la actualidad como el estándar. (345 en funcionamiento en el 2001)

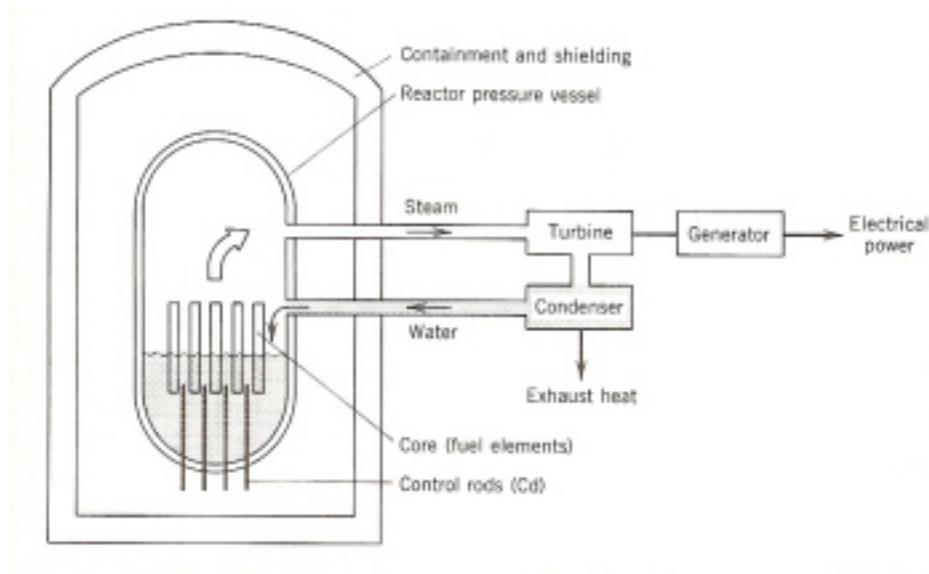


Figura 7: Esquema del reactor de agua en ebullición.

- **CANDU**- Canada Deuterium Uranium (Canadá Deuterio Uranio)?: Utilizan como moderador y refrigerante agua pesada. Como Combustible utilizan uranio natural. (34 en funcionamiento en el 2001)
- **FBR**-Fast Breeder Reactors (Reactores Rápidos Realimentados): Utilizan neutrones rápidos en lugar de térmicos para la consecución de la fisión. Como combustible utiliza plutonio y como refrigerante sodio líquido. Este reactor no necesita moderador. (4 en funcionamiento en el 2001)
- **HTGR**- High Temperature Gas-cooled Reactor (Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas): Usa una mezcla de torio y uranio como combustible. Como refrigerante utiliza helio y como moderador grafito. (34 en funcionamiento en el 2001)
- **RBMK**- Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny (Reactor de Canales de Alta Potencia): Su principal función es la producción de plutonio, y como subproducto genera electricidad. Utiliza grafito como moderador y agua como refrigerante, usa uranio enriquecido como combustible y no puede recargarse en marcha. El reactor de Chernóbil era de este tipo.(14 en funcionamiento en el 2001)

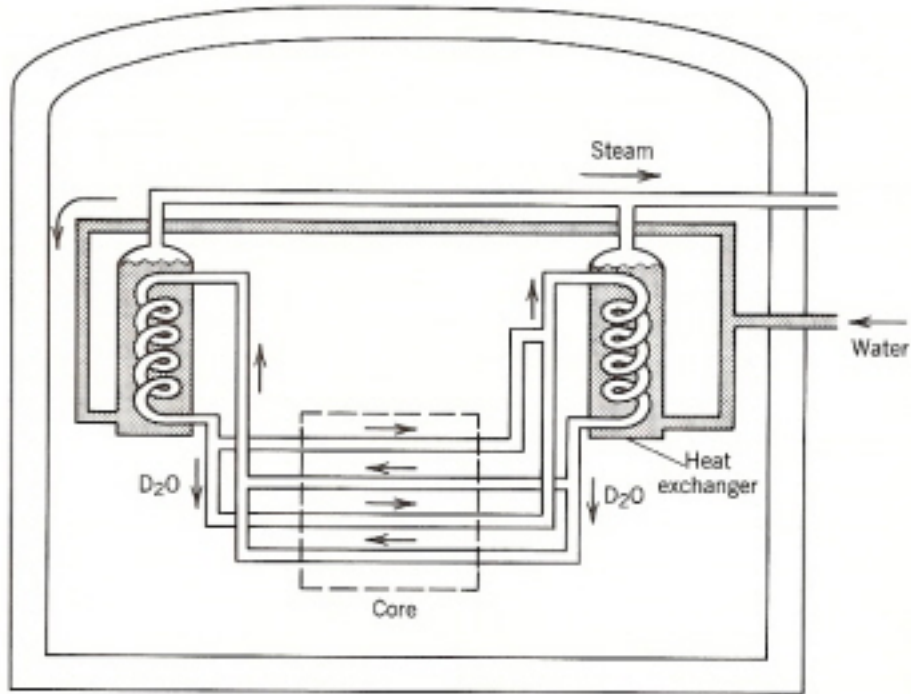


Figura 8: Esquema del reactor CANDU.

- **ADS-** Accelerator Driven System (Sistema Asistido por Acelerador): Utiliza una masa subcrítica de torio, en la que se produce la fisión solo por la introducción, mediante aceleradores de partículas, de neutrones en el reactor. Se encuentran en fase de experimentación, y una de sus funciones fundamentales será la eliminación de los residuos nucleares producidos en otros reactores de fisión.

2.6. Armas de fisión.

Si se permite que el aumento exponencial de energía que ocurre al ensamblar una cantidad supercrítica de ^{235}U o ^{239}Pu continúe sin control llegaremos rápidamente a una situación altamente inestable. La energía desarrollada por el material fisionable debe ser disipada, y en este proceso a menudo el combustible de la fisión se despedaza, volviendo por tanto al estado subcrítico. En el núcleo de un reactor el ^{235}U no está lo suficientemente enriquecido ni

concentrado para crear una explosión, incluso si lo hacemos supercrítico. Para fabricar un explosivo nuclear es necesario emplazar componentes subcríticos en un montaje supercrítico, y hacerlo tan rápido que la energía liberada tenga los efectos explosivos deseados antes de que la inercia de la masa crítica se pierda y el combustible se desmenuce volviendo a ser subcrítico.

Dos diseños básicos se emplean en la construcción de explosivos basados en la fisión. El primero es **el tipo arma** en este caso una masa pura de ^{235}U se corta con forma esférica con un agujero cilíndrico en su centro. El cilindro de material se coloca rápidamente en el centro de la esfera y el montaje se vuelve supercrítico. La bomba que se lanzó sobre Hiroshima⁹ que de este tipo. La energía liberada fue de unos 10^{14}J o 20 kilotonnes de TNT.



Figura 9: Bomba tipo Little Boy, lanzada sobre Hiroshima.

El segundo diseño es el **tipo implosión**. Aquí una esfera sólida de masa subcrítica está rodeada por una cubierta esférica de explosivos convencionales. Cuando estos explosivos son detonados una onda de choque esférica comprime el material fisionable a un estado supercrítico. El primer explosivo nuclear probado cerca de Alamogordo y la bomba de Nagasaki¹⁰ eran de este tipo.

Aunque muchos de los detalles de la construcción de explosivos de fisión son secretos, basándonos en las dimensiones físicas conocidas podemos estimar que el material fisible ocupa una esfera de unos 10cm de diámetro y tiene por tanto una masa de unos 10Kg.



Figura 10: Versión de la bomba tipo implosión posterior a la II guerra mundial.

Los efectos de una explosión son de varias categorías: la explosión en sí, el radiación en forma de calor (bola de fuego), la radiación nuclear directa y la radiación nuclear indirecta.

- **Explosión**

La explosión directa de una arma nuclear puede considerarse como un frente de onda esférico que se expande rápidamente transportando un súbito incremento y descenso inmediatamente posterior de la presión de aire. La densidad de energía de esta onda esférica decrece como $1/r^2$, pero incluso a la distancia de un kilómetro de una explosión de 20 kilotones, el incremento en la presión es del orden de una atmósfera, suficiente como para destruir edificios de ladrillos. A dos kilómetros la

presión sólo es de unas 0.25 atmósferas, suficiente como para destruir edificios de madera y para lanzar escombros a unos 150 km/h.

- **Radiación de calor**

La radiación de calor también decrece como $1/r^2$ por ser una onda, pero además también decrece exponencialmente debido a la absorción de la atmósfera. A dos kilómetros de nuestra explosión de 20 kilotones, la onda de calor (que tarda unos dos segundos en llegar después de la explosión) es suficiente como para provocar quemaduras de tercer grado e incendiar materiales inflamables como la madera y la ropa. Un efecto indirecto de la gran cantidad de fuegos producidos por esta radiación es la “tormenta de fuego”, en la que el calor producido por los fuegos crea un viento raso que incrementa la intensidad y propagación de los incendios. (Este efecto también se da en los bombardeos masivos con armas convencionales)

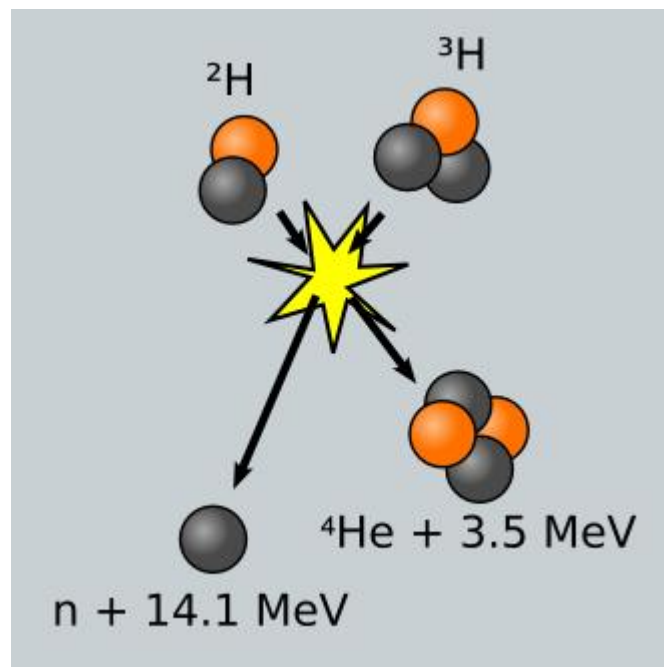
- **Radiación nuclear directa**

Son neutrones y γ que también decrecen como $1/r^2$ y exponencialmente, y la distancia en la que se recibirían dosis letales de radiación es aproximadamente la misma a la que se reciben daños letales por explosión o quemadura. Incluso las dosis más pequeñas recibidas a mayores distancias pueden tener efectos a largo plazo, que incluyen el aumento de casos de cáncer, leucemia y malformaciones.

- **Radiación nuclear indirecta**

Los productos radiactivos de la fisión son vaporizados en la explosión y caen al suelo como una lluvia radiactiva. Parte de este material puede ser transportado, como una nube de vapor, a gran altura en la atmósfera. Esta “nube” de radiactividad puede circular en la parte superior de la atmósfera durante un año o más y gradualmente vuelve a caer al suelo. Algunos productos de poca vida media se desintegran durante ese tiempo, pero otros como el isótopo ^{90}Sr permanecen aún. Este isótopo es especialmente peligroso porque al ser químicamente similar al calcio se concentra en los huesos y produce cáncer oseo.

3. Fusión



3.1. Introducción.

Las reacciones de fusión son aquellas que tiene lugar entre núcleos ligeros que se funden dando lugar a núcleos más pesados. Ya se vio al estudiar la curva de la energía de enlace de los núcleos que éste es un proceso exoenergético. El problema es que para que la reacción tenga lugar, los núcleos deben vencer la barrera culombiana. Las reacciones de fusión son las que generan la energía solar (y del resto de estrellas). Se trata de otra vía para la obtención industrial de energía por procesos nucleares. Es ventajosa respecto de la fisión porque :

- en la Tierra abundan los núcleos ligeros.
- no se producen tantos residuos radiactivos de larga duración.

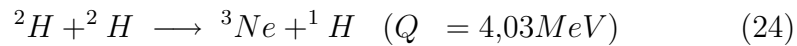
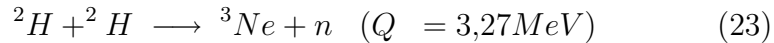
Pero también tiene la desventaja de que para que la reacción tenga lugar debe de disponerse de energía para superar la barrera culombiana. Veamos un ejemplo: Consideremos la fisión de dos núcleos de ^{20}Ne para formar ^{40}Ca . En el proceso tiene una Q^5 de unos 20.7 MeV. Pero antes de que las fuerzas nucleares de los dos ^{20}Ne puedan interactuar debemos colocarlos lo suficientemente cerca como para que sus distribuciones nucleares se solapen. En el momento en que sus superficies se tocan la repulsión culombiana es de 21.2 MeV. Si queremos desarrollar una reacción nuclear entre dos ^{20}Ne debemos darles 21.2 MeV y al final obtendremos 41.9 MeV. La ganancia es por tanto de factor dos. Acelerar un núcleo de ^{20}Ne a 21.2 MeV contra un blanco fijo (otro ^{20}Ne) es sencillo con un acelerador de iones pesados, pero la gran salida de energía quemaría este tipo de dispositivos. Otra alternativa para suministrar la energía necesaria para que se inicie la fusión es calentar un contenedor de gas neón hasta que la energía térmica sea lo suficientemente grande para que haya gran probabilidad de que dos núcleos choquen con 21.2 MeV. Este proceso se denomina fusión termonuclear, para que la energía media por molécula sea un medio de 21.2 MeV necesitamos $kT = 7 \text{ MeV}$. Si la temperatura de una habitación es de $kT = 0.025 \text{ MeV}$, así que este proceso requiere multiplicar la temperatura de una habitación por 3×10^8 . A pesar de estos inconvenientes la energía de fusión es objeto de una gran cantidad de investigación tanto para poder crear centrales de producción eléctrica operativas como para entender los procesos que tiene lugar en el Sol y el resto de las estrellas.

⁵Definimos el valor de reacción como el exceso de energía cinética de los productos.
 $Q = T_{final} - T_{inicial}$

3.2. Procesos básicos de fusión nuclear.

Como ya hemos dicho en la introducción la fusión no es un proceso “natural” en la Tierra, en el sentido de que no se dan las condiciones necesarias para que se supere la barrera culombiana. Pero una vez tenemos esa energía los procesos son sencillos, veamos los procesos más importantes:

1. Reacciones D-D.



estas relaciones se llaman Deuterio-Deuterio y son las más elementales posibles porque ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \longrightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ no es posible dado que el ${}^2\text{He}$ es inestable.

2. Reacción D-T.



esta reacción también sirve como fuente de neutrones rápidos y una variante de ella si disponemos de ${}^3\text{He}$ es:



En las estrellas la reacción principal es $4{}^1\text{H} \longrightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ ($Q = 26,2\text{MeV}$).

3.3. Características de la fusión.

- **Energía liberada.**

El cálculo de la energía liberada en la fusión es más directo que en el caso de la fisión. Es necesario calcular simplemente el valor q de la reacción. Para la mayor parte las aplicaciones de la fusión, desde los reactores de fusión controlada a los procesos solares, las partículas iniciales tienen poca energía cinética comparada con los valores de Q , así que:

$$\frac{1}{2}m_b v_b^2 + \frac{1}{2}m_Y v_Y^2 \cong Q \quad (27)$$

siendo b y Y los productos de la fisión. Si despreciamos de nuevo el movimiento inicial, por conservación del momento:

$$m_b v_b \cong m_Y v_Y \quad (28)$$

y por tanto

$$\frac{1}{2} m_b v_b^2 \cong \frac{Q}{1 + \frac{m_b}{m_Y}} \quad (29)$$

$$\frac{1}{2} m_Y v_Y^2 \cong \frac{Q}{1 + \frac{m_Y}{m_b}} \quad (30)$$

de forma que conociendo las masa de los productos podemos saber la energía que se libera en la fisión.

Una consecuencia de este reparto de la energía es que la partícula más ligera se lleva la mayor parte de la energía:

$$\frac{\frac{1}{2} m_b v_b^2}{\frac{1}{2} m_Y v_Y^2} = \frac{m_Y}{m_b} \quad (31)$$

Por ejemplo en el caso de la reacción Deuterio - Tritio el neutrón producido tiene el 80 % de la energía, en las reacciones Deuterio - Deuterio el neutrón o protón producido tiene el 75 %.

■ **Barrera culombiana.**

Si R_a y R_x son los radios de las partículas reaccionantes entonces la barrera culombiana, cuando las partículas tienen sus superficies en contacto, es:

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_X}{R_a + R_X} \quad (32)$$

El efecto de la barrera culombiana en la fusión es muy similar al efecto de la barrera culombiana en el desintegración α

■ **Sección eficaz.**

Fuera de la región de las resonancias, y como a baja energía la sección eficaz varía como $\sigma \propto k^{-2G}$, se cumple

$$\sigma \propto \frac{1}{v^2} e^{-2G} \quad (33)$$

siendo

$$G = \sqrt{\frac{2m}{Q\hbar^2}} \frac{Z_a Z_X e^2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\pi}{2} - 2\sqrt{\frac{Q}{B}} \right) \quad (34)$$

el factor de Gamow, que contiene el factor de penetración de la barrera coulombiana y recuerda que la fusión debe tener lugar por efecto túnel. Es el mismo factor que en el caso de la desintegración α , pero ahora se cumple $Q = T^*$, energía centro de masas de la reacción $a + X$. Como $Q \leq B$ queda

$$G = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi Z_a Z_X}{\hbar\nu} \quad (35)$$

y aunque falta conocer el elemento de matriz nuclear y los factores de espín, la expresión anterior contiene toda la dependencia con la energía. Se puede escribir

$$\sigma_{aX}(E) \approx \left(\frac{a}{E} \right) e^{-\frac{2\sqrt{2m}}{h\sqrt{E}} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \pi Z_a Z_X} \quad (36)$$

y se suele parametrizar

$$\ln(E\sigma_{aX}) = A' - \frac{B'}{\sqrt{E}} \quad (37)$$

en donde los valores de las constantes A' y B' son bien conocidos experimentalmente. La observación de las curvas de la sección eficaz en función de E permite concluir rápidamente que, en cualquier caso, la reacción D-T es la más favorable.

■ **Velocidad de reacción.**

El ritmo de producción de las reacciones de fusión viene dado por el valor medio del producto $\langle \sigma\nu \rangle$. Por ejemplo, en el caso de la captura neutrónica este producto es constante. Para calcularlo, se supone una distribución de velocidades según Maxwell-Boltzman; el espectro de velocidades $(v, v + dv)$ en equilibrio, e una temperatura T , es $n(v)v^2 dv$ siendo:

$$n(v) \propto e^{-mv^2/2kT} \quad (38)$$

Para la fusión termonuclear se tendrá

$$\langle \sigma v \rangle \propto \int_0^\infty \frac{1}{v} e^{-2G} e^{-mv^2/2kT} v^2 dv = \int_0^\infty e^{-2G} e^{-E/kT} dE \quad (39)$$

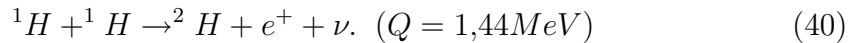
por lo tanto de nuevo se encuentra que la reacción D-t es ventajosa ya que tiene un ritmo mayor que las otras, si se compara dicho ritmo a las energías de los reactores de fusión termonuclear controlada previstos ($T \approx 10^7 - 10^8 K$ o sea $E \approx 1 - 10 keV$).

El ritmo de la reacción D-T a energías de 10keV es de $10^{-16} cm^3/seg$.

3.4. Fusión Solar.

Antes de hablar a cerca de como conseguir la fisión termonuclear de la Tierra, vamos a considerar el Sol, el cual podemos considerar como un potrotipo de reactor termonuclear autosostenido.

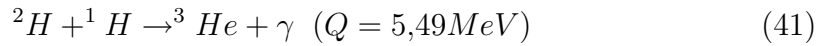
El proceso básico en el proceso del sol (así como en otras estrellas) es la fusión de hidrógeno en helio. El hidrógeno es con diferencia el material más abundante en el universo. Más de un 90 % de los átomos en el universo son de hidrógeno, pero menos del 1 % del restante es helio. Este helio fue formado durante los primeros momentos de la evolución del universo y no como un resultado de un proceso estelar posterior. Todas las reacciones en un ciclo de fusión deben ser de dos cuerpos (dos partículas en el estado inicial) porque las colisiones simultáneas de tres partículas es muy poco probable. El primer paso en el proceso de fusión debe de ser la combinación de dos protones para formar un único sistema estable de dos nucleones:



La ν en el estado final indica que se trata de un proceso de interacción débil, el cual debe ocurrir para que un protón pase a ser un neutrón (no hay energía suficiente es posible crear un meson). La sección eficaz para un proceso interacción débil es muy pequeña; para la formación de deuterio, la sección eficaz calculada es del orden de 10^{-33} b a energías de KeV y 10^{-23} b a energías de MeV. La temperatura del centro del sol es aproximadamente 15×10^6 K, que se corresponde a la energía del protón a unos 1KeV, pero para calcular la velocidad de reacción es necesario encontrar $\langle \sigma v \rangle$ promediada sobre todas las energías. La velocidad de reacción es muy pequeña, y incluso

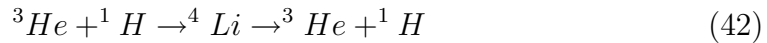
con las altas densidades núcleo del sol la velocidad de reacción estimada es sólo aproximadamente 5×10^{-18} por protón. Lo que mantiene al sol radiando es el enorme número de protones reaccionando, del orden de 10^{56} , por eso la velocidad de reacción total es del orden de 10^{38} . Este paso en el ciclo de la fusión solar se denomina “cuello de botella” porque es el paso más lento y de menos probabilidad.

Después de la formación del deuterón es bastante probable que la siguiente reacción que ocurra sea:

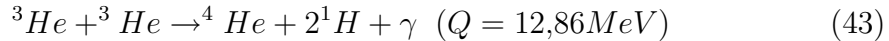


Es muy poco probable observar en este punto reacciones D-D debido al pequeño número de deuterones presente, solo hay un deuterón por cada 10^{18} protones, y por tanto es 10^{18} veces más probable que un deuterón reaccione con un protón que con otro deuterón. Los deuterones por tanto son convertidos en 3He justo después de haber sido creados.

La siguiente reacción sería de los 3He con los protones, pero eso no es posible:



El isótopo 4Li no existe como sistema ligado, y se descompone al momento de formarse. Tampoco es probable que el 3He reaccione con 2H porque la densidad de 2H es muy pequeña y los que hay se convierten muy rápido en 3He . El 3He deberá por tanto desplazarse hasta encontrar otro 3He :



Este proceso completo se conoce como *ciclo protón - protón*. Su reacción equivalente es la conversión de 4 protones en helio:



Para calcular la Q del proceso sólo hay que añadir los electrones que faltan $4{}^1H \rightarrow {}^4He$, y tenemos $Q = 26.7MeV$. La energía convertida en radiación solar en realidad es un poco menor porque los neutrinos no calientan la fotosfera, que es la región del sol donde la energía liberada en las reacciones nucleares se convierte en luz.

Una alternativa para el 3He es encontrar una partícula α :



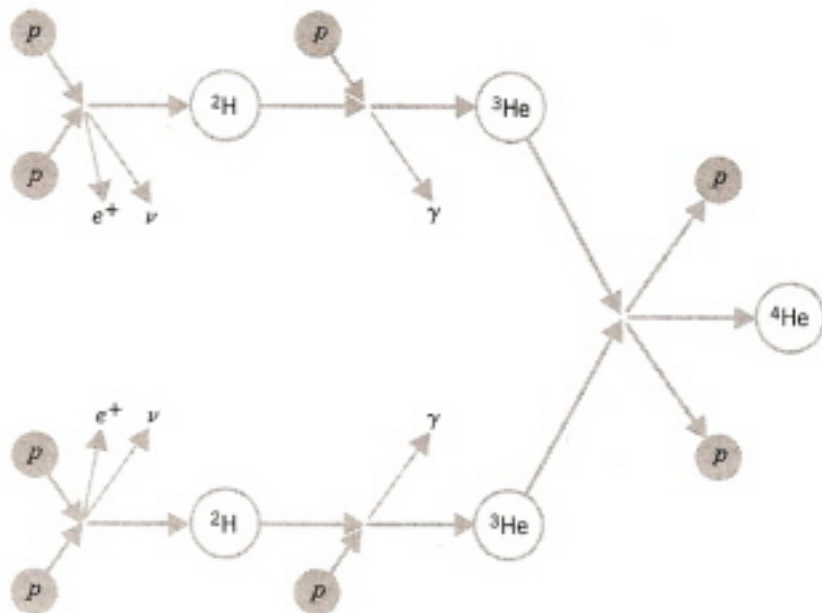


Figura 11: Ciclo protón-protón.

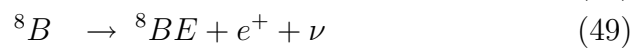
seguido por



y



o por la secuencia:



La reacción equivalente para cualquiera de los procesos propuestos es la misma al igual que el valor de Q . El camino que se escoja dependerá de la composición de la estrella y de su temperatura. Una forma de averiguar que

proceso tiene lugar sería estudiar la distribución de energía de los neutrinos emitidos ya que en cada uno de estos procesos es distinta. los experimentos llevados a cabo hasta ahora con los neutrinos solares no han sido capaces sin embargo de detectar el número esperado de neutrinos provenientes del sol. Además del hidrogeno y el helio hay elementos más pesados en el interior de las estrellas, lo que hace que más series de fusiones puedan ocurrir. Un ade estas series es el *el ciclo CNO o del carbono*:

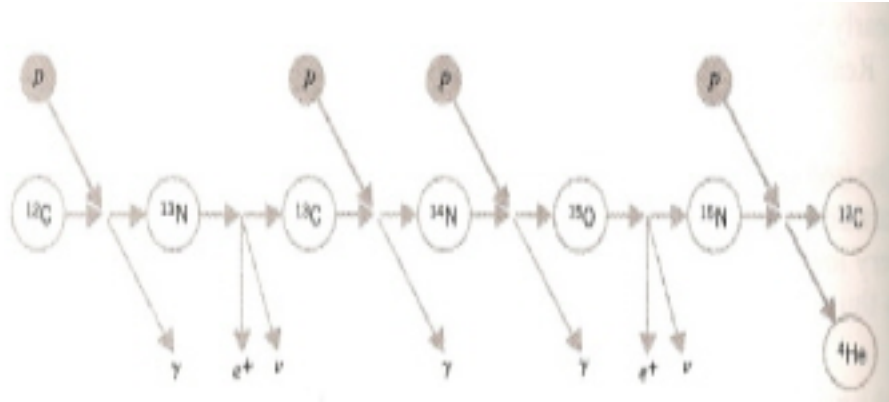
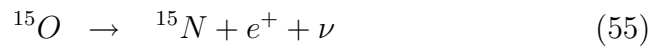
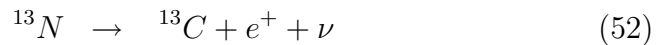


Figura 12: Ciclo del carbono.



En este caso el ^{12}C ni se crea ni se destruye, pero actua como catalizador que ayoda al proceso de fusión. La reacción equivalente es $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu$, exactamente como en el caso del ciclo protón-protón, teniendo también la misma Q. El ciclo del carbono es más rápido que el del protón-protón porque no tiene un “cuello de botella”. Pero la barrera culombiana es mayor para reacciones protón carbono y protón hidrogeno que para el caso protón protón eso hace que necesitemos más energía térmica para el ciclo de carbono y que

a altas temperaturas sea el proceso dominante.

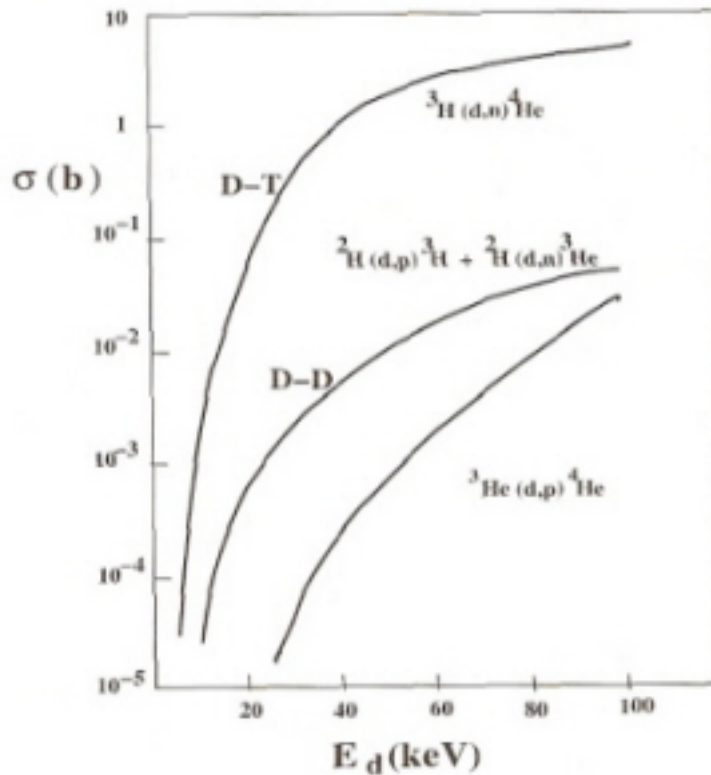


Figura 13: Sección eficaz de fusión para los procesos D-T y D-D en función de la energía del deuterón.

3.5. Reactores de fusión controlada.

La esencia del control de reacciones de fusión y el poder extraer de ellas energía útil es el ser capaces de calentar el combustible termonuclear a temperaturas del orden de $10^8 K$ mientras que mantenemos una densidad alta durante el tiempo suficiente como para que la cantidad de reacciones de fusión sea la suficiente para obtener las energías deseadas. A esas temperaturas los átomos se ionizan y tenemos por tanto que el combustible es una mezcla caliente de nubes de iones positivos y electrones, siendo globalmente

neutra. Esta configuración se llama *plasma*.

Un gran problema es obviamente confinar el plasma, dado que el plasma intercambiará energía con las paredes del recipiente que lo contenga funcionando el recipiente y enfriándose él. En este momento se investigan dos métodos para confinar el combustible termonuclear: *confinamiento magnético* y *confinamiento inercial*.

En el confinamiento magnético el plasma se aísla con un campo magnético especialmente diseñado. Los primeros modelos magnéticos, americanos, conocidos como Stellarator generaban el campo directamente en un reactor toroidal, con el problema de que el plasma se filtraba entre las líneas del campo.

Los ingenieros rusos mejoraron este modelo dando paso al Tokamak en el que un arrollamiento de bobina primario inducía el campo sobre el plasma, aprovechando que es conductor, y utilizándolo de hecho como un arrollamiento secundario. Además la resistencia eléctrica del plasma lo calentaba.

Sin embargo el mayor reactor de este tipo, el JET (toro europeo conjunto) no ha logrado mantener una mezcla a la temperatura (1 millón de grados) y presión necesarias para que se mantuviera la reacción.

Se ha comprometido la creación de un reactor aun mayor, el ITER uniendo el esfuerzo internacional para lograr la fusión. Aun en el caso de lograrlo seguiría siendo un reactor experimental y habría que construir otro prototipo para probar la generación de energía, el llamado proyecto DEMO.

En el confinamiento inercial una pequeña esfera sólida es repentinamente calentada y comprimida al ser golpeada desde varias direcciones con intensos rayos de fotones o partículas.

Los dos proyectos más importantes a nivel mundial son el NIF (National Ignition Facility) en EE.UU. y el LMJ (Laser Mega Joule) en Francia.

El NIF posee 192 láseres de neodimio vidrio de 1.8 MJ, emitiendo en una longitud de onda de 0.35 mm y con una duración de pulso de unos 16 nanosegundos. La producción de energía para aplicación civil es, de todos modos, un objetivo a largo o muy largo plazo para este tipo de instalaciones, que surgen para investigar y simular microexplosiones nucleares, para el uso comercial posiblemente se sustituirían los haces láser por haces de iones, que conseguirían un mayor rendimiento energético.

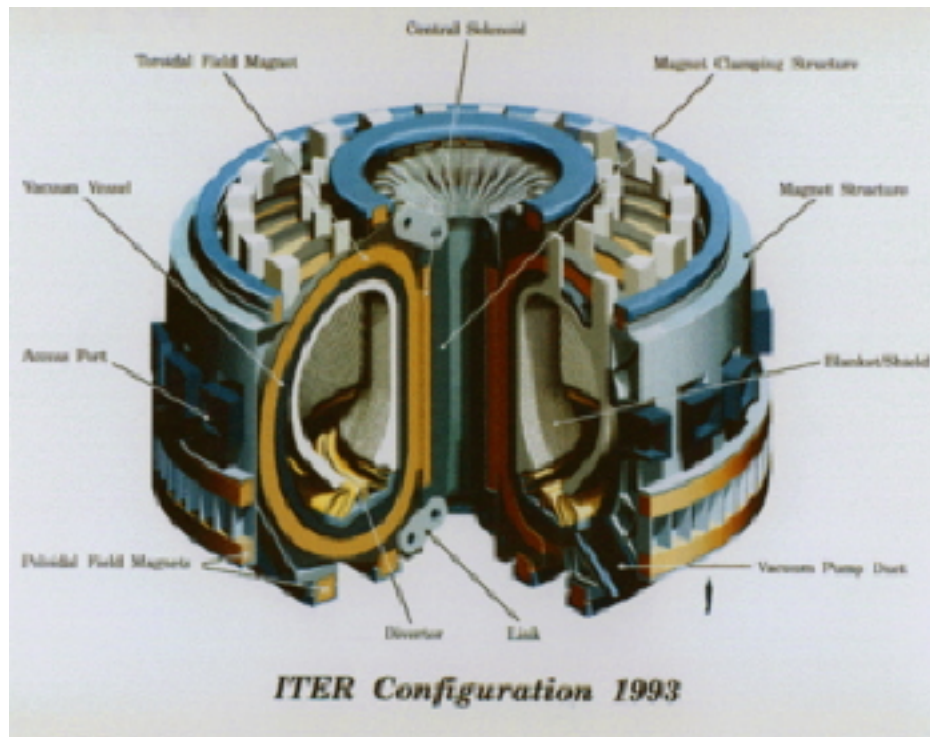


Figura 14: Proyecto de diseño del ITER.

3.6. Armas termonucleares.

Una vez los primeros explosivos termonucleares fueron detonados por parte de los Estados Unidos y la URSS al comienzo de los años 50, los explosivos de fisión en los arsenales de ambas naciones fueron reemplazados por armas termonucleares con una energía de explosión de unos dos o tres órdenes de magnitud mayores que las armas de fisión. Se pasa de las armas del rango del kilotón de energía (Hiroshima y Nagasaki) al megatón de energía. La mayor parte de los detalles de la construcción de armas termonucleares son secretos pero existen datos suficientes como para hacer observaciones generales acerca de su funcionamiento. Como punto de partida toda la discusión acerca de la temperatura de ignición del material fusionable es igualmente válida, y la única fuente rápida y móvil capaz de alcanzar esas temperaturas es una explosión nuclear. Por tanto un arma de fusión incluye un explosivo de fisión como detonador. La radiación de la explosión de fisión es responsable de calentar y comprimir el combustible termonuclear.

El primer explosivo termonuclear usó una mezcla licuada de combustible, lo que requeriría un complicado sistema de refrigeración para conseguir y mantener las bajas temperaturas necesarias para licuar el hidrógeno. Las armas de hoy día usan litio sólido como combustible, a base de isótopos separados. Los efectos destructivos de las armas de fisión son analogos a los que hemos referido para las armas de fisión, solo que aumentando la distancia de destrucción a más de 10 km.

Hoy día se estima que la potencia explosiva de las armas nucleares en conjunto es del orden de 10^{10} toneladas de TNT, lo que implica que si repartiesemos ese “explosivo” entre la población terrestre a cada ser humano le corresponderían dos toneladas de TNT.

Referencias

- [1] Kenneth S. Krane. *Introductory nuclear physics*, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-80553-X.
- [2] Antonio Ferrer Soria. *Física nuclear y de partículas*, Universitat de València, 2003. ISBN 84-370-5543-1.
- [3] David Bodansky. *Nuclear energy; principles, practices, and prospects*, Springer Science+Business Media, Inc. ISBN 0-387-20778-3