

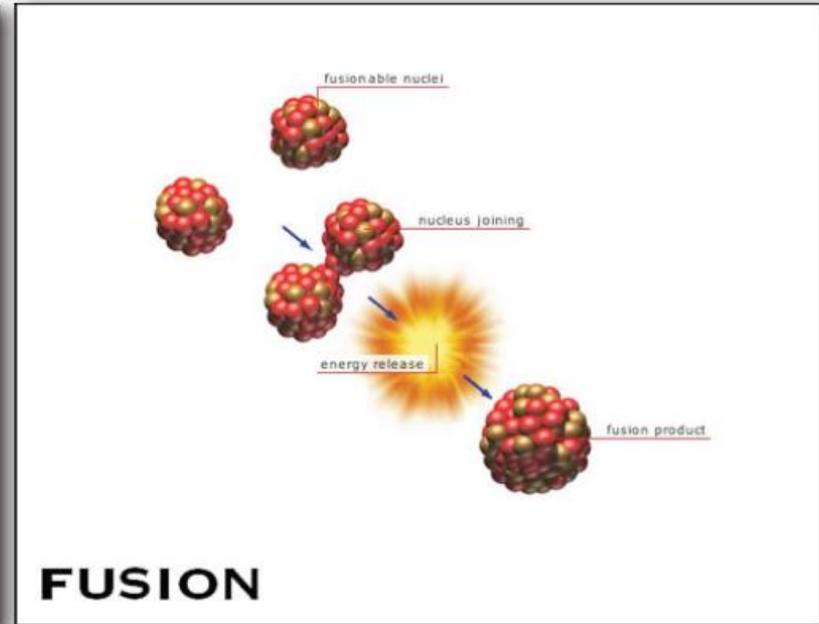
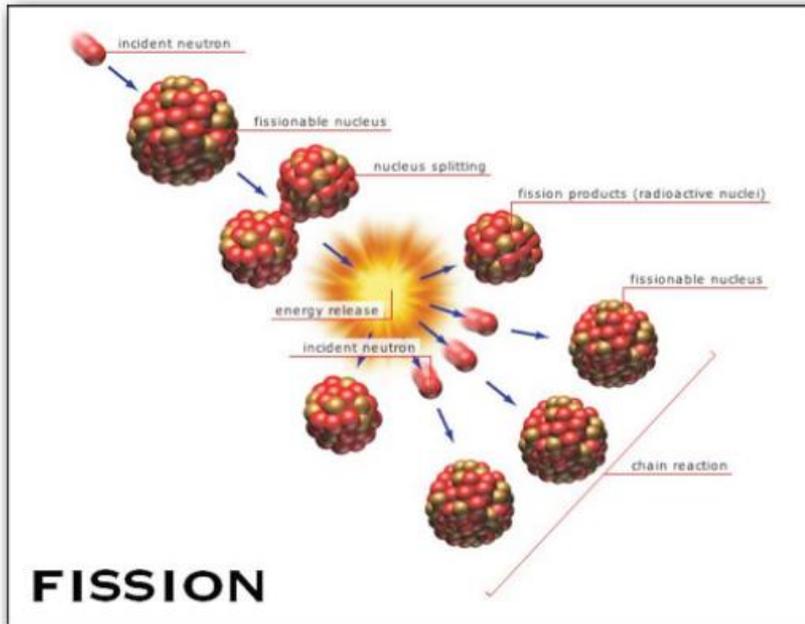
Introdução a Física Nuclear

▶ Prof. Valdir Guimarães

▶ Instituto de Física

Aula 19 – Fissão - Geração de energia

- ❑ Podemos gerar energia por fissão ou fusão
- ❑ Energia gerada por fissão numa reação em cadeia que pode ser controlada ou não.
- ❑ Energia gerada por fusão de dois núcleos leves ocorre no Sol e nas estrelas.
- ❑ Tokamaks são equipamentos que simulam algumas reações que ocorrem no Sol.



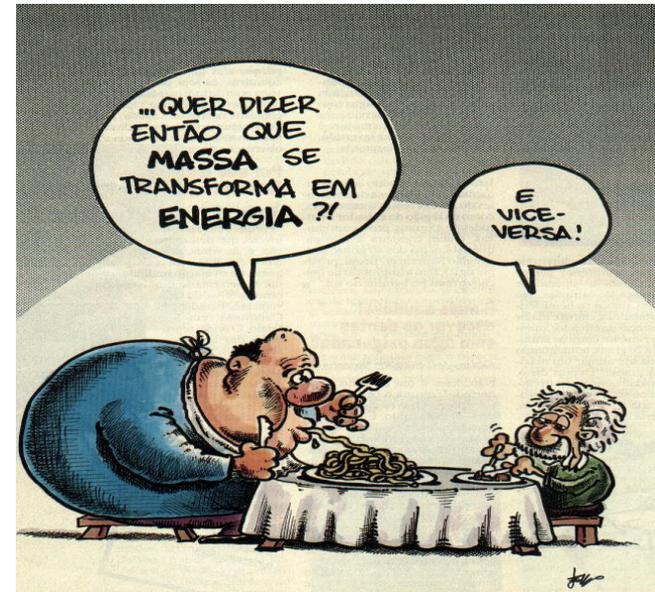
Conversão massa-energia

- ❑ A energia gerada por reações nucleares é devido a diferença de massas
- ❑ A energia é então gerada a partir da conversão Massa=Energia ($E = \Delta m \times c^2$).
- ❑ Na fusão a energia total (massa $\times c^2$) de um núcleo composto é menor que a soma das energias (massa $\times c^2$) individuais dos núcleos que se fundiram.

$$m = \sum m_i - m_A$$

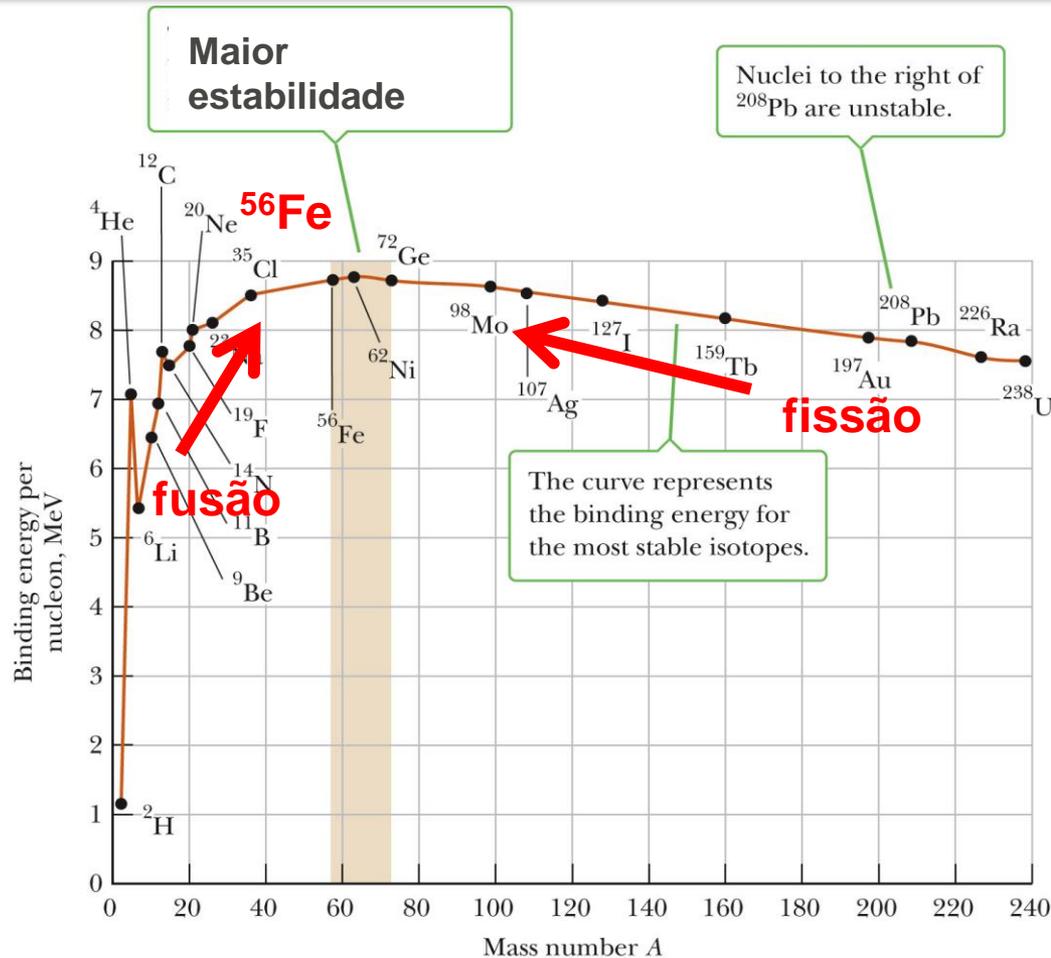
- ❑ Energia de ligação é a energia necessária para separar o núcleo nos seus constituintes.

$$E = \Delta m \times c^2 \quad \text{com} \quad c^2 = 931.5 \text{ MeV/u}$$



Balanço de energia

- ❑ Se um núcleo pesado for dividido por dois, os núcleos resultantes terão uma energia de ligação B/A maior, serão mais estáveis.
- ❑ Se dois núcleos leves se juntarem o núcleo resultante terá B/A maior, será mais estável.



- ❑ Vamos supor que 1 mg de matéria seja totalmente transformada em energia:

$$Q = 1 \times 10^{-6}(kg) \times (3 \times 10^8 m/s)^2 = 9 \times 10^{10} J = 90 GJ$$

- ❑ Vamos supor que essa energia seja gerada por hora:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{energia}}{\text{tempo}} = 9 \times \frac{10^{10} J}{3600s} = 2.5 \text{ Megawatts}$$

- ❑ Se uma casa consome em média 3.3 kWh isso daria para manter a energia de 750 casas por hora.

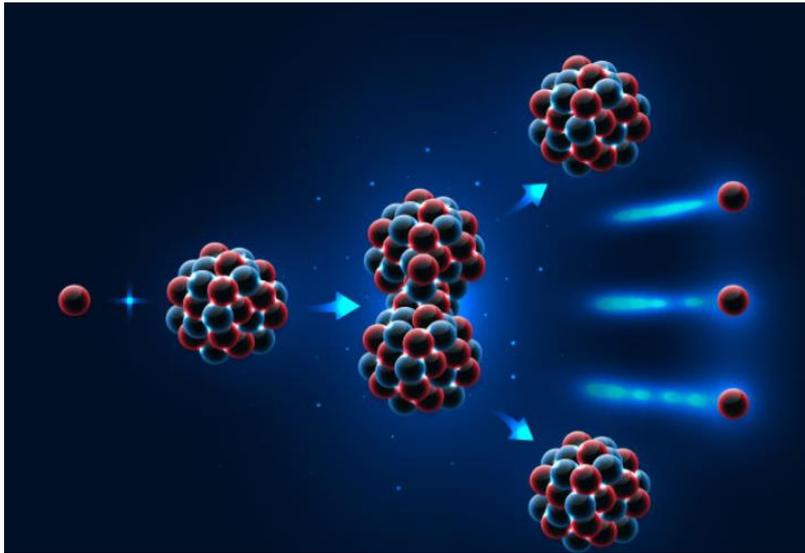
- ❑ 1 g poderia manter 750 casas por 41 dias ou 85 casas por 1 ano.

- ❑ Quantidade de de energia gerada a partir de 1kg de matéria, considerando os diferentes processos, e o tempo que essa energia gerada manteria uma lâmpada de 100 W acesa.

Forma da matéria	Processo	tempo
água	Queda d'agua	5 s
Carvão	Combustão	8 h
^{235}U	Fissão total	3×10^4 anos
deutério	Fusão	3×10^4 anos
Matéria antimatéria	aniquilação	3×10^7 anos

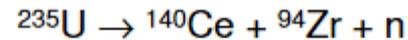
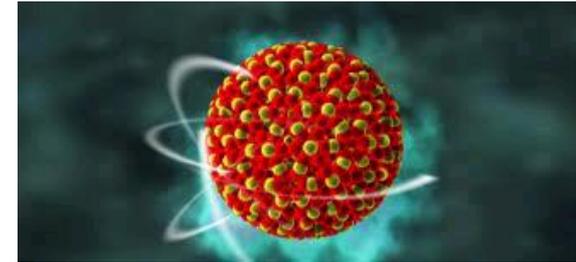
Geração de energia por fissão nuclear

- ❑ Reação em cadeia envolvendo fissão nuclear.
- ❑ Neutrons são produzidos em cada fissão de um elemento pesado , que por sua vez inicia novas reações de fissão.
- ❑ Em média 2.5 neutrons são produzidos na fissão do ^{235}U



Geração de energia por fissão nuclear

Núcleo ^{235}U (Z=92 N=143)



$$\begin{aligned} Q &= -\Delta mc^2 = - [(139,9054 \text{ u} + 93,9063 \text{ u} + 1,008 67 \text{ u}) - 235,0439 \text{ u}] c^2 = \\ &= - [234,82037 \text{ u} - 235,0439 \text{ u}] \\ &= - [-0,223 53 \text{ u}] 931,5 \text{ MeV/u} = 208 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Para onde vai essa energia?

- ❑ São liberados em média 2.5 nêutrons com 2 MeV para cada um (5 MeV)
- ❑ São liberados diretamente raios gamas (8 MeV)
- ❑ Média de energia das partículas (elétrons e núcleos) do decaimento beta dos núcleos residuais (8MeV)
- ❑ Energia liberada nos raios gamas dos decaimentos beta (7 MeV)
- ❑ Energia média dos neutrinos (decaimento beta) (12 MeV)
- ❑ Energia liberada 208 mas como os neutrinos escapam, ficamos com 196 MeV por fissão na forma de energia cinética das diversas partículas.

❑ O urânio tem 235,0439 u.m.a mas apenas uma pequena parte dessa massa (0.223 u.m.a) é convertida em energia na fissão.

❑ Vamos calcular quanto de energia pode ser obtida da fissão de 1 g de ^{235}U .

❑ Número de átomos de Urânio em 1 g

$$n = \frac{m}{\mu} N_A = \frac{1}{235} \times 6.02 \times 10^{23} = 2.56 \times 10^{21}$$

❑ Convertendo a energia gerada em cada fissão em Joules

$$196 \times 10^6 (eV) \times 1.6 \times 10^{-19} \left(\frac{J}{eV} \right) = 3.1 \times 10^{-11} (J)$$

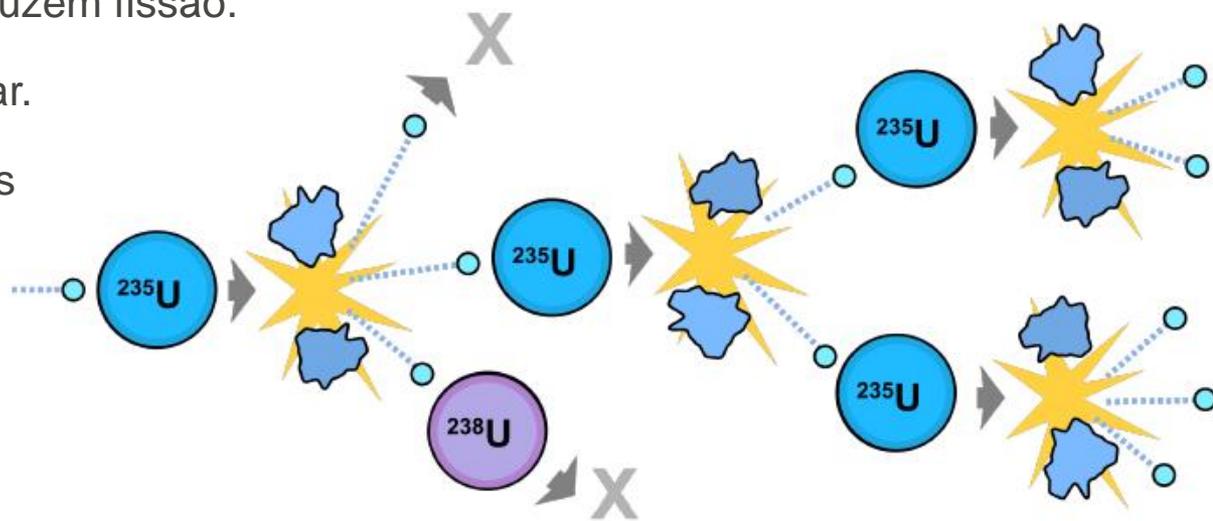
❑ A energia gerada por 1 g é então:

$$2.56 \times 10^{21} \times 3.1 \times 10^{-11} (J) \approx 8.0 \times 10^{10} (J) = 80 \text{ GJ}$$

❑ Para comparação a energia gerada pela combustão de 1 g de carvão é 35 kJ

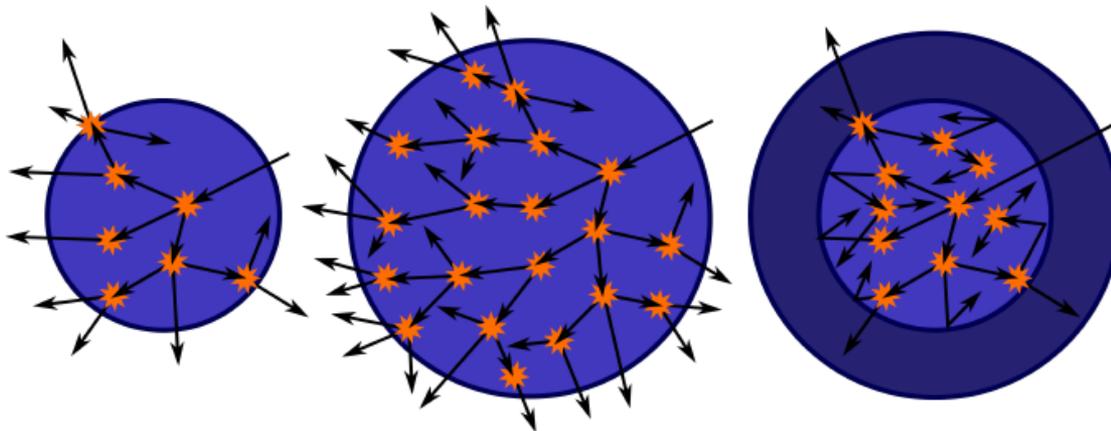
❑ A energia da fissão gera 2.3 milhões de vezes mais energia que o carvão.

- Fissão pode ser interessante como fonte de energia ?
- Construir um reator e usar fissão como fonte de energia não é tão simples assim.
- Temos que levar em conta uma série de fatores.
- A reação em cadeia gera muita energia mas deve ser controlada.
- Cada fissão gera 2.5 nêutrons com uma energia média de 2 MeV cada.
- A seção de choque de fissão depende da energia dos nêutrons incidentes e é pequena para nêutrons de 2 MeV (em torno de 1.3 b para ^{235}U)
- Nem todos nêutrons induzem fissão.
- Neutrons podem escapar.
- Neutrons são absorvidos



❑ Precisamos de uma massa crítica para que a fissão possa desencadear uma reação em cadeia. Isso depende de uma série de fatores:

- 1) da seção de choque de fissão do elemento utilizado como combustível.
- 2) da densidade do material
- 3) da forma desse material
- 4) do enriquecimento do material
- 5) da temperatura do material
- 6) do ambiente em volta do material.



Subcrítico

crítico

subcrítico com refletor

A massa crítica pode ainda alterar dependendo da:

- quantidade de material
 - forma com que ele está presente (vareta, bola, tijolo)
 - temperatura (isso altera energia dos nêutrons)
 - densidade
 - aplicação de moderadores e absorvedores
 - aplicação de refletores de nêutrons (grafite, Berílio, tungstênio)
-
- Massa critica para uma esfera (10 cm raio) de ^{239}Pu totalmente enriquecido é 10 kg
 - Massa critica para o ^{235}U totalmente enriquecido é 52 kg
 - mas se o ^{235}U for enriquecido a apenas 20% é preciso 400 kg.

Combustível nuclear

- ❑ Isótopo físsil: Aquele que pode ser fissionado por ativação neutrônica.
- ❑ Exemplos: ^{235}U -Urânio, ^{239}Pu -Plutônio, ^{232}Th -Tório, ou misturas destes.
- ❑ O combustível típico atualmente é o óxido de urânio ou de plutônio.

- ❑ Natureza: 99,3% de ^{238}U e 0,7% de ^{235}U
- ❑ Enriquecimento do ^{235}U na proporção de 3% a 4% para ser utilizado como combustível em reatores.
- ❑ Enriquecimento na proporção acima de 90% pode ser utilizado para bombas



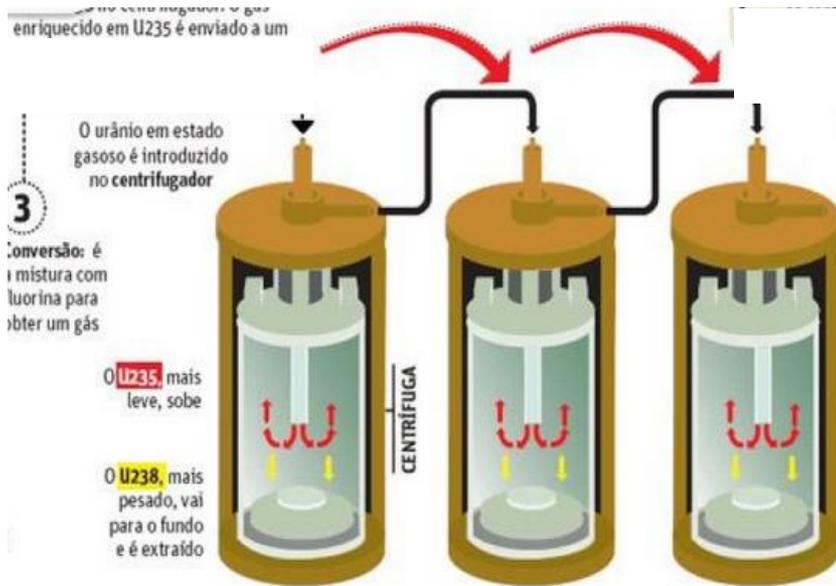
Beneficiamento

- ❑ **Mineração e beneficiamento** – Yellow cake. Depois de retirada da terra, a rocha contendo urânio é triturada; em seguida, ela é submetida a um processo químico que separa o urânio de outros materiais a ele associados na natureza. O resultado desta primeira etapa do ciclo do combustível é o concentrado de urânio, ou *yellowcake*.
- ❑ **Conversão** – o concentrado de urânio é dissolvido e purificado, e então convertido para o estado gasoso, o hexafluoreto de urânio (UF_6), e é somente em forma de gás que ele pode ser enriquecido, passando para a próxima etapa do ciclo do combustível nuclear.



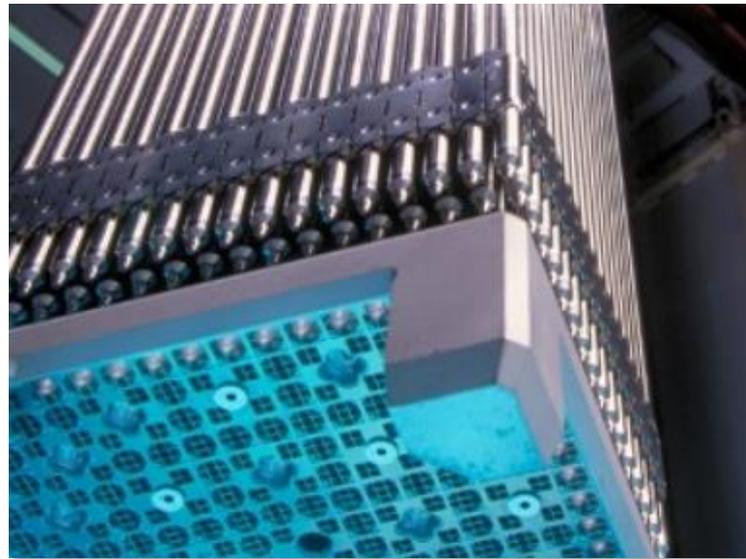
Enriquecimento

- ❑ **Enriquecimento** – é o aumento da concentração do urânio o que torna possível a sua utilização como combustível. Essa concentração passa de 0,7%, como ele se encontra na natureza até 4% (suficiente para que ele gere energia).



Pastilhas

- ❑ **Reconversão** – o gás enriquecido é reconvertido em pó de dióxido de urânio (UO_2).
- ❑ **Fabricação de pastilhas** – é com o urânio enriquecido sob a forma de pó que são fabricadas pastilhas com cerca de um centímetro de diâmetro.
- ❑ **Fabricação do combustível nuclear** – as pequenas pastilhas de urânio enriquecido são colocadas dentro de varetas de uma liga de aço especial – o zircaloy. Em seguida, as varetas são organizadas em feixes, formando uma estrutura firme de até 5 metros de altura - o combustível nuclear.

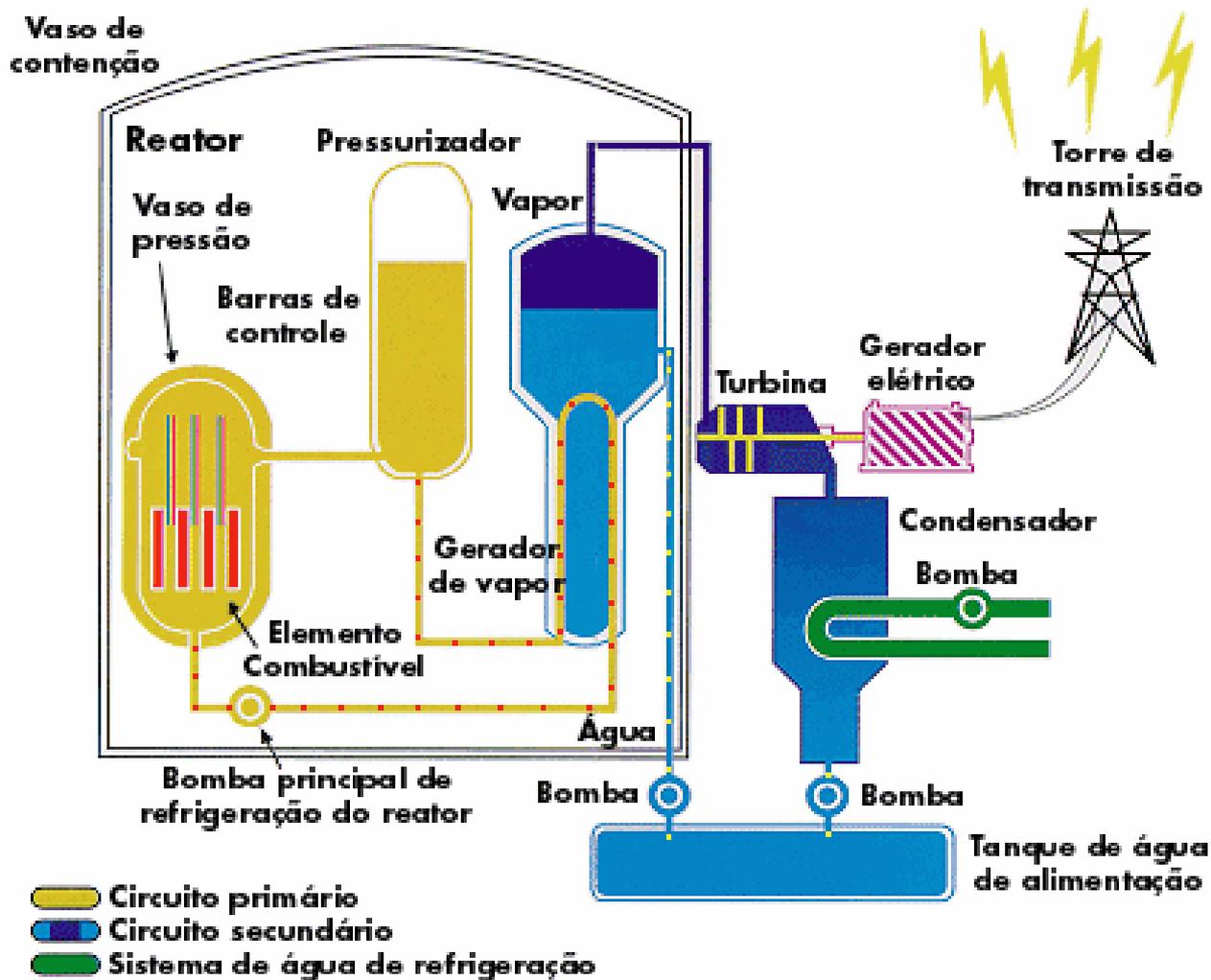


Ciclo

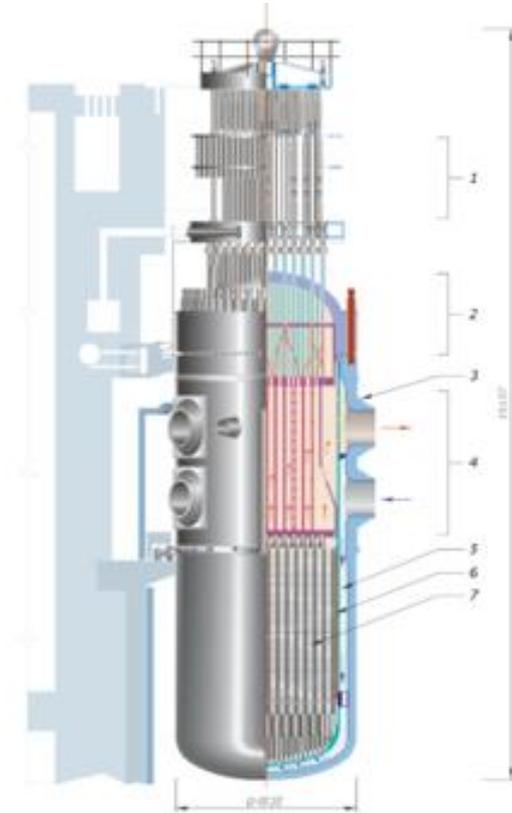
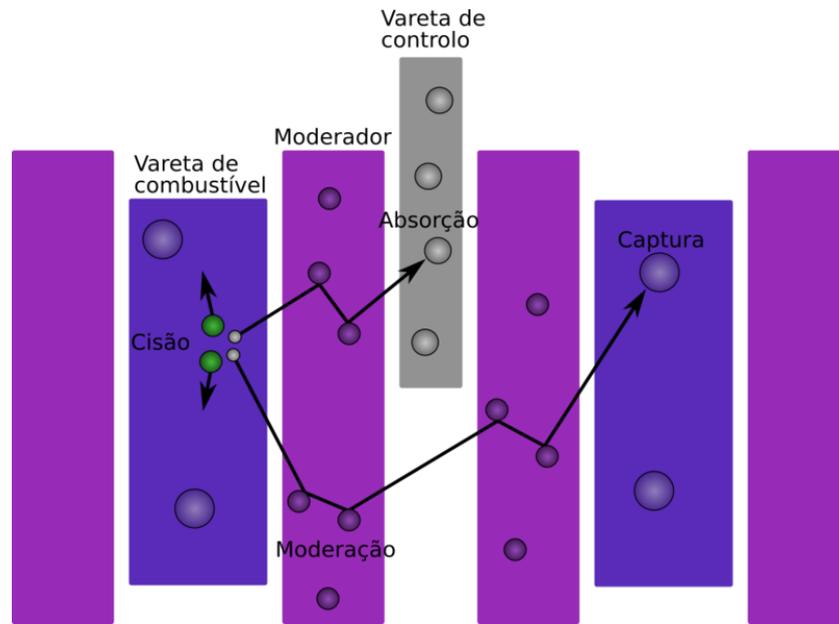


<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear>

Como funciona uma usina nuclear?

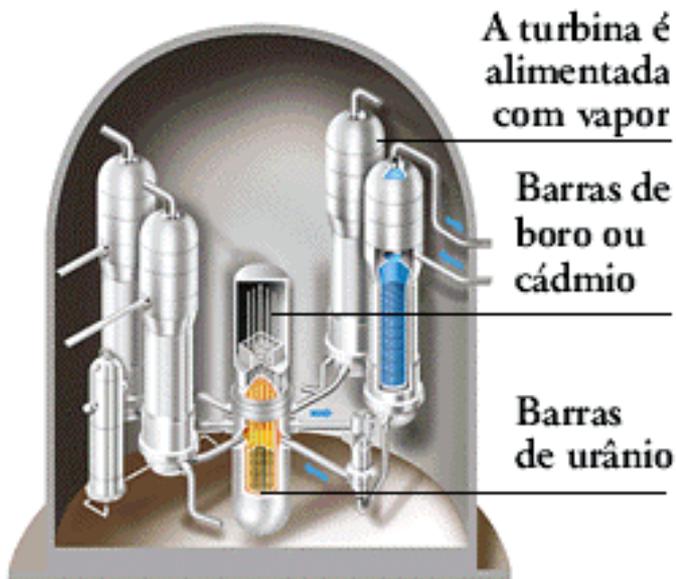


Controle do reator nuclear

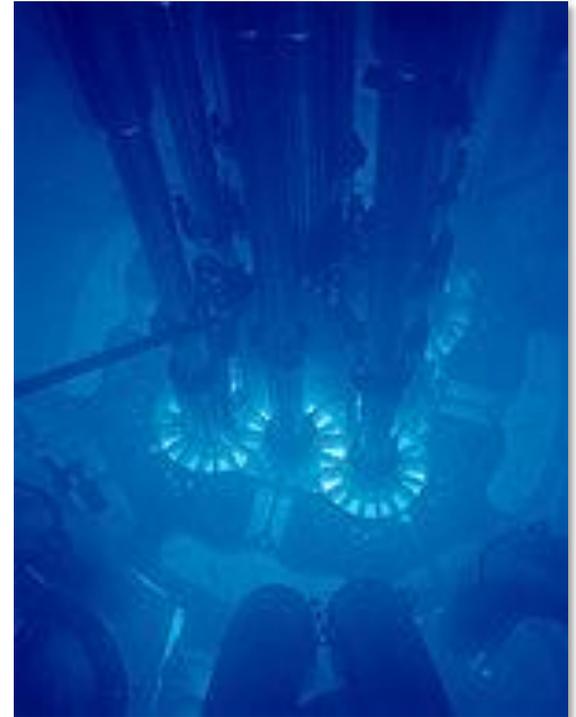


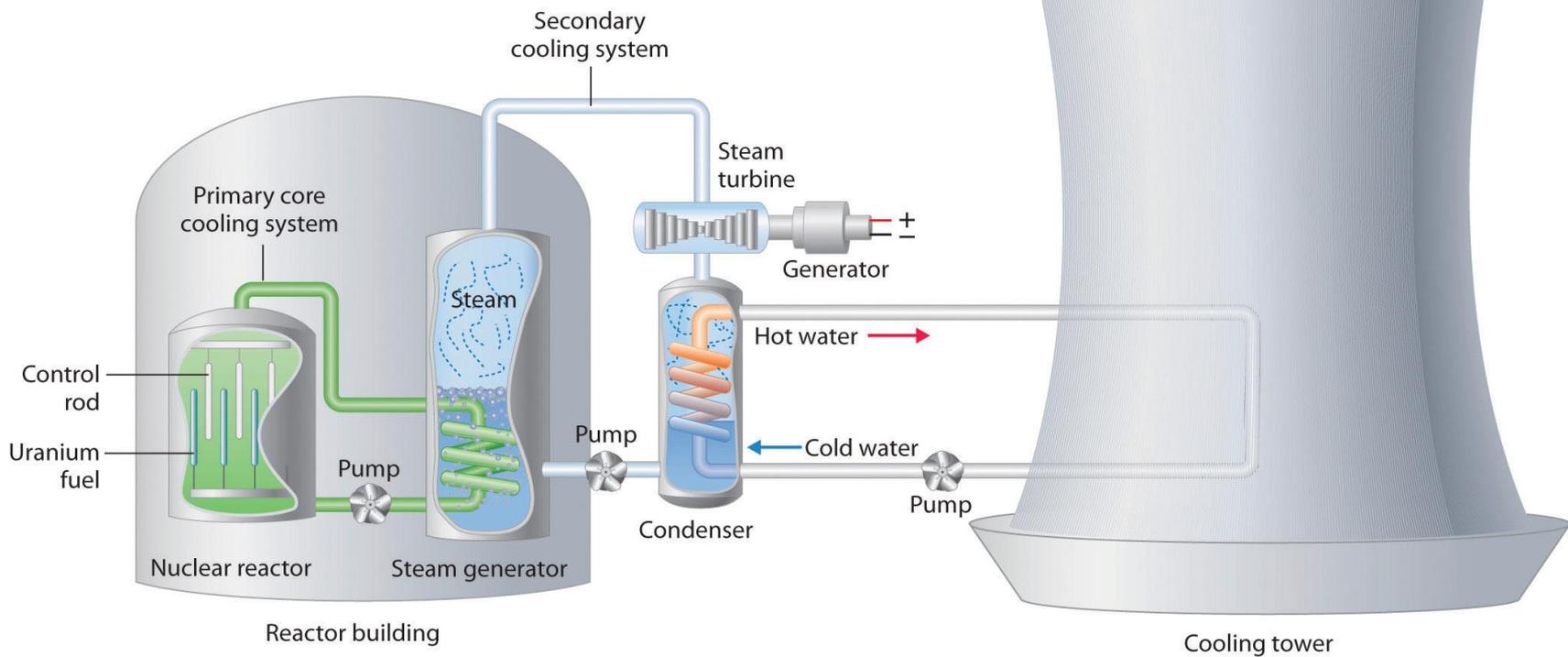
- ❑ Varetas de controle no núcleo Boro ou Cádmio, de materiais absorventes de nêutrons, permitem regular o ritmo da fissão. Estas varetas de controle serão abaixadas ou retiradas conforme a necessidade de estabilização da energia.

Núcleo de um reator nuclear



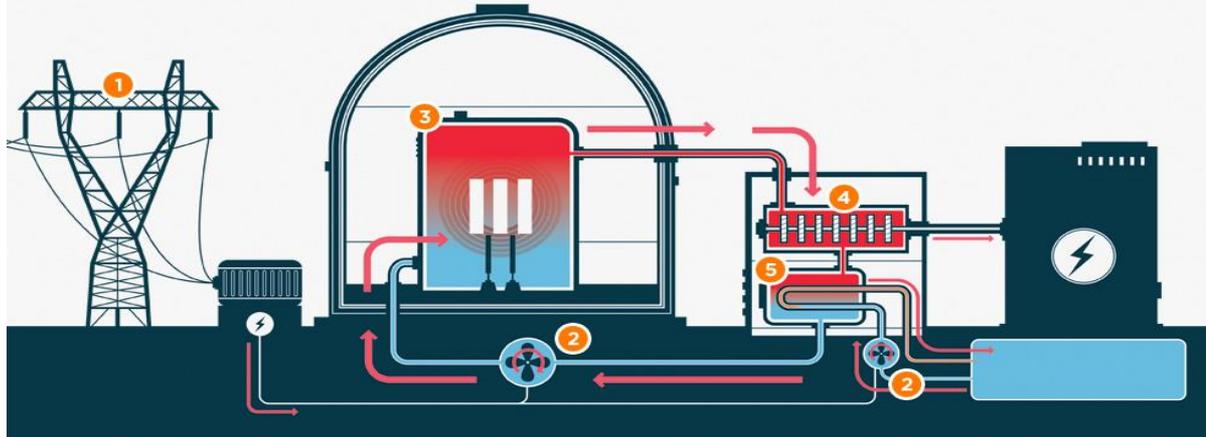
- ❑ Esse processo gera muito calor e é esse calor que é aproveitado para ferver a água, convertendo-a em vapor.
- ❑ É esse vapor que sai sob pressão do reator nuclear e movimentam turbinas que por sua vez fazem movimentar um gerador que produz energia elétrica.





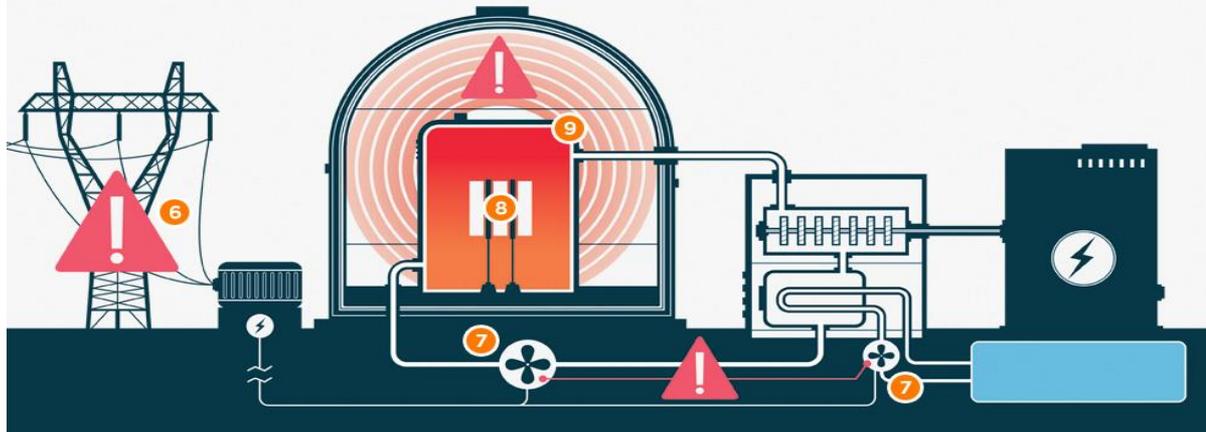
COMO FUNCIONA UM REATOR NUCLEAR

- 1 Rede externa de energia alimenta o sistema de bombeamento de água da usina nuclear.
- 2 Sistema de bombeamento injeta água no reator e no sistema de resfriamento.
- 3 Núcleo do reator aquece a água a altas temperaturas e gera vapor que é enviado à turbina.
- 4 Vapor move a turbina e seu movimento gera eletricidade.
- 5 Após movimentar a turbina, o vapor é direcionado ao sistema de resfriamento onde volta ao estado líquido, reiniciando o processo.



O QUE ACONTECEU EM ALGUMAS USINAS NUCLEARES NO JAPÃO

- 6 Em consequência do terremoto seguido do tsunami, o fornecimento externo de energia foi interrompido.
- 7 Sem energia, os sistemas de bombeamento de água e de resfriamento pararam de funcionar.
- 8 A usina desligou o reator, mas seu núcleo continua em atividade até ser totalmente resfriado.
- 9 Sem resfriamento, a pressão do vapor e os níveis de radioatividade continuam a aumentar, gerando risco de explosões.



Explosão do reator de Fukushima



Momento da Explosão na Usina Nuclear - Japão



Helicóptero lança água sobre o reator da usina nuclear de Fukushima - Japão

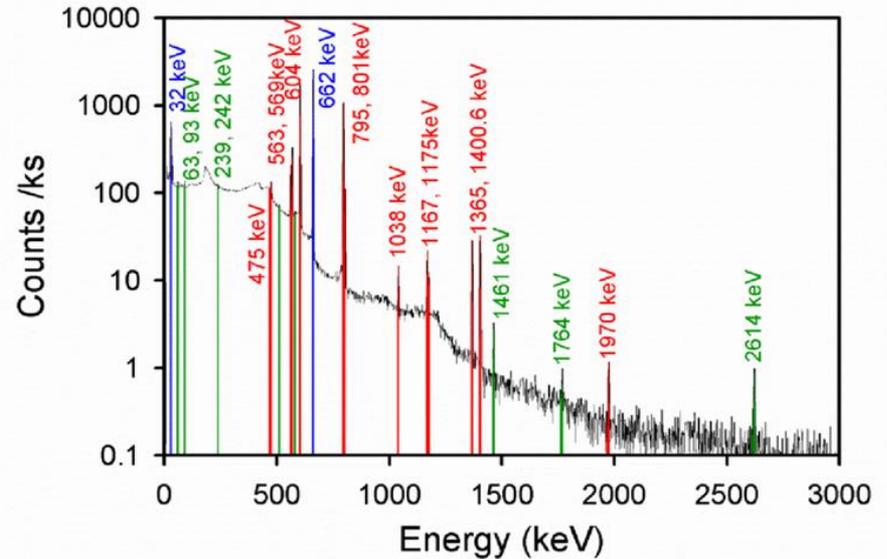
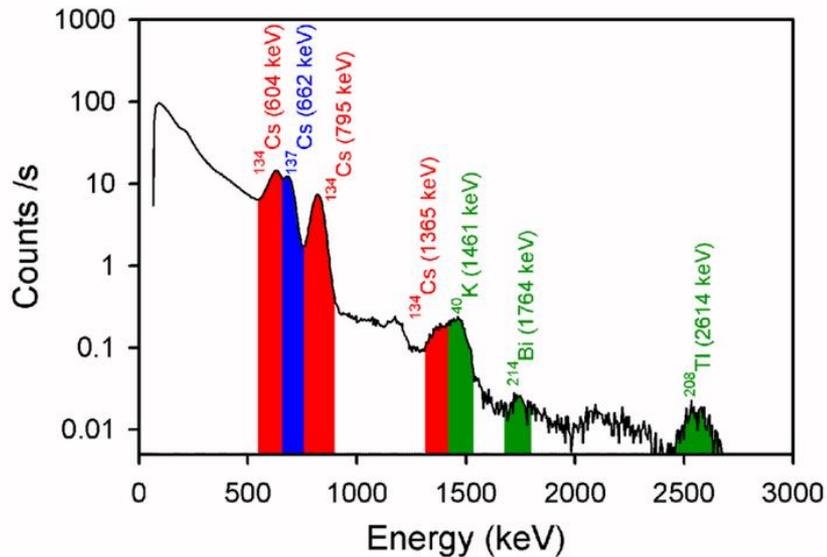


Imagem mostra danos nos reatores 3 (esquerda) e 4 (centro) da usina de Fukushima (15/03)



Trabalhadores na Usina de Fukushima - Japão

^{134}Cs ($T_{1/2} \sim 2$ years) can not be created by β^- decay of heavier $A=134$ fission fragments since ^{134}Xe is stable.
 Presence of ^{134}Cs is evidence for nuclear reactor waste.
 ^{134}Cs is made in reactors via (n, γ) capture on stable ^{133}Cs .
 ^{134}Cs is not present in nuclear weapons fallout.



Radiações

São ondas eletromagnéticas ou partículas que se propagam com alta velocidade e portando energia, eventualmente carga elétrica e campo magnético, e que, ao interagir podem produzir variados efeitos sobre a matéria.

As radiações eletromagnéticas mais conhecidas são:

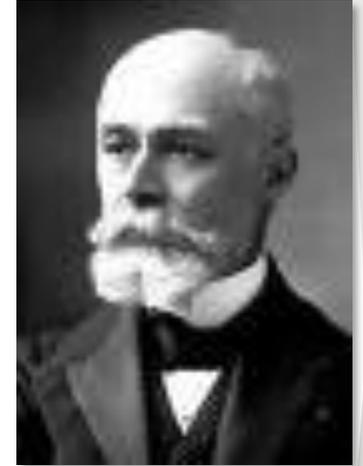
luz
microondas,
ondas de rádio AM e FM
Radar
Laser
raios X
radiação gama.

Descobertas das radiações

- 1895- Roentgen descobriu os raios X.



- 1896 – Bequerel foi encarregado de verificar a descoberta por Roentgen e acabou descobrindo a radioatividade pela observação da fluorescência de alguns minerais.



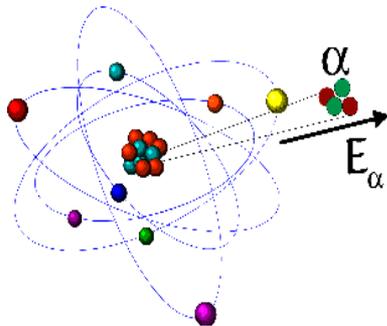
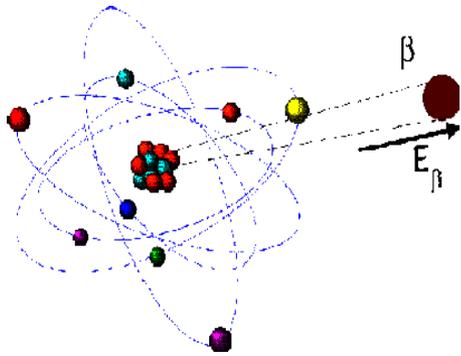
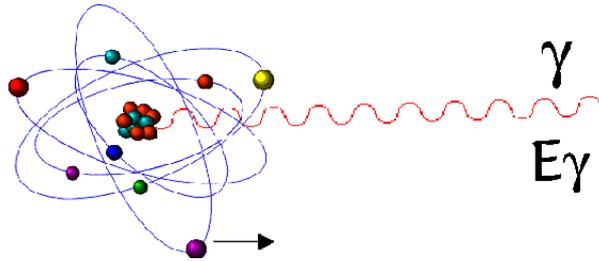
- 1897- Thomson descobriu o elétron (radiação beta).



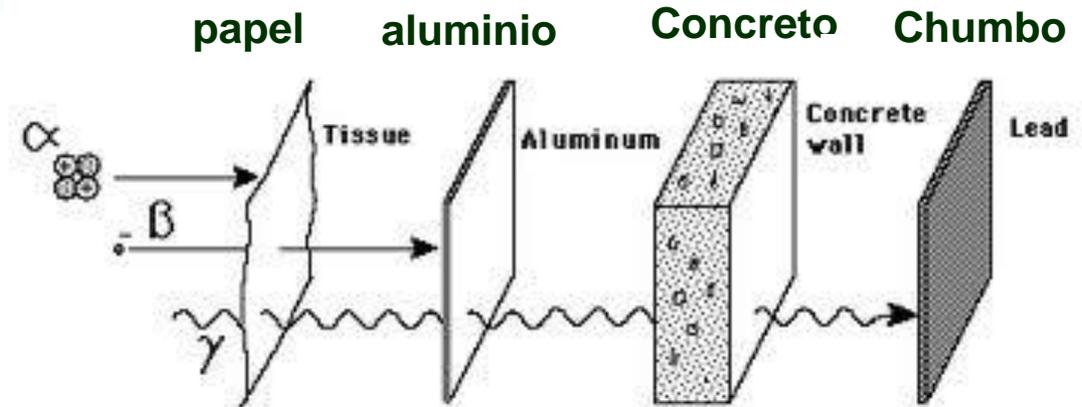
- 1898- Marie Curie descobriu o polônio e o rádio devida sua intensa atividade.



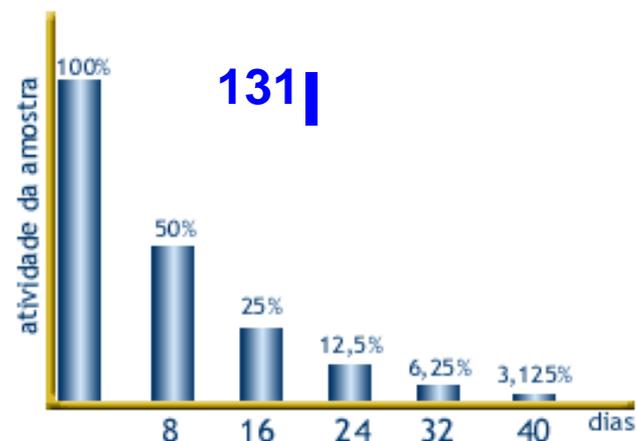
Penetrabilidade da radiação



- As radiações Alfa, Beta e Gama possuem diferentes poderes de penetração, isto é, diferentes capacidades para atravessar os materiais.
- Assim como os raios-X os raios gama são extremamente penetrantes, sendo detido somente por uma parede de concreto ou metal. Têm altíssima velocidade aproximadamente 300.000 km/s.



Principais elementos radioativos que são liberados para a atmosfera após um acidente em uma usina nuclear.



- ❑ Iodo-131 (^{131}I) - Tempo de meia vida \approx 8 dias - gama
- ❑ Césio-137 (^{137}Cs) – Tempo de meia vida \approx 30,1 anos - gama
- ❑ Estrôncio-90 (^{90}Sr) – Tempo de meia vida \approx 28 anos - gama

Urânio-235 – 710 milhões de anos – alfa e gama

Plutônio-239 – 24 mil anos – alfa e gama

LEVARÁ MAIS DE 200 ANOS PARA ESSA RADIAÇÃO POSSA SER CONSIDERADA “RADIAÇÃO DE FUNDO”

Medida do efeito da radiação

❑ **Atividade** é o número de desintegrações nucleares por unidade de tempo em uma quantidade de substância radioativa.

Curie (Ci) = $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo. Atualmente é pouco utilizada.

(1Bq = $2,7 \times 10^{-11}$ Ci). Bequerel (Bq) Sistema Internacional de Unidades.

❑ **Exposição:** capacidade de um feixe de radiação eletromagnética (raios-X, raio gama, ultravioleta, etc.) causar ionização (retirada de elétrons do átomo) do material atravessado por ele.

❑ A unidade é C/kg (coulombs, por 1 kg de ar seco e puro).

❑ Antigamente se usava o roentgen (R), correspondente a $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg.

❑ Ao se mencionar uma determinada quantidade de roentgen em um feixe de raios-X, por exemplo, isto não significa que toda essa energia atingirá o corpo alvo; trata-se apenas da energia transportada pela radiação

Medida do efeito da radiação

- ❑ **Sievert:** O sievert (Sv) é a unidade usada para dar uma avaliação do impacto da radiação ionizante sobre os seres humanos.
- ❑ É a unidade do Sistema Internacional de Unidades da dose equivalente e dose eficaz, e que leva em conta os efeitos biológicos em tecidos vivos, produzidos pela radiação absorvida.
- ❑ Dessa forma, a dose equivalente é obtida através da dose absorvida multiplicada por dois fatores ponderantes apropriados adimensionais.
- ❑ O efeito da radiação ionizante depende principalmente da energia fisicamente recebida por cada unidade de massa, portanto, o Sievert tem a mesma unidade que o Gray, unidade de dose absorvida, o joule por quilograma (J/kg).
- ❑ No entanto, o efeito específico dessa energia é refletida por dois coeficientes, um refletindo a eficácia biológica de diferentes tipos de radiações e o outro o impacto biológico sobre um determinado órgão.

Dose recebida e seu efeito



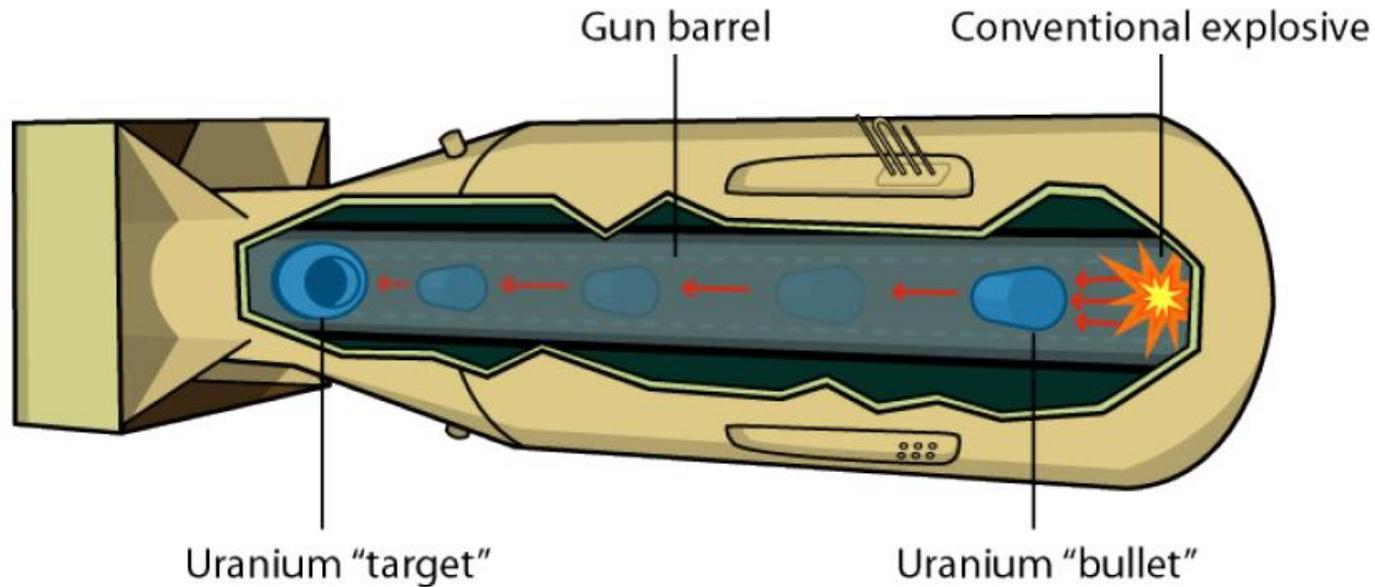
Exibido em Milisieverts



Exposição a radiação

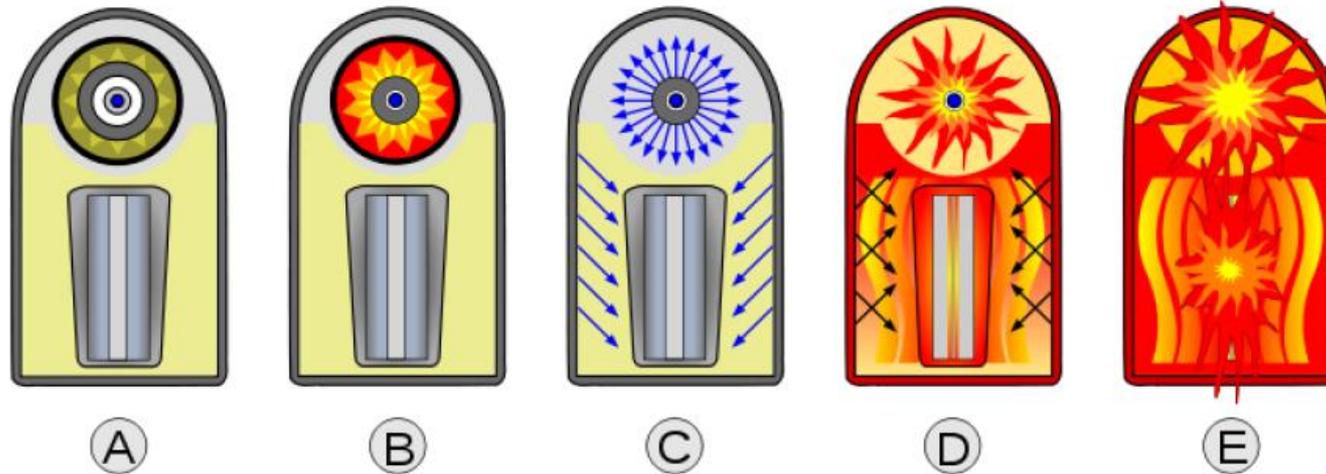
- ❑ 50 e 100 milisieverts: mudanças na composição do sangue.
- ❑ 500: náusea que se manifesta em questão de horas.
- ❑ 700: vômitos.
- ❑ 750: queda de cabelos que se manifesta entre 2 a 3 semanas.
- ❑ 900: diarreia.
- ❑ 1.000: hemorragia.
- ❑ 4.000: possível morte no prazo de dois meses, se a vítima não receber tratamento.
- ❑ 10.000: destruição da parede intestinal interna, hemorragia interna e morte em entre 1 e 2 semanas.
- ❑ 20.000: danos ao sistema nervoso central, perda de consciência em questão de minutos e morte no prazo de horas ou dias

Bomba de fissão (atômica)



Ao atingir massa crítica (em torno de 13 kg) ocorre a fissão.

Bomba de fusão (nuclear)



A - Material explosivo (plutonio) na cabeça da bomba, envolto por espuma (poliestireno)

B – Início da explosão por fissão do plutonio

C – Fissão primária emite raio-X, que irradia a espuma de poliestireno

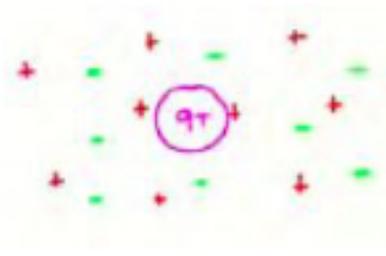
D - Poliestireno se torna plasma e o aquecimento inicia a fusão

E – Reação de fusão com quebra do ${}^6\text{Li}$ e início da reação de fusão $d+t$

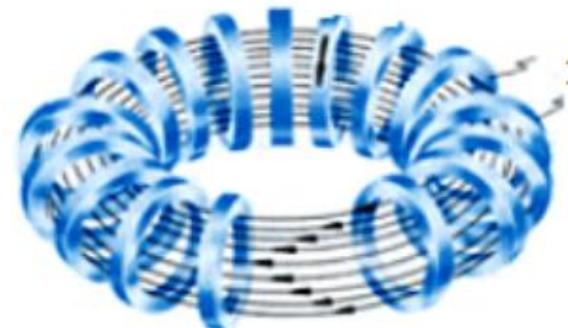
Reator a base de fusão nuclear

- ❑ Uma forma de se obter energia limpa é utilizando reações de fusão ao invés de fissão.
- ❑ Reações de fusão ocorrem no Sol e nas estrelas.
- ❑ Na Terra temos um dispositivo chamado Tokamak construído para confinar plasmas de alta temperatura numa região com a forma de um toróide.
- ❑ A forma toroidal dos Tokamaks é para útil para confinar o plasma com campos magnéticos
- ❑ O confinamento do plasma pode gerar condições de densidades e temperaturas que permitam a fusão nuclear, do tipo que ocorre no Sol.

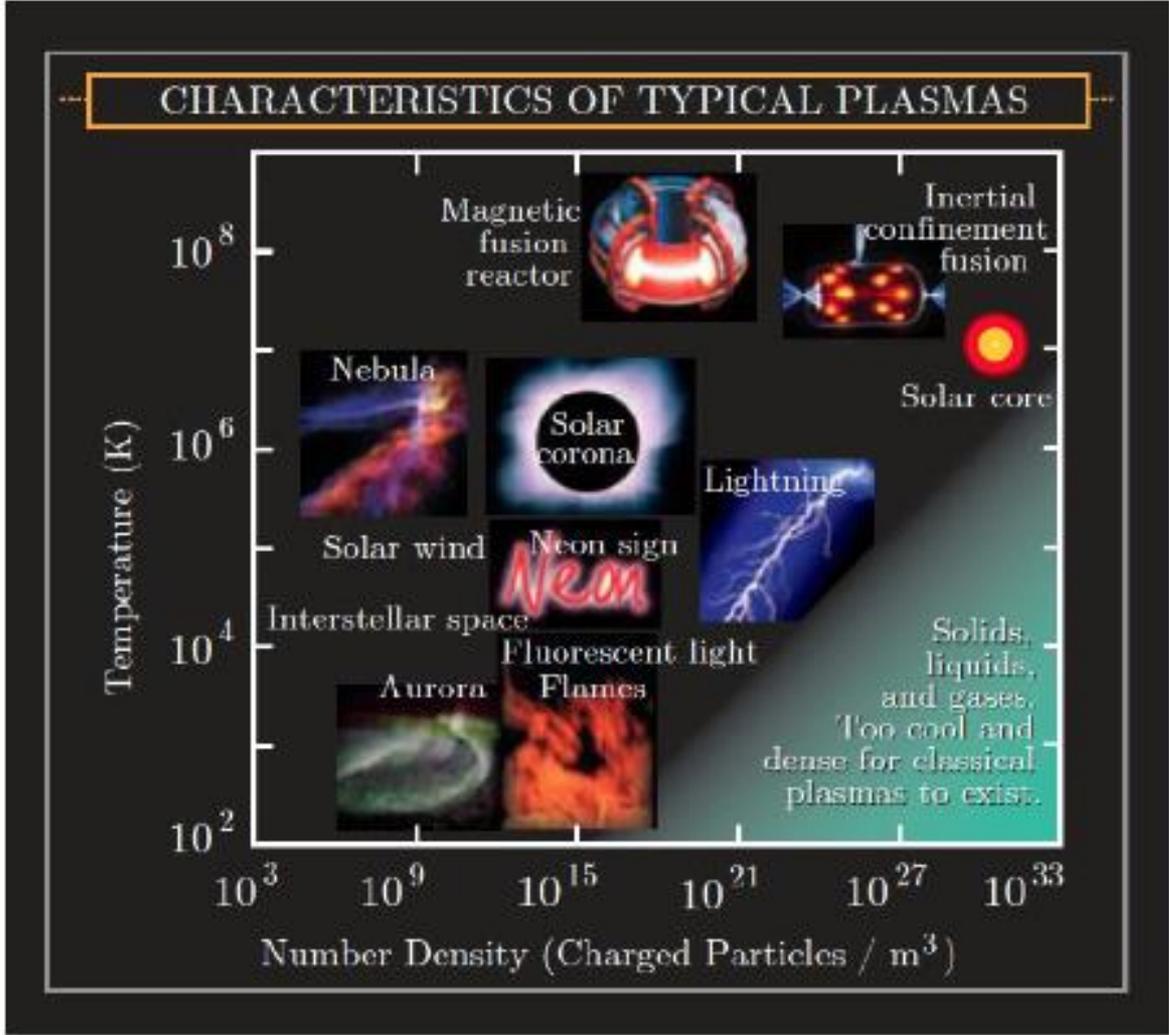
Plasma é uma mistura de íons positivos e negativos numa região globalmente neutra.

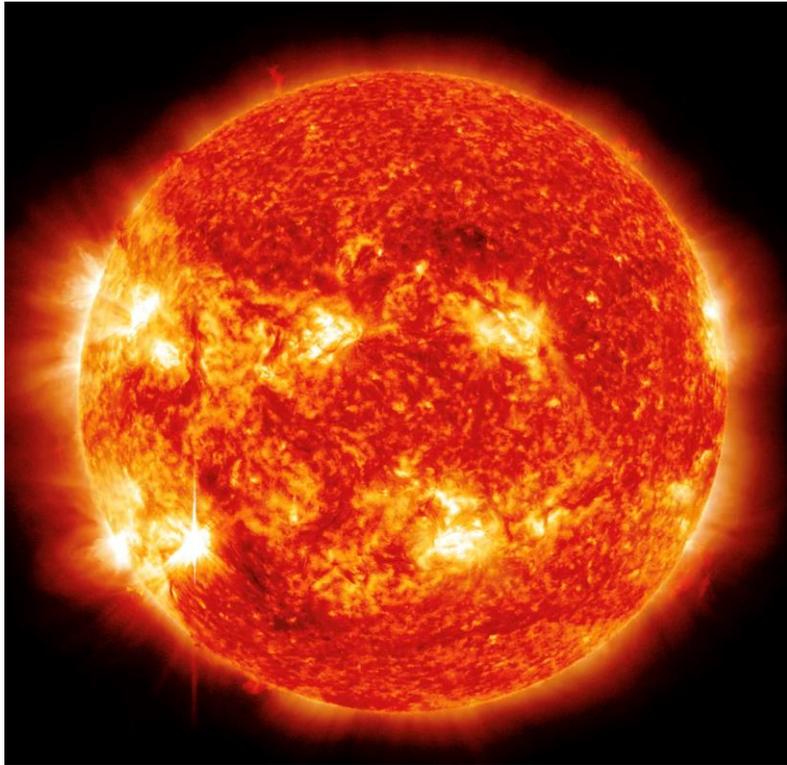


Mega Ampere Spherical Tokamak (MAST) - Reino Unido

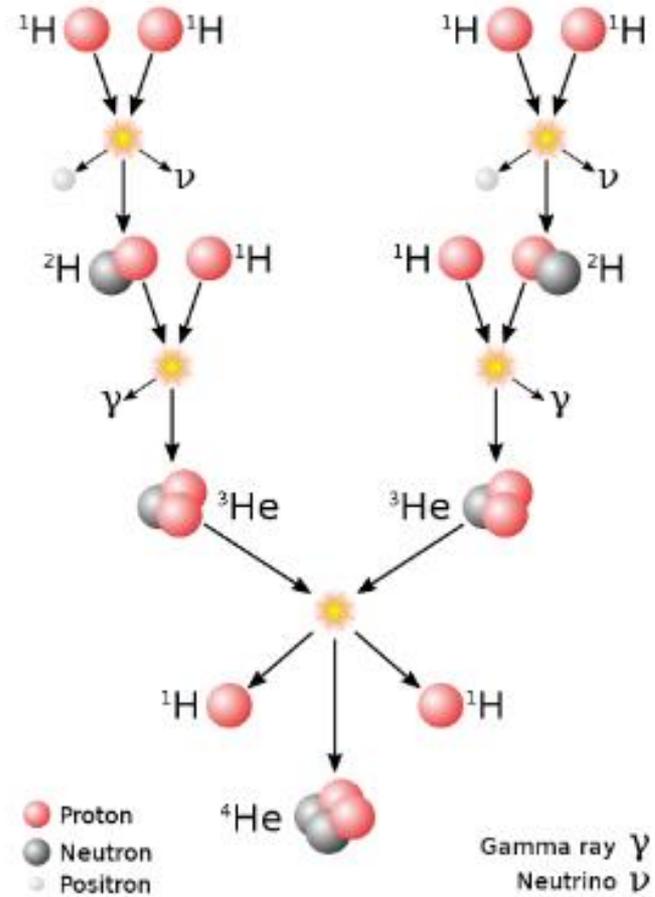


□ Confinando plasma num toroide podemos obter as condições de temperaturas e densidades que possam levar à fusão nuclear controlada de núcleos leves como o deutério e trítio.



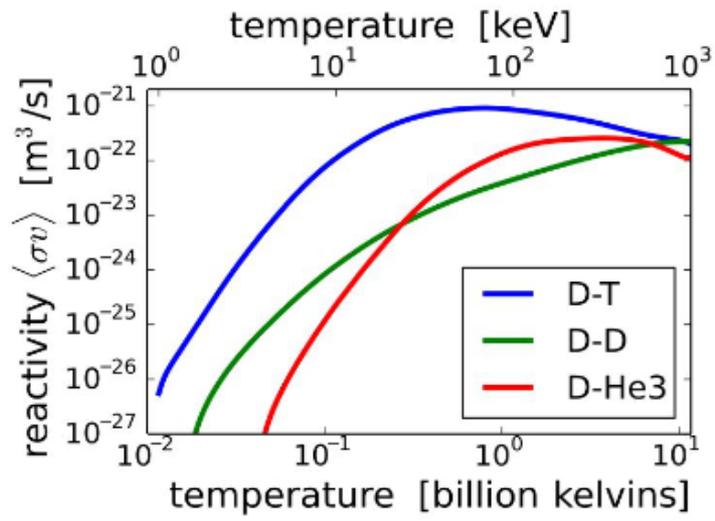
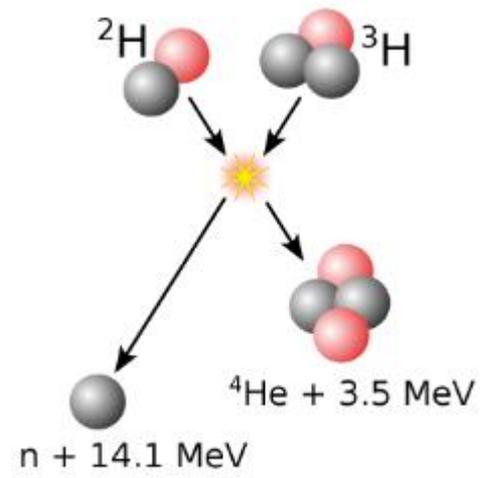


$$T_{\odot} = 15 \cdot 10^6 \text{K} \rightarrow 1.3 \text{keV}$$



1.	D + T	→	⁴ He (3.5 MeV) + n (14.1 MeV)
2.	D + D	→	T (1.01 MeV) + p (3.02 MeV) (50%)
		→	³ He (0.82 MeV) + n (2.45 MeV) (50%)
3.	D + ³ He	→	⁴ He (3.6 MeV) + p (14.7 MeV)
4.	T + T	→	⁴ He + 2 n + 11.3 MeV
5.	³ He + ³ He	→	⁴ He + 2 p
6.	³ He + T	→	⁴ He + p + n + 12.1 MeV (51%)
		→	⁴ He (4.8 MeV) + D (9.5 MeV) (43%)
		→	⁴ He (0.5 MeV) + n (1.9 MeV) + p (11.9 MeV) (6%)
7.	D + ⁶ Li	→	2 ⁴ He + 22.4 MeV
8.	p + ⁶ Li	→	⁴ He (1.7 MeV) + ³ He (2.3 MeV)
9.	³ He + ⁶ Li	→	2 ⁴ He + p + 16.9 MeV
10.	p + ¹¹ B	→	3 ⁴ He + 8.7 MeV

A melhor reação é a deutério + trítio



Máximo em 70 keV e maior reatividade que as outras

A viabilidade desta reação se dá quando a potência termonuclear supera a potência perdida para o plasma:

$$n\tau_E > 1.5 \cdot 10^{20} \text{ s/m}^3$$

(Critério de Lawson)

Ou então, pela utilidade,

$$nkT\tau_E > 3 \cdot 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s/m}^3$$

Já alcançamos metade disso, mas o ITER deseja satisfazer o critério do produto triplo quando começar a funcionar.

ITER - super tokamac

- ❑ ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) - projeto de reator experimental a fusão nuclear baseado na tecnologia do tokamak.
- ❑ ITER está sendo construído e tem previsão de ficar pronto em 2035.

