

Energia Nuclear



Energia Nuclear

Questão básica: Como aproveitar a energia liberada nas reações de fissão e fusão nuclear?

- ✓ Para responder isso temos que deter o conhecimento sobre o núcleo e seus processos!!!!
- ✓ Avaliar os riscos e vantagens envolvidos.
- ✓ Comparar com outros métodos de geração, como por exemplo: combustão (que envolve reação química com energia de ligação da ordem de eV, enquanto que a nuclear está na ordem de MeV).
- ✓ Conhecer a disponibilidade e o custo de produção do combustível.
 - ✓ E sobretudo a sustentabilidade!!!!

Energia Nuclear

Quadro comparativo entre diversos processos de geração de energia

Energia Liberada por 1 kg de Matéria

Forma de Matéria	Processo	Tempo ^a
Água	Queda d'água de 50 m	5 s
Carvão	Combustão	8 h
UO ₂ Enriquecido	Fissão em um reator	690 anos
²³⁵ U	Fissão total	3×10^4 anos
Deutério	Fusão total	3×10^4 anos
Matéria e antimatéria	Aniquilação total	3×10^7 anos

^aEsta coluna mostra o tempo durante o qual a energia gerada manteria acesa uma lâmpada de 100 W.

Energia Nuclear

O processo básico:

- ✓ Em 1932 o físico inglês James Chadwick descobriu o nêutron.
- ✓ Enrico Fermi propôs a utilização de nêutrons para bombardear a matéria e produzir outros elementos pela modificação nuclear.
- ✓ No final da década de 1930, a física Lise Meitner** e os químicos Otto Hahn* e Fritz Strassmann expuseram sais de urânio ($Z=92$) a nêutrons térmicos (0,04 eV de temperatura) produzindo bário ($Z=56$). Como poderia?
- ✓ Lisa Meitner e seu sobrinho, Otto Frisch, semanas mais tarde, a reação a qual chamaram de fissão.

*- Nobel de Química em 1944

** - Em 1997 foi homenageada, dando nome ao elemento Mt (Meitnério) $Z=109$

Energia Nuclear

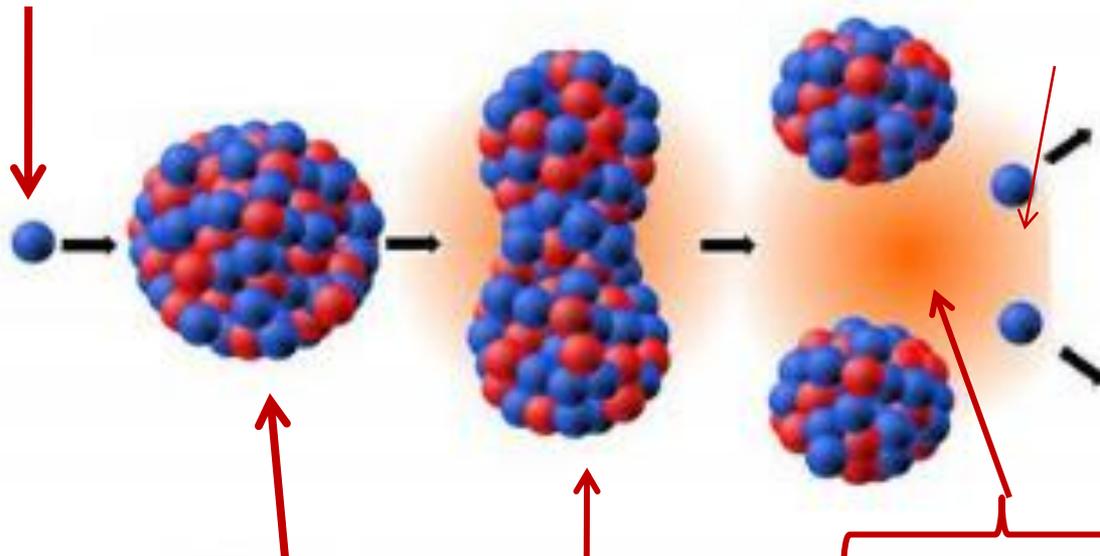
O processo básico:

nêutron térmico (lento)

$$K = 3/2 kT \sim 0,04\text{eV}$$

nêutrons rápidos

$$K \sim 1\text{MeV ou mais}$$



Quando o ${}^{235}\text{U}$ captura um nêutron térmico ele tem 85 % de chance de fissionar, e 15 % de emitir radiação γ .

Energia Nuclear

A fissão vista por perto.

Quando o ^{235}U é bombardeado por nêutrons térmicos, dá origem a diversas reações de decaimento:



Os fragmentos de xenônio e estrôncio são altamente instáveis e sofrem decaimento Beta. No caso do Xenônio:

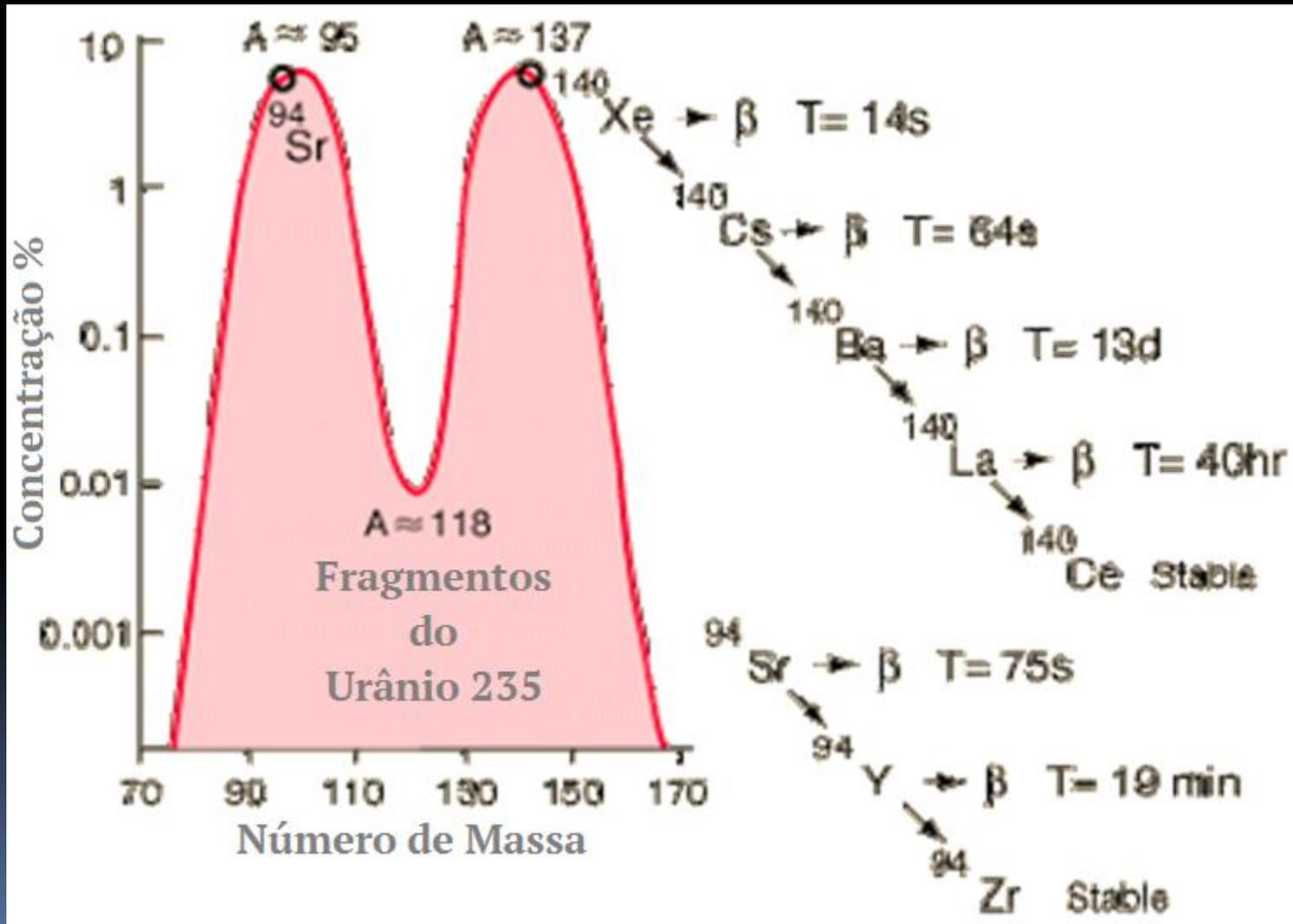
	^{140}Xe	\rightarrow	^{140}Cs	\rightarrow	^{140}Ba	\rightarrow	^{140}La	\rightarrow	^{140}Ce
$T_{1/2}$	14s		64 s		13 d		40h		estável
Z	54		55		56		57		58

No caso do Estrôncio:

		^{94}Sr	\rightarrow	^{94}Y	\rightarrow	^{96}Zr	
$T_{1/2}$		75 s		19 min		estável	
Z		38		39		40	

Energia Nuclear

Distribuição estatística, por número de massa dos fragmentos do ^{235}U .



Energia Nuclear

- ✓ O ^{236}U tem 60% a mais de nêutrons que prótons (fissão)
- ✓ Os fragmentos possuem um excesso de neutros de 30 e 40%, realizando decaimento beta, transformando neutros em prótons até se estabilizarem.

Teste: A equação a seguir representa um evento genérico de fissão: $^{235}\text{U} + n \rightarrow X + Y + 2n$. Qual dos seguintes pares não pode substituir X e Y?

- a) ^{141}Xe e ^{93}Sr ; b) ^{139}Cs e ^{95}Rb ; c) ^{156}Nd e ^{95}Rb ; ou
d) ^{121}In e ^{113}Ru .

Energia Nuclear

Exercício:

Considere a curva de energia de ligação por núcleon e calcule o Q da reação de fissão onde um nuclídeo com A igual a 240 se transforma em dois com A igual a 120.

Resposta: Q é aproximadamente 200 Mev

Energia Nuclear

Um modelo para a fissão nuclear.

: Modelo da gota líquida: Bohr - Wheeler

A figura abaixo mostra os vários estágios de fissão.

O ^{235}U absorve um nêutron térmico



É formado um núcleo de ^{236}U com excesso de energia, que oscila violentamente



As oscilações produzem um pescoço (prótons repelindo prótons)



Ao mesmo tempo, prótons e nêutrons se atraem mutuamente



A interação nuclear diminui rapidamente com a distância



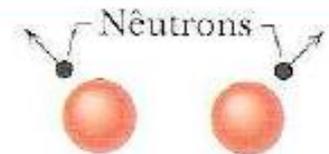
A repulsão elétrica prevalece e o núcleo se divide em duas partes



Como a massa dos fragmentos é menor, há liberação de energia

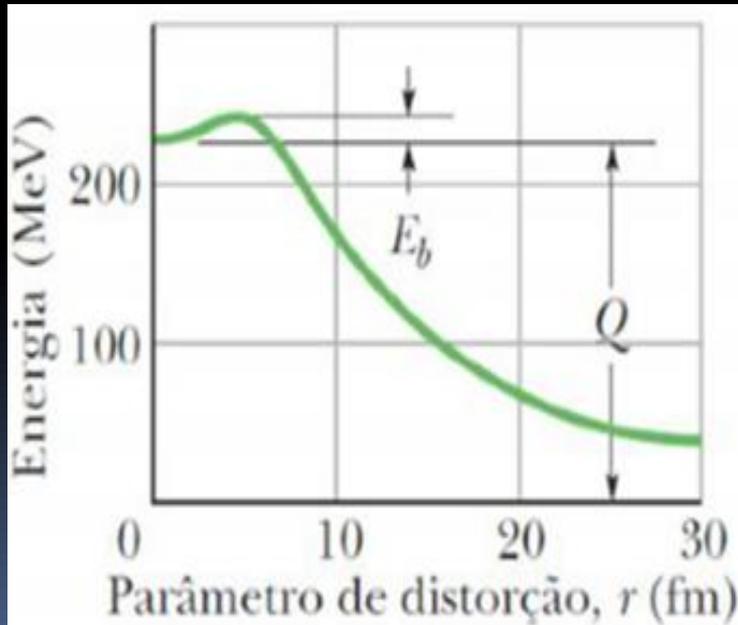


Os fragmentos possuem excesso de nêutrons que são ejetados



Energia Nuclear

O modelo serve para explicar qualitativamente o processo, contudo carece para explicar o fato de alguns núclídeos pesados como ^{235}U e o ^{239}Pu se fissionarem facilmente enquanto que outros, igualmente pesados como o ^{238}U e o ^{243}Am não!! Esta questão foi respondida por Niels Bohr e John Wheeler.



A fissão só ocorre se o neutrão térmico absorvido fornecer uma energia de excitação E_b suficiente para que os fragmentos possam vencer a barreira de potencial. Na verdade, por causa da possibilidade de tunelamento, basta ser próxima.

Energia Nuclear

Teste: Considere as linhas I, II, III e IV da tabela abaixo. Assinale a opção correta quando a indução de fissão por nêutrons térmicos.

	Nuclídeo Inicial	Nuclídeo formado	E_n (MeV)	E_b (MeV)
I	^{235}U	^{236}U	6,5	5,2
II	^{228}U	^{229}U	4,8	5,7
III	^{239}Pu	^{240}Pu	6,4	4,8
IV	^{243}Am	^{244}Am	5,5	5,8

- a) Em todas ocorrem fissão induzida por nêutrons térmicos.
- b) Ocorre em todas menos em IV pois o Amerício 243 é estável.
- c) Só ocorre para as linhas I e III.
- d) Não ocorre em nenhum dos nuclídeos transformados.
- e) Só ocorre em I pois tem a maior energia de excitação.

Energia Nuclear

O reator nuclear: dificuldades a serem vencidas

1- O fato de ser produzido dois ou mais nêutrons propicia uma reação em cadeia, que pode ser explosiva ou não.

Naturalmente só 0,7% do urânio é fissionável. (^{235}U). Para um reator ser viável esta concentração deve ser enriquecida a cerca de 3,5% ou mais.

2- O problema da fuga de nêutrons. É possível mitigar o problema de fuga (proporcional a área) aumentando o volume do reator.

3- O problema da energia dos nêutrons (sub-produto) em MeV que precisam ser reduzido para se tornar térmicos. Solução são moderadores de energia (água)

Energia Nuclear

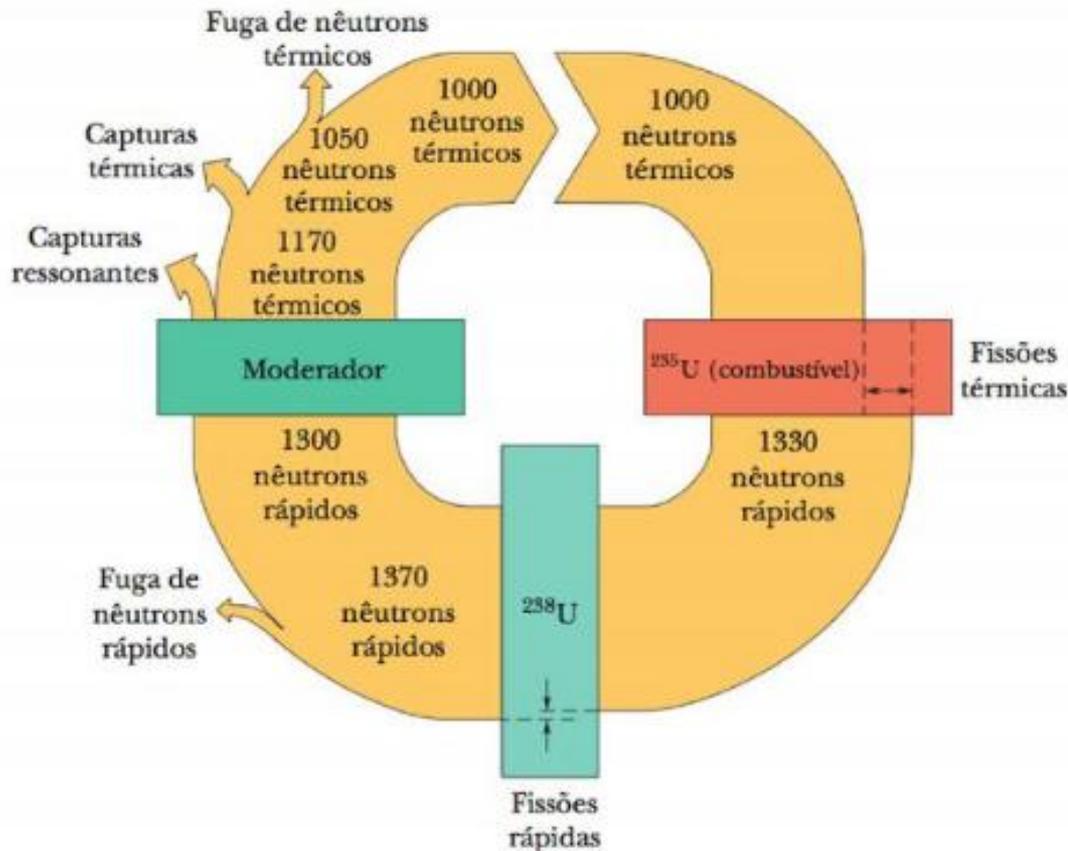
O reator nuclear: dificuldades a serem vencidas

4- O problema da captura dos Nêutrons. Quando estes atingem um intervalo de energia entre 1 e 100 eV, antes de serem esfriados totalmente (0,04eV), há grande probabilidade de serem capturados pelo ^{238}U seguido da emissão de raios gama. Para minimizar a captura ressonante de nêutrons o moderador e o urânio devem ocupar regiões distintas dentro do reator.

Em um reator típico, o combustível está na forma de pastilhas agrupadas em feixe e imersas no líquido moderador

Energia Nuclear

Controle de potência – Reação controlada – Equilíbrio no número de nêutrons em um reator



Fator de multiplicação
 $k = (\text{nêutrons } 2^{\text{a}} \text{ geração}) / (\text{nêutrons } 1^{\text{a}} \text{ ger.})$

$k < 1$ – regime subcrítico:
reação não se sustenta

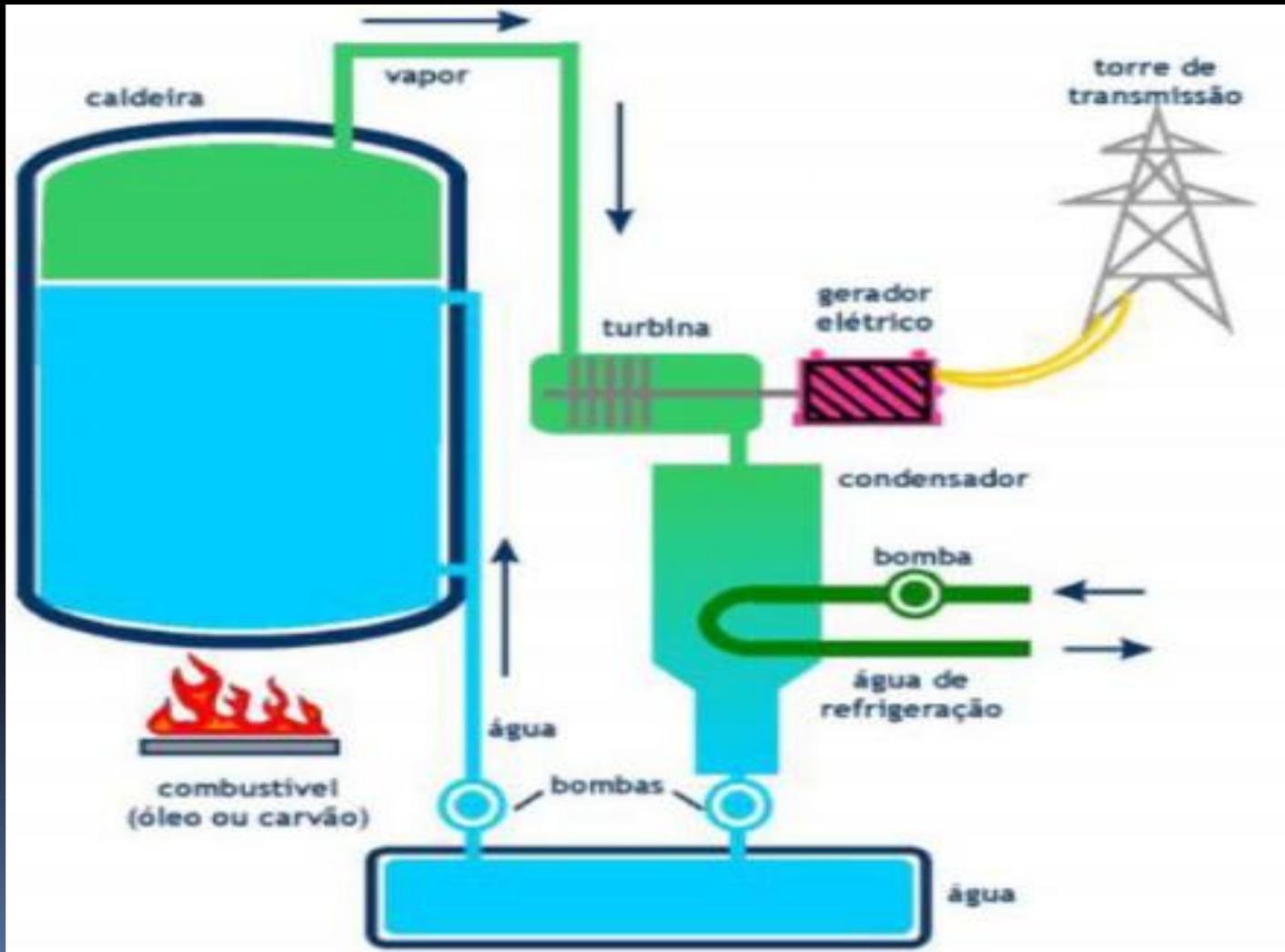
$k > 1$ – regime supercrítico:
reação sai de controle

$k = 1$ – regime crítico (ideal)

Para manter crítico por longo período: preparar com $k > 1$, e inserir barras de controle (materiais que absorvem nêutrons) no reator para baixar até $k = 1$. Depois ir retirando barras à medida em que combustível vai sendo consumido

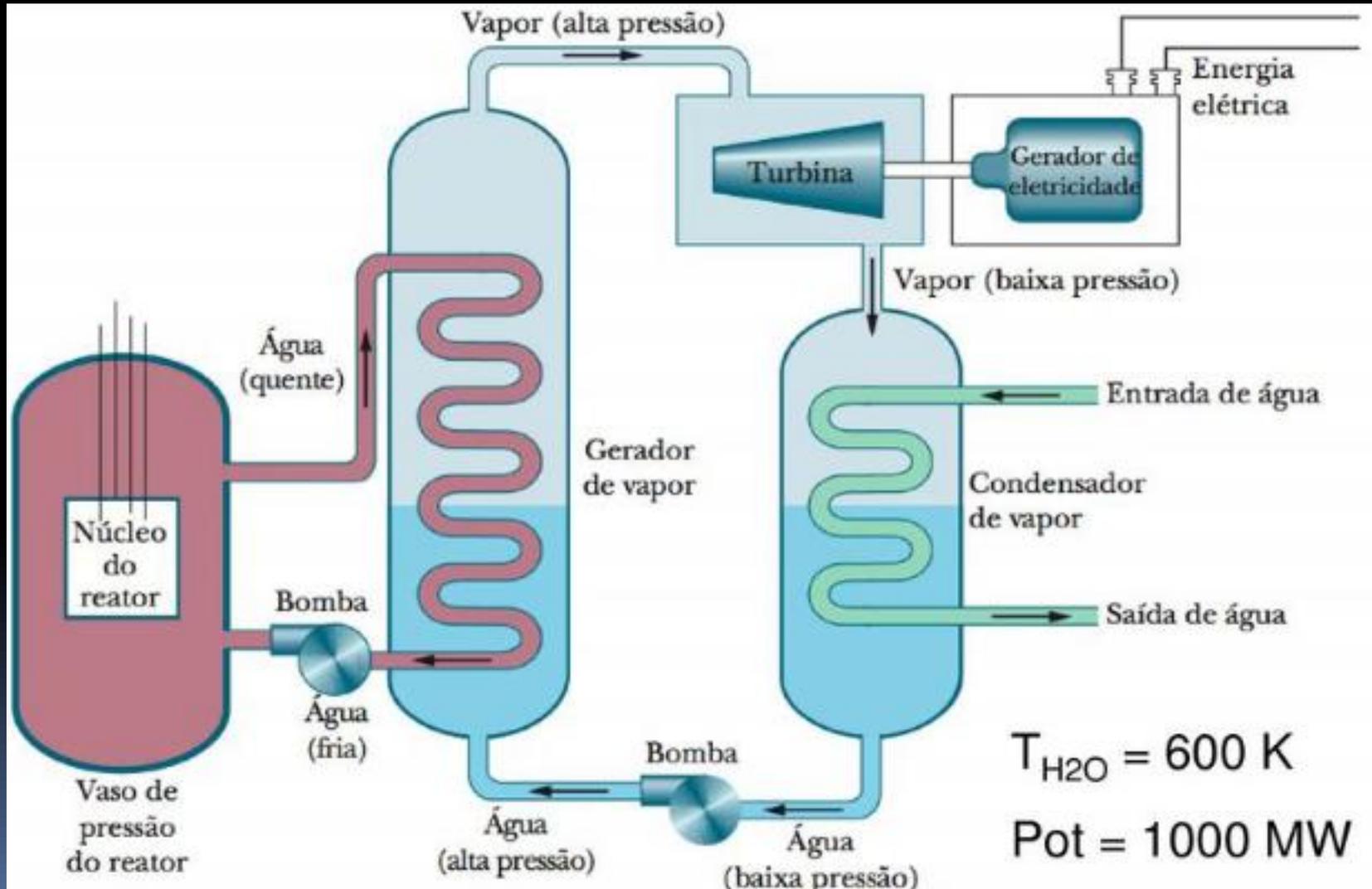
Energia Nuclear

Geração Termoelétrica de energia



Energia Nuclear

Esquema simplificado de um reator de fissão:



Energia Nuclear

- Fusão termonuclear

1920: proposta como mecanismo p/ energia das estrelas (A. Eddington)

1939: Elucidação completa da fusão estelar (H. Bethe)

1952: 1a bomba termonuclear (EUA)

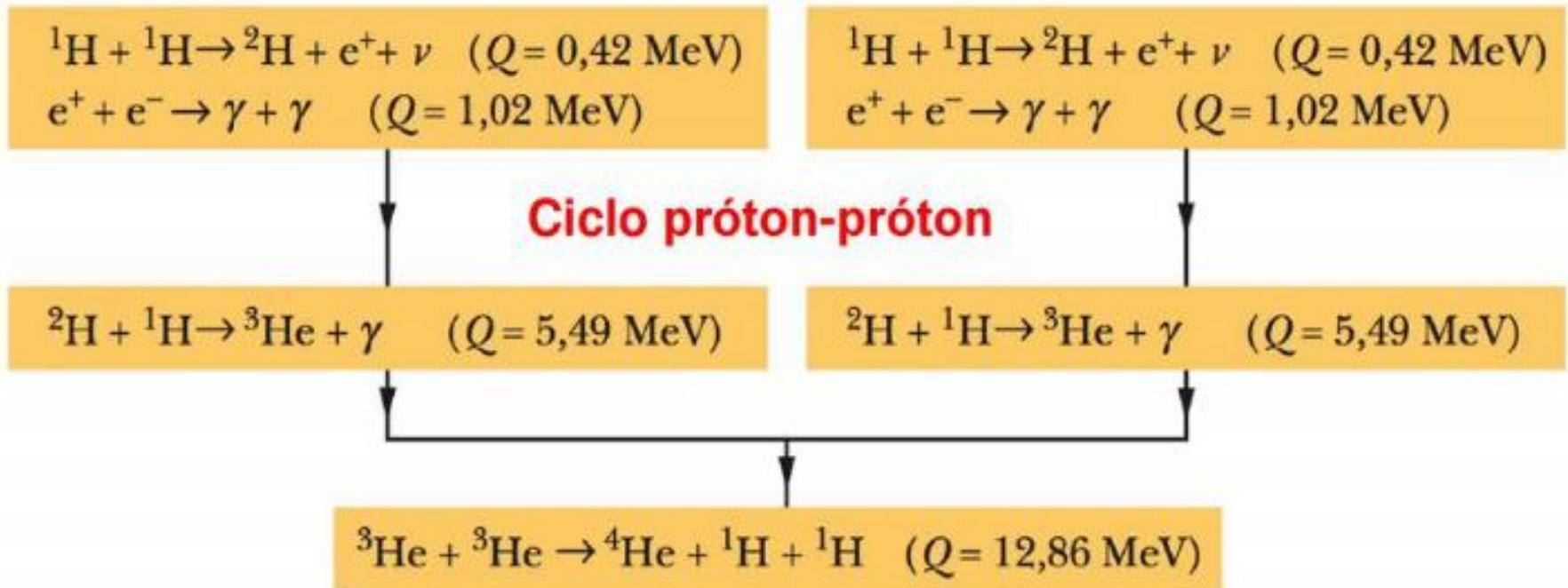
1953: 1a bomba soviética

1968: 1os experimentos com reator tipo Tokamak (URSS)

1968-2015: experimentos diversos buscando a fusão controlada....

Energia Nuclear

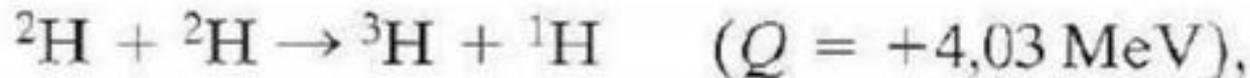
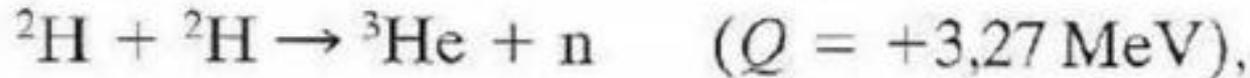
Fusão termonuclear – O processo básico:



- 1) Uma em cada 10^{26} colisões acontece a fusão pp. 10^{12} kg/s
- 2) 10^5 anos é o tempo para que ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ se encontrem e se fundam.
- 3) Acabando o Hidrogênio, o sol começa a se resfriar e encolher, aquecendo e expandindo as camadas externas (gigante vermelha).
- 4) Quando acabar o Hidrogênio a fusão será de ${}^4\text{He}$ para formar Carbono.

Energia Nuclear

Ciclo próton-próton



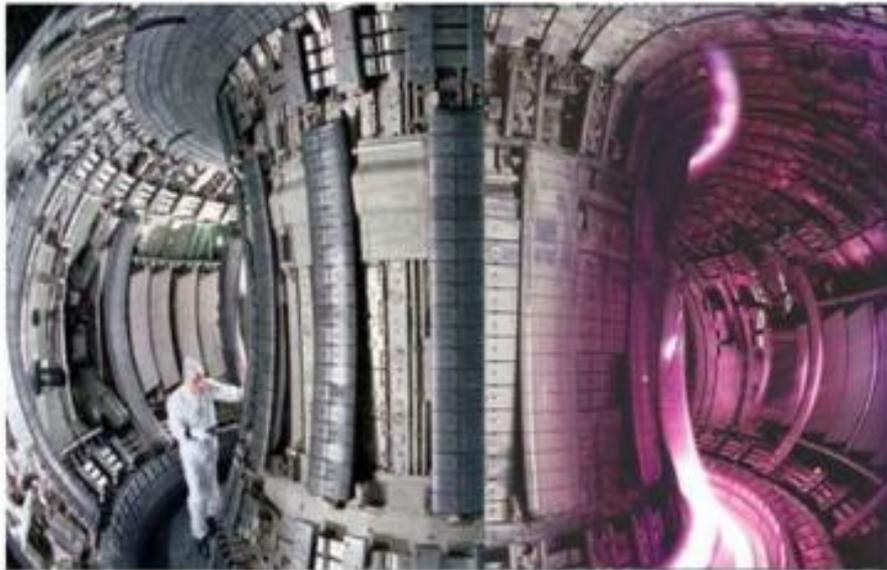
Condições necessárias:

- 1) Alta concentração de partículas, para que colisões/s seja grande.
- 2) Alta temperatura do plasma $T = 10^9 \text{ K}$.
- 3) Longo tempo de confinamento.
- 4) $n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$ (critério de Lawson, para que se produza mais energia do que a consumida).

Energia Nuclear.

Fusão por confinamento magnético

Tokamak

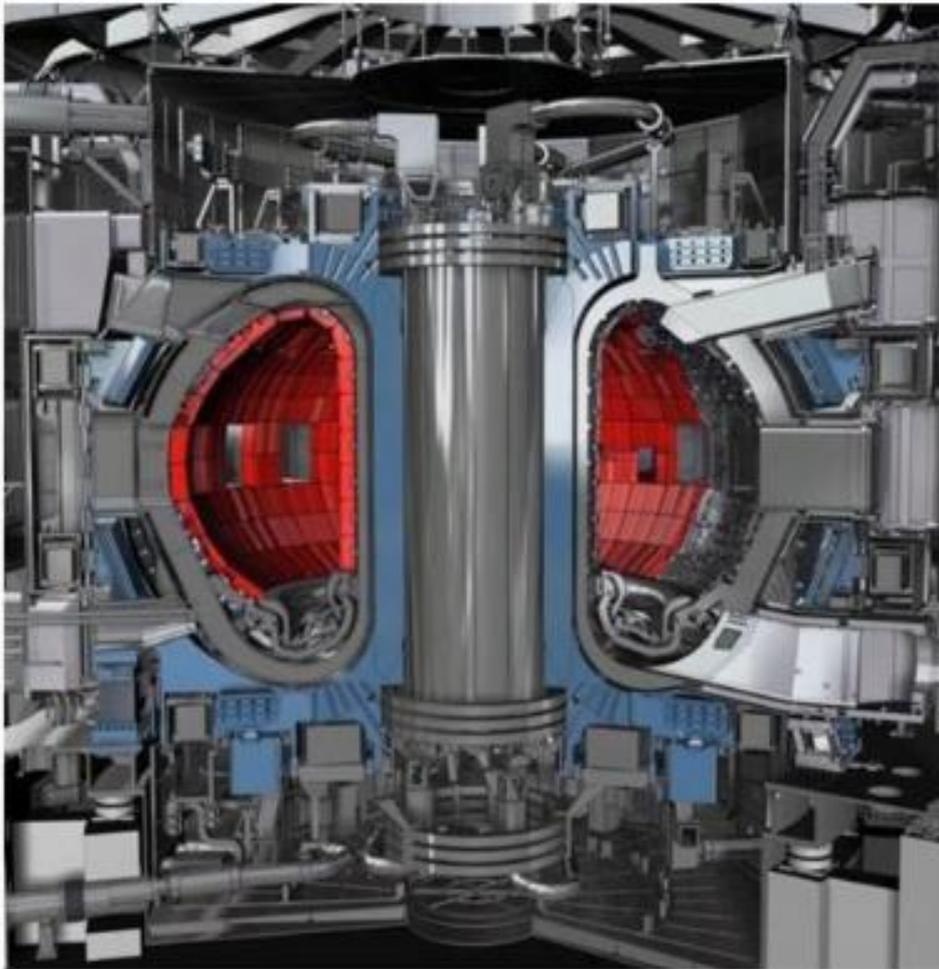


Muitos problemas de engenharia:

- Esquentar o plasma a $> 10^7\text{K}$, e contê-lo com campos magnéticos sem encostar nas paredes
- Campos precisam ser gerados por eletroímãs supercondutores, que precisam ser refrigerados a -200K a poucos m da câmara de plasma!
- Turbulência no plasma reduz a temperatura, dificultando a reação
- Nêutrons produzidos na reação não são contidos, e dissipam energia nas paredes externas, onde ocorre a troca de calor. Mas o bombardeio de nêutrons degrada o material.

Energia Nuclear

Projeto ITER



- Consórcio de 6 países + UE
- \$14 Bilhões (ou mais !!)
- Local: França
- Previsto para 2027
- Previsto para gerar 500MW durante 1000s de cada vez (10x a energia usada para aquecer o plasma)
- Ainda não seria um reator comercial, apenas demonstração