

INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Física IV

Energia Nuclear

(Cap 43; Halliday, Resnik, Walker 8^a ou 9^a ed.)

Prof. Daniel Jonathan

Niterói, Junho 2015

Energia e Processos

Energia extraída de 1 kg de material

$$Q = \Delta mc^2$$

Tabela 43-1

Energia Liberada por 1 kg de Matéria

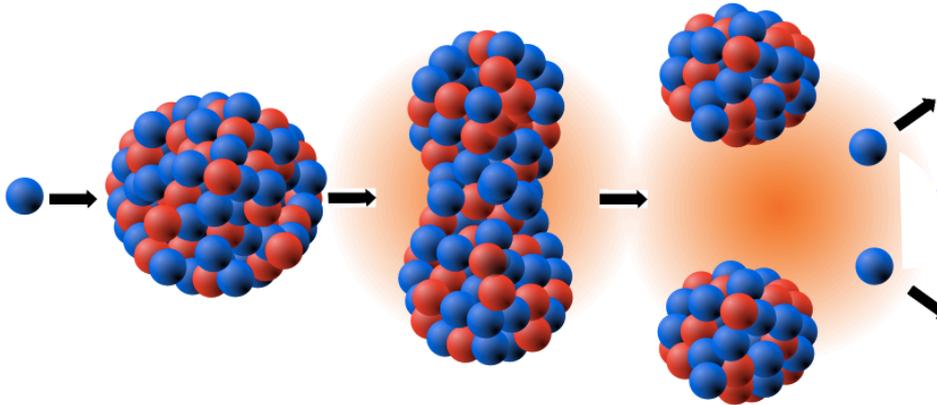
Forma de Matéria	Processo	Tempo ^a
Água	Queda d'água de 50 m	5 s
Carvão	Combustão	8 h
UO ₂ Enriquecido	Fissão em um reator	690 anos
²³⁵ U	Fissão total	3×10^4 anos
Deutério	Fusão total	3×10^4 anos
Matéria e antimatéria	Aniquilação total	3×10^7 anos

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

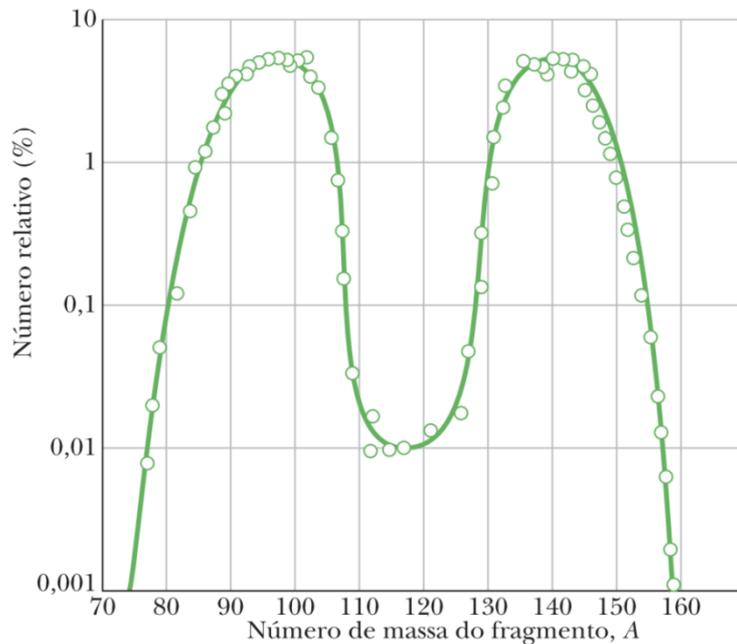
Fissão Nuclear

Ex: Urânio - ^{235}U

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

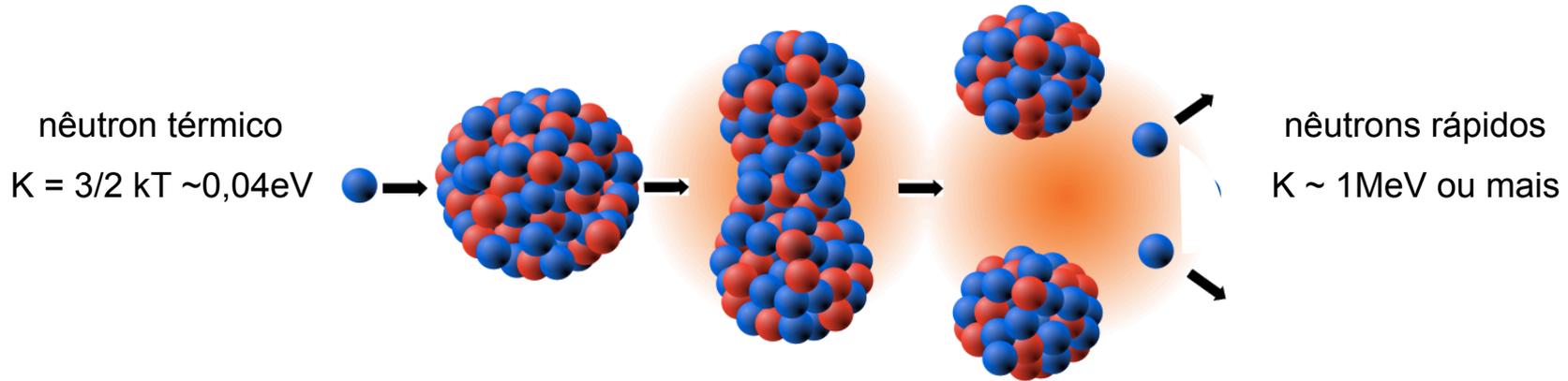


nêutrons rápidos
 $K \sim 1\text{MeV}$ ou mais



Em 7% dos eventos de fissão do urânio há a produção de núcleos com $A \sim 94$ e 140

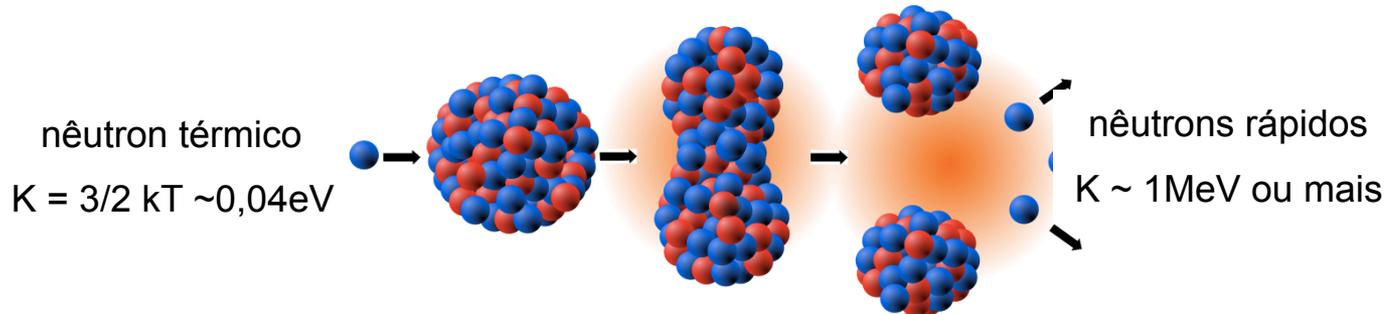
Fissão Nuclear



Como os núcleos produzidos na fissão têm excesso de nêutrons, sofrem em seguida uma série de decaimentos (em geral β^-), p. ex:

	^{140}Xe	\rightarrow	^{140}Cs	\rightarrow	^{140}Ba	\rightarrow	^{140}La	\rightarrow	^{140}Ce		^{94}Sr	\rightarrow	^{94}Y	\rightarrow	^{94}Zr	
$T_{1/2}$	14 s		64 s		13 d		40 h		Estável		$T_{1/2}$	75 s		19 min		Estável
Z	54		55		56		57		58		Z	38		39		40

Fissão Nuclear



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

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

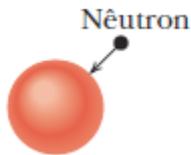
Ex. 43.1 - Determine a energia de desintegração para o evento de fissão acima (considerar o produto final ^{140}Ce e ^{94}Zr). As massas são:

^{235}U	235,0439 u	^{140}Ce	139,9054 u
n	1,008 66 u	^{94}Zr	93,9063 u

R: 208 MeV (7% da energia é “perdida” com emissão de neutrinos (ou antineutrinos))

Fissão Nuclear – modelo de ‘gota’

O ^{235}U absorve um nêutron térmico (de baixa energia cinética) e se torna ^{236}U .



(a)

Parte da massa se transforma em energia, que faz o núcleo oscilar.



(b)

As oscilações produzem um pescoço; os prótons possuem carga positiva e se repelem mutuamente.



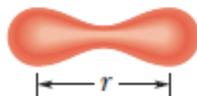
(c)

Ao mesmo tempo, prótons e nêutrons se atraem mutuamente pela interação nuclear.



(d)

A interação nuclear diminui rapidamente com a distância.



(e)

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



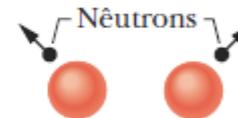
(f)

Como a massa das partes é menor que a massa inicial, a fissão libera energia.



(g)

Os fragmentos possuem um excesso de nêutrons, que são ejetados.



(h)

Fissão Nuclear - modelo

A atração dos núcleons cria uma barreira de potencial de altura E_b para a fissão. Se um nêutron incidente tiver energia E_n suficiente para vencer ou tunelar por essa barreira, a fissão ocorre

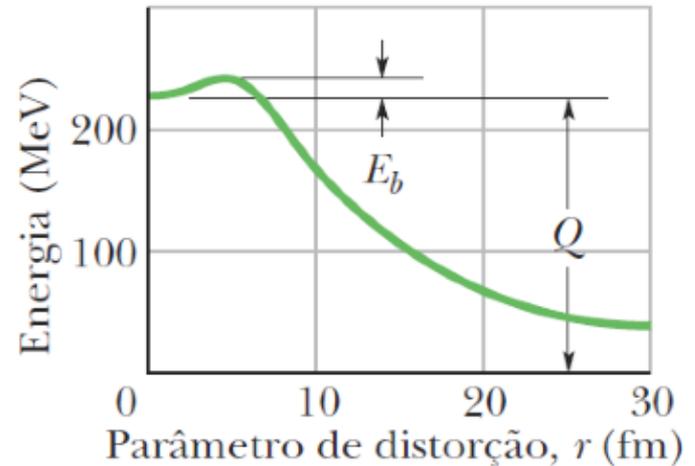


Tabela 43-2

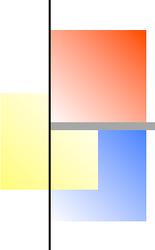
Energia de Excitação e Barreira de Potencial para Quatro Nuclídeos Pesados

Nuclídeo Inicial	Nuclídeo Formado	E_n (MeV)	E_b (MeV)	Fissão por Nêutrons Térmicos?
^{235}U	^{236}U	6,5	5,2	Sim
^{238}U	^{239}U	4,8	5,7	Não
^{239}Pu	^{240}Pu	6,4	4,8	Sim
^{243}Am	^{244}Am	5,5	5,8	Não

Quando o ^{235}U captura um nêutron térmico ele tem 85 % de fissar, e em 15 % dos casos ele emite radiação γ .

Qual a energia que o nêutron térmico acrescenta ao núcleo?

$$m(^{235}\text{U}) = 235,043924u; m(^{236}\text{U}) = 236,0445562u; n=1,008665u$$



Materiais fissionáveis

- Servem para gerar energia elétrica... ou bombas.
- O mais usado é ^{235}U . Quando bombardeados por neutrons de qualquer energia, principalmente térmicos, tem boa chance de fissionarem, liberando grande quantidade de energia.
- O urânio que existe na natureza tem 0.7% de ^{235}U e 99.3% de ^{238}U .
- Para ser usado em um reator, é preciso enriquecer o urânio natural para 3.5% de ^{235}U .
- Métodos utilizados: difusão gasosa, ultracentrifugação, jato centrífugo, laser
- Para fazer uma bomba, é preciso enriquecer a 90%.

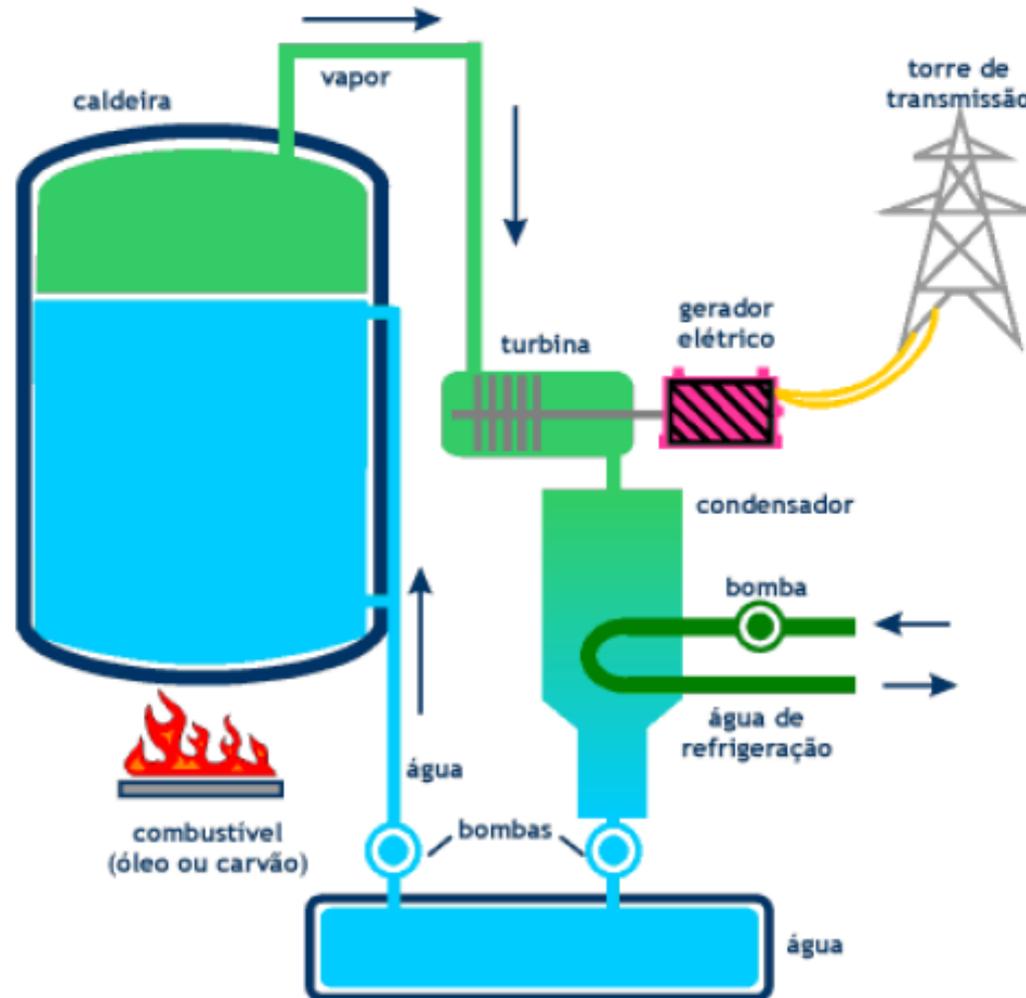


Materiais fissionáveis

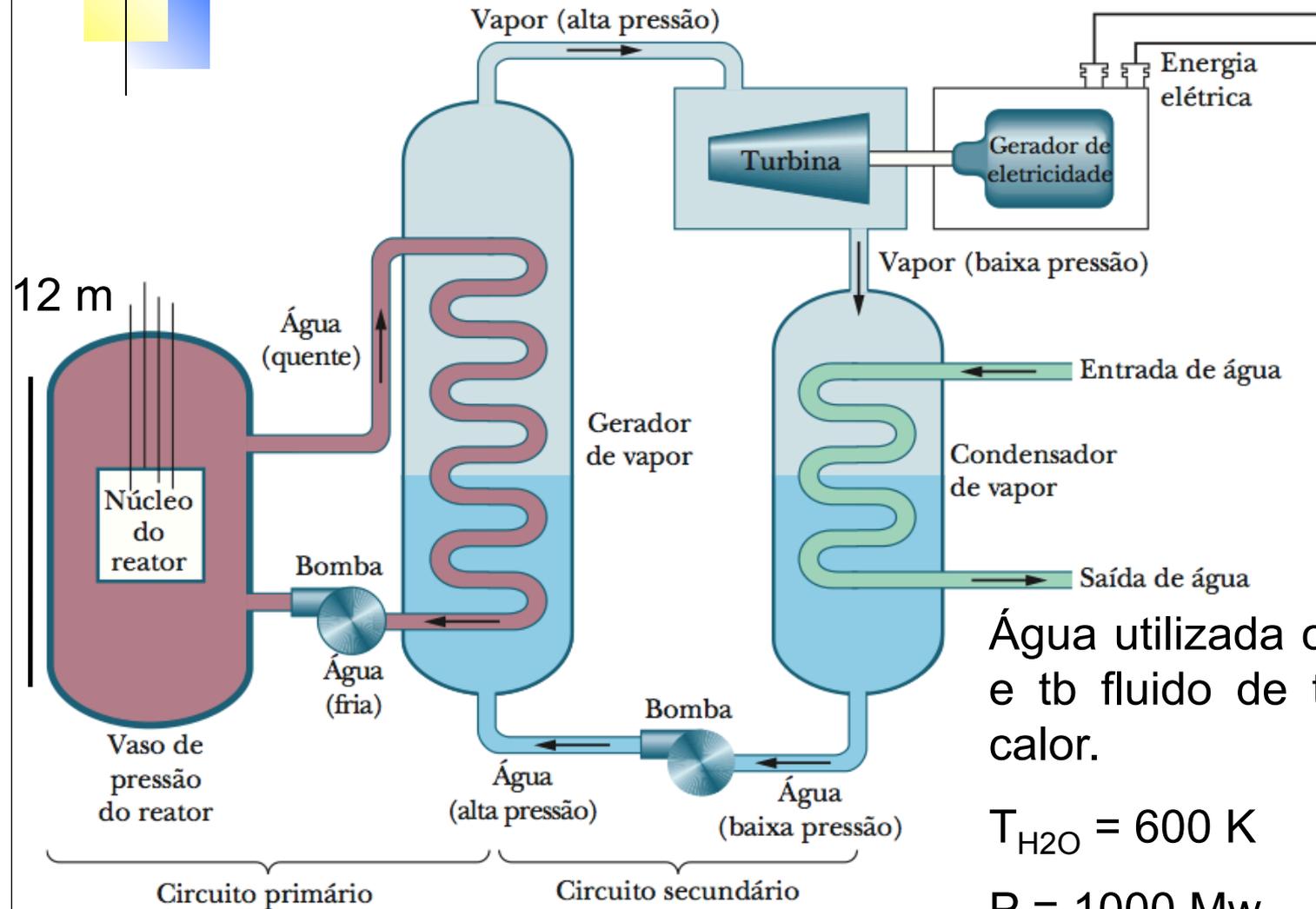
Porque então tanta preocupação com que países “não confiáveis” aprendam a enriquecer urânio?

- Porque quem aprende a enriquecer a 3.5% já sabe bastante para enriquecer a 90%. Já é metade do esforço!
- Países que sabem enriquecer (em geral) não ensinam a outros
- Problema de não proliferação (controle) X segredo industrial
- O Brasil está entre os poucos países que dominou essa tecnologia: o urânio usado em Angra I e II é enriquecido no centro nuclear de Aramar, perto de Resende (RJ)

Esquema de uma usina termoeletrica convencional



Reator Nuclear



Água utilizada como moderador e tb fluido de transferência de calor.

$$T_{\text{H}_2\text{O}} = 600 \text{ K}$$

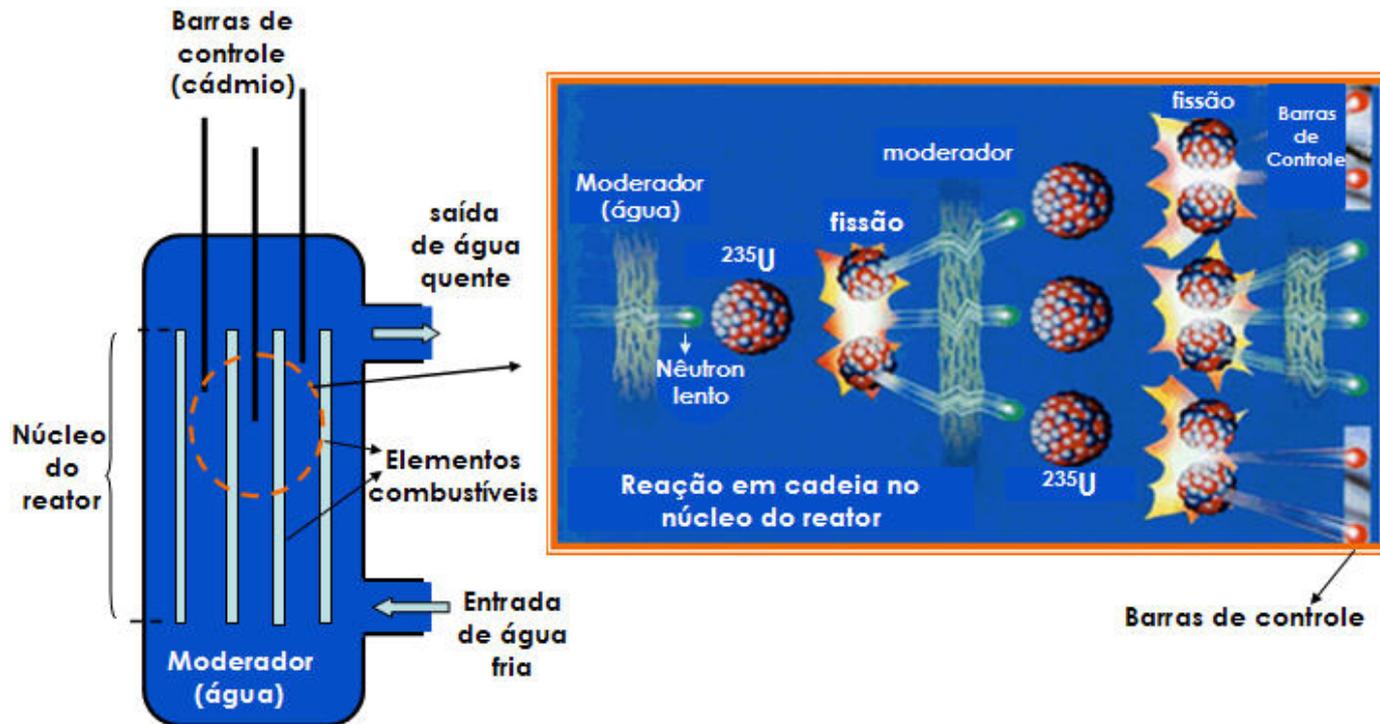
$$P = 1000 \text{ Mw}$$

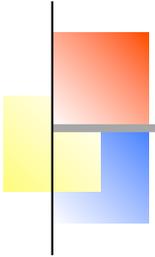
$$\text{Vazão} = 1 \text{ ML/min}$$

Reator Nuclear

Problemas e soluções:

- 1) Fuga de nêutrons pelas paredes: aumenta-se a razão superfície/volume.
- 2) Energia dos nêutrons – nêutrons ejetados tem energia de 2 MeV, necessita-se de um **moderador** (diminuir a energia de n sem absorvê-lo). O mais utilizado é H₂O (colisão nêutron – próton).



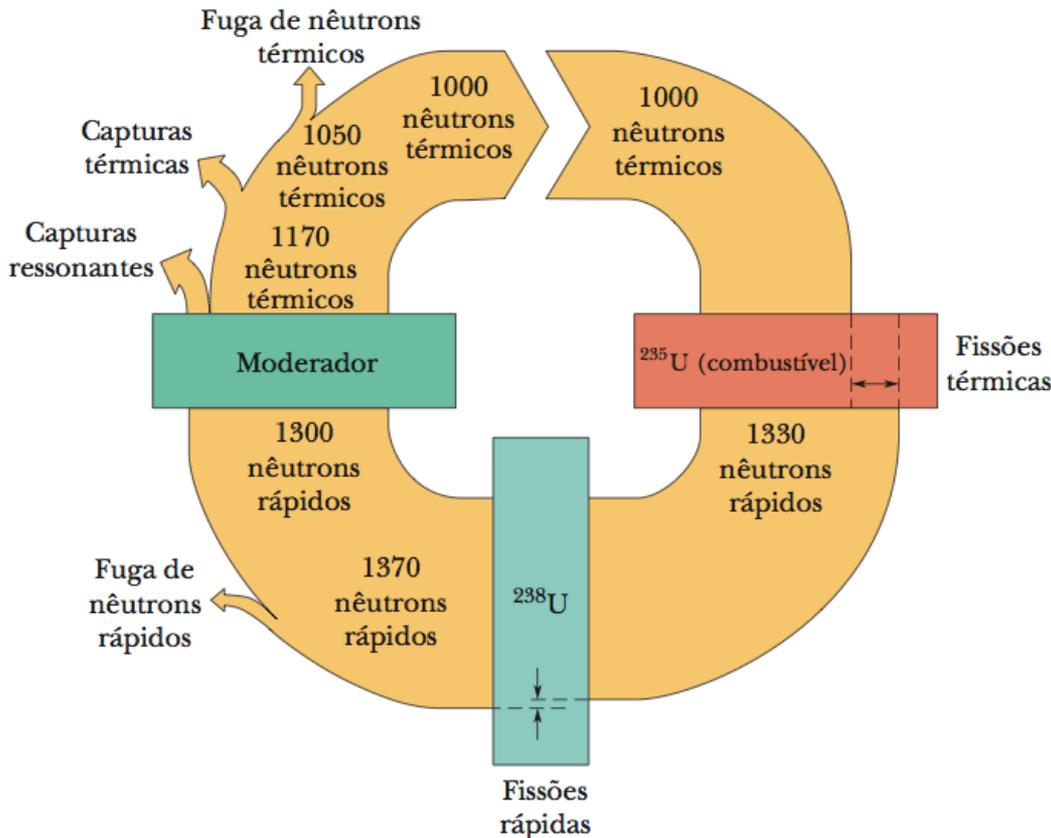


Reator Nuclear

Problemas :

- 1) Fuga de nêutrons pelas paredes – aumenta-se a razão superfície / volume.
- 2) Energia dos nêutrons – nêutrons ejetados tem energia de 2 MeV, necessita-se de um **moderador** (diminuir a energia de n sem absorve-lo). O mais utilizado é H₂O (colisão nêutron – próton).
- 3) Captura ressonante de nêutrons - entre 1 e 100 eV existe uma grande probabilidade de ²³⁸U absorver um nêutron (captura e emite um γ)
- 4) Captura térmica – às vezes ²³⁵U captura nêutrons térmico sem se fissionar

Reator Nuclear: ciclo de nêutrons



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

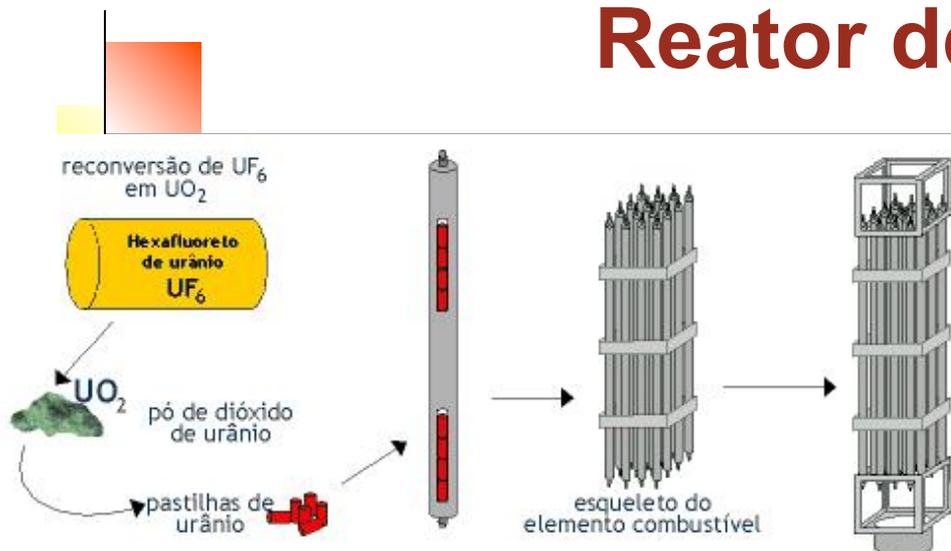
$k < 1$ – regime subcrítico: reação não se sustenta

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

$k = 1$ – regime crítico (ideal)

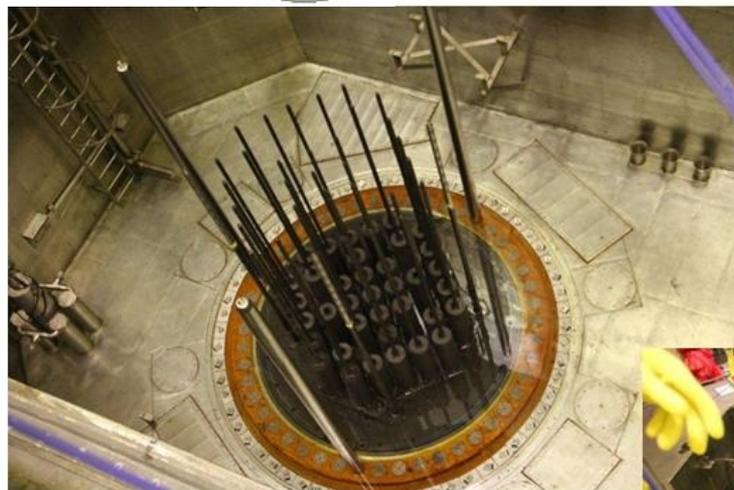
Para manter crítico: preparar com $k > 1$, e inserir **barras de controle** (materiais que absorvem nêutrons) no reator para baixar até $k = 1$

Reator de Angra

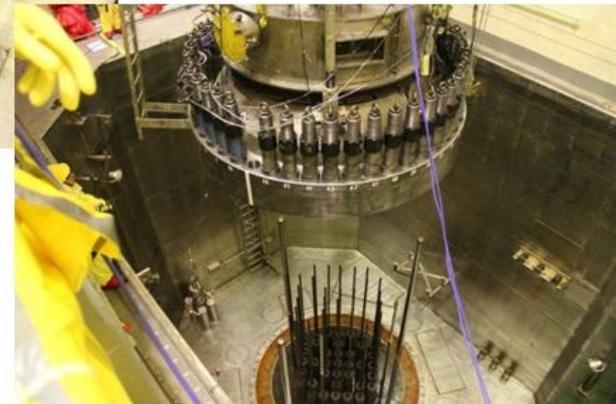


Varetas de combustível nuclear

À esquerda: detalhe das barras de controle de Angra 1



À direita: a cabeça do reator sendo acoplada ao sistema de barras de controle de Angra 1



Acidentes Nucleares: Chernobyl (1986)



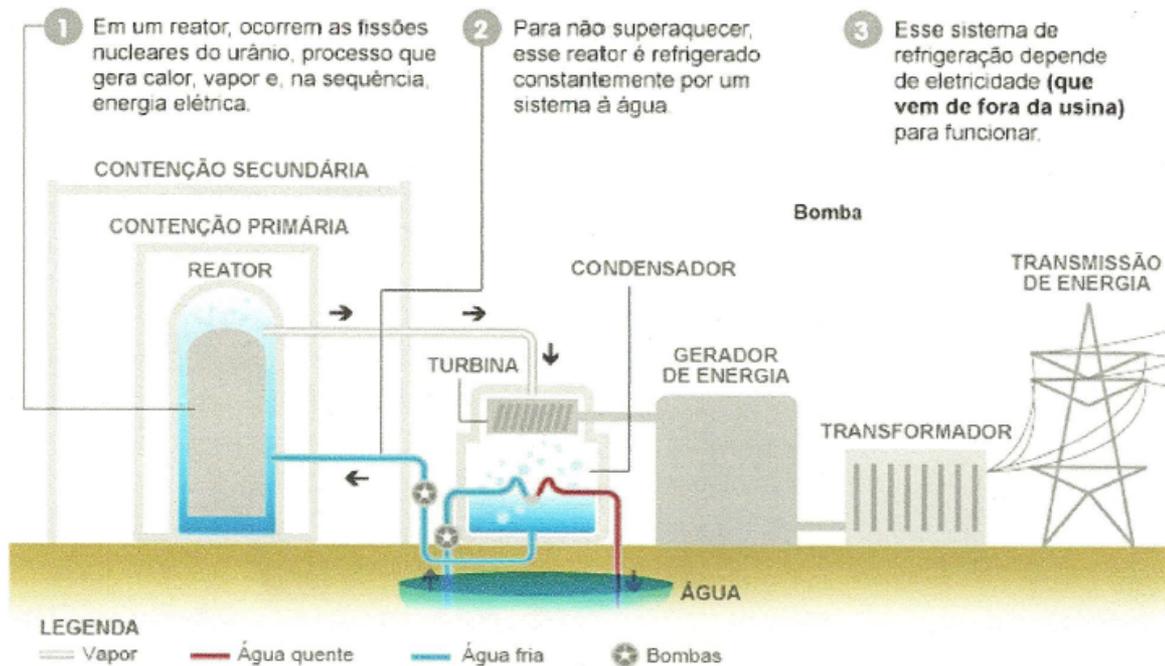
Local: União Soviética (hoje fronteira Ucrânia / Bielorrússia)

56 mortes (até agora): 47 trabalhadores e 9 crianças com câncer.

Causa: erro na inserção das barras de controle, levando a reação com $k > 1$ e derretimento do núcleo do reator

Acidentes Nucleares: Fukushima (2011)

Como funciona um reator nuclear de água fervendo



Causas:

1. falha no sistema de refrigeração devido à queda de energia e inundação provocados pelo terremoto e tsunami

2. acúmulo de gás hidrogênio devido a reações nucleares, e posterior explosão liberando material radioativo

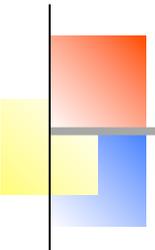
Embora ninguém tenha morrido diretamente por causa do acidente, uma grande área permanece interdita, e material radioativo segue se acumulando

4 Se a energia é cortada por algum motivo (como o blecaute provocado por terremoto), o resfriamento para de acontecer, a pressão e a temperatura dentro do reator sobem, e o núcleo do reator pode derreter. As barras de urânio também podem derreter, gerando gás e líquido radioativos.



5 Se o núcleo do reator derrete, o líquido e o gás radioativos vazam dentro de um contêiner maior. Se esse contêiner é danificado, há contaminação do meio ambiente.





Energia nuclear: prós e contras

Vantagens

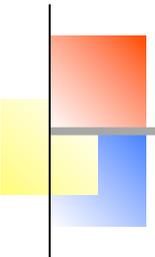
- É “limpa”, i.e., está entre as que causam menos danos ecológicos (se não houver acidentes): não polui a atmosfera, não alaga grandes regiões, não causa aquecimento global (efeito estufa).

Desvantagens

- É cara (custos de construção / enriquecimento / segurança / deposição de lixo radioativo/ descomissionamento de usinas...)
- Como o petróleo, o combustível um dia vai acabar
- Em caso de acidente, produz radiação no ambiente.
- Ainda não há solução para o lixo radioativo, em escala industrial (já se sabe como fazer, mas é caro e há perigo de proliferação de material para bombas).

As usinas estão sendo desativadas?

- A Alemanha fechou algumas usinas, e agora compra energia nuclear da França!!!!!! A China quer construir mais...



Usinas de 4a geração (para 2030)

- Estas usinas são chamadas de “intrinsecamente seguras”.
- Reator arrefecido a gás que utiliza urânio em grãozinhos dentro de esferas de grafite pirolítica.
- Se o reator parar, o calor residual é absorvido pela corrente de ar.
- Não precisa de sistema de resfriamento, a temperatura não ultrapassa 1600° C, evitando o perigo de liberação de radioatividade.

Fusão Nuclear

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

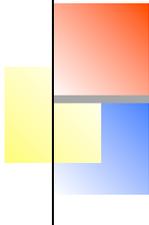
1939: Elucidação completa da fusão estelar (H. Bethe)

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....



Fusão Nuclear

Uma vantagem: mais energia por massa de combustível !

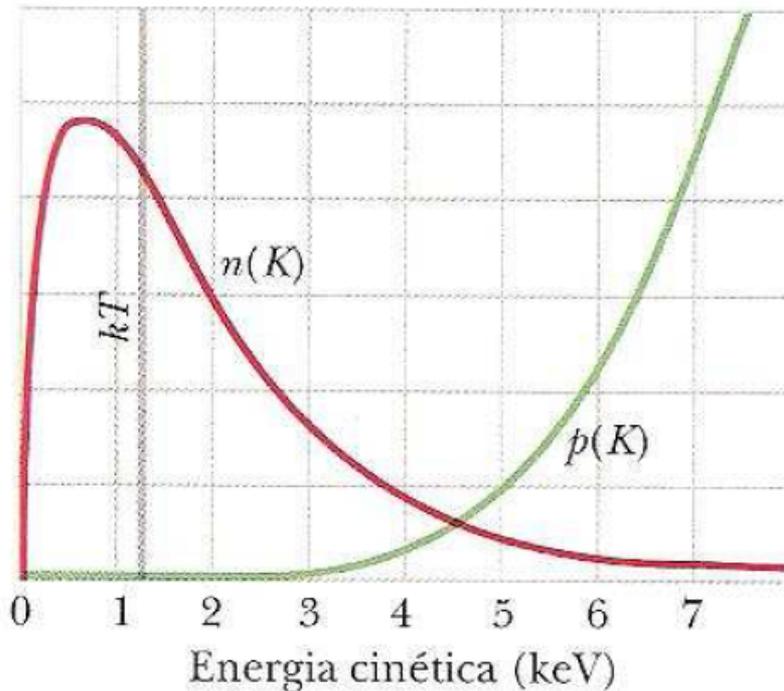
Ex: Determine a energia liberada por unidade de massa na fissão do ^{235}U e na fusão de deutério e trítio.

Dados: $m(^{235}\text{U}) = 235,043924 \text{ u}$; $m(^2\text{H}) = 2,014102\text{u}$; $m(^3\text{H}) = 3,016049$ ($u = 1,00866491600 \text{ kg}$)



R: $^{235}\text{U} - 4,95 \times 10^{26} \text{ MeV/kg}$; para Fusão: Deutério + trítio = $2,11 \times 10^{27} \text{ MeV/kg}$ – repare que é 4,3 vezes maior.

Fusão Termonuclear no Sol



- Probab. de fusão x K
- num. de prótons x K

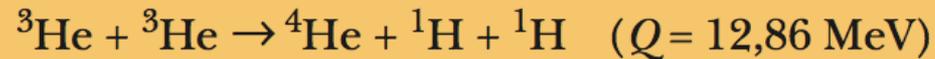
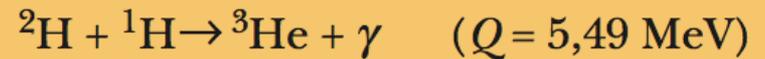
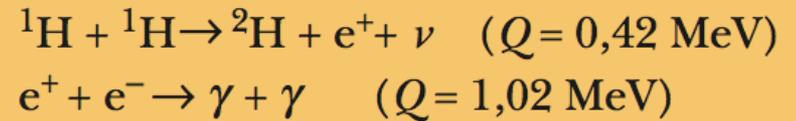
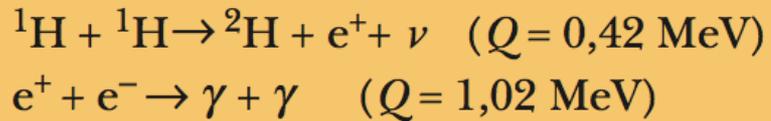
$K = kT$ (energ. cinética típica): **1,3 keV** na temp. do núcleo solar ($1,5 \times 10^7$ K)

Barreira de potencial eletrostático para prótons: **400 keV** (muito maior!!)

Somente uma fração minúscula de prótons têm essa energia – mas mesmo assim são muitos numa estrela ! Suficiente p/ sustentar fusão!

Fusão Termonuclear no Sol

Ciclo próton-próton



- 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.

Supernovas

Supernova SN1987A



Com o tempo, os elementos leves vão se fundindo sucessivamente em mais pesados, até produzir um núcleo estelar de ferro que vai crescendo. Se o núcleo passa de um tamanho-limite, ele não se sustenta mais contra as enormes pressões gravitacionais, e entra em colapso. A estrela implode, tornando-se uma estrela de nêutrons ou um buraco negro, ao mesmo tempo ejetando violentamente suas camadas externas em uma explosão chamada **Supernova**.

Massas similares à do nosso sol!
Extrema gravidade!

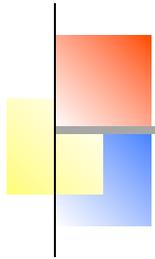
Neutron Star

Vancouver

ESTRELAS DE NÊUTRONS



Fusão termonuclear controlada



Ciclo próton-próton

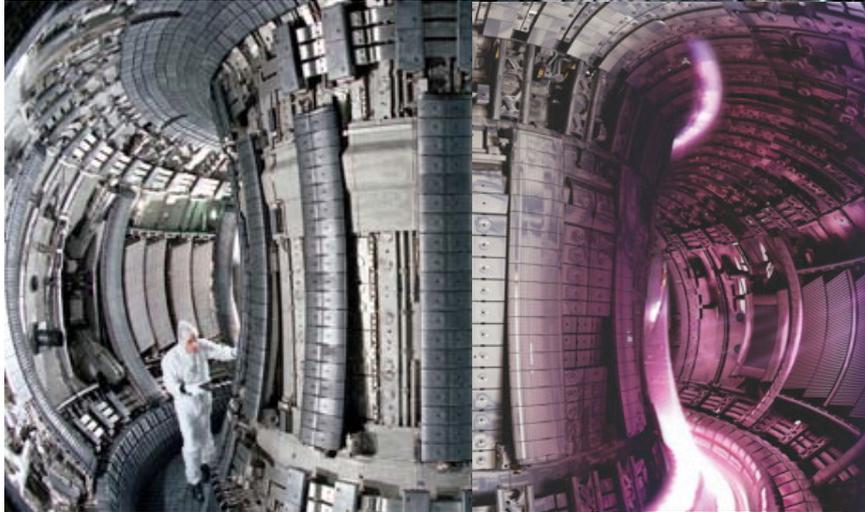


Condições necessárias:

- 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).

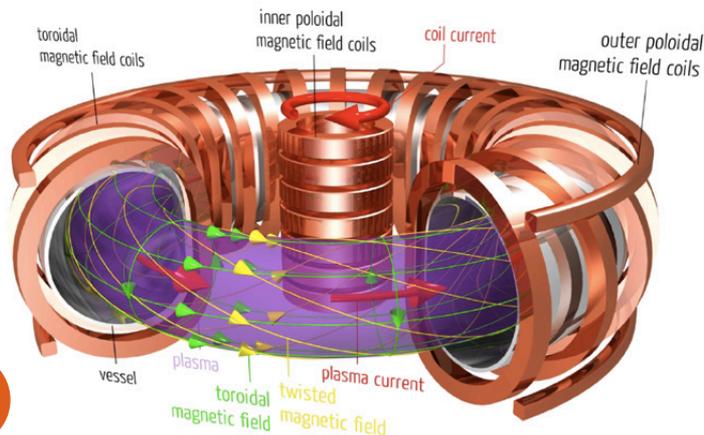
Fusão por confinamento magnético

Tokamak



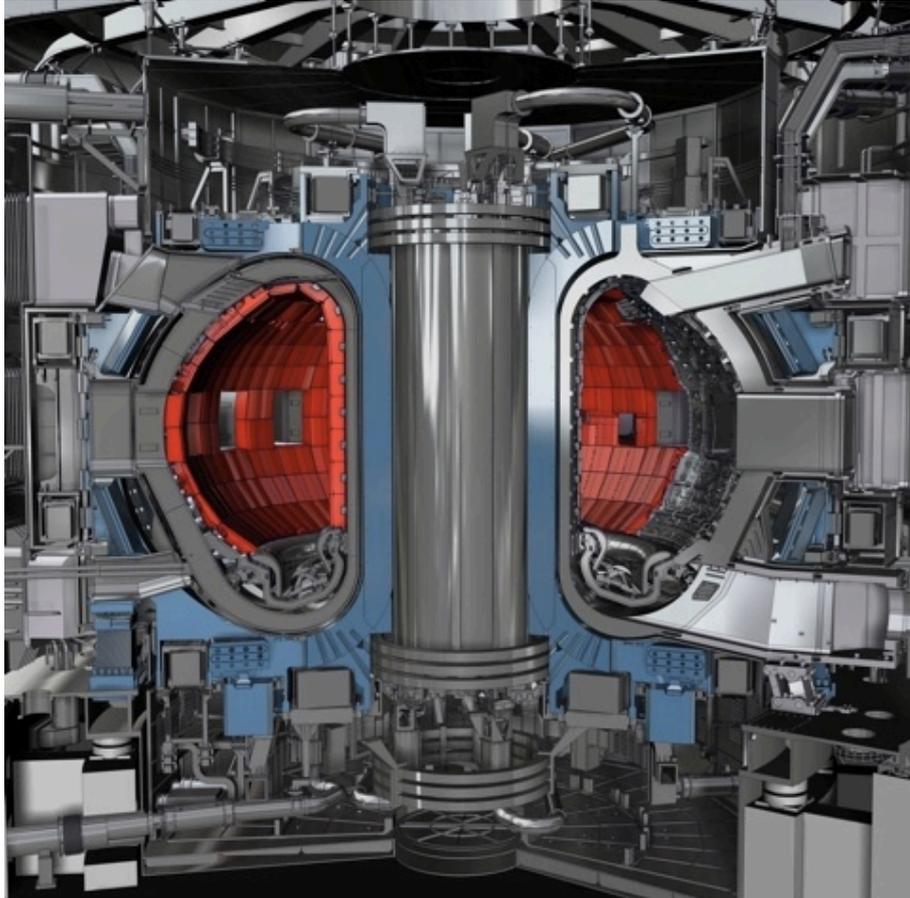
Muitos problemas de engenharia:

- 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.



Fusão por confinamento magnético

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

Fusão por confinamento inercial

Laser para fusão nuclear. (NIF / EUA)

Potência: 500 TW (10^{12} W) para fundir uma cápsula de deutério (H com um nêutron).



Também tem problemas

- Em 2015, pela 1ª vez fusão produziu mais energia que a injetada nas cápsulas, mas isso é só uma fração minúscula da energia necessária para gerar os lasers e focá-los nas cápsulas (muitas perdas)
- Sem previsão de quando alcançaria aplicação comercial

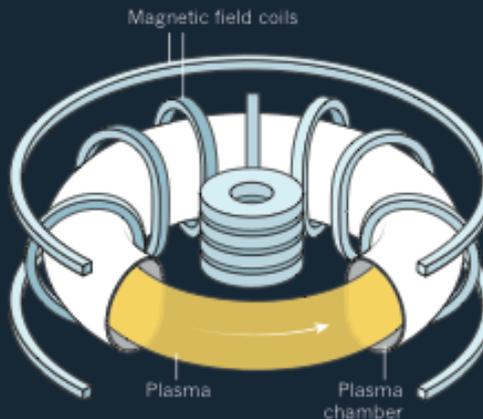
Outros caminhos para a Fusão?

TRAPPING FUSION FIRE

When a superhot, ionized plasma is trapped in a magnetic field, it will fight to escape. Reactors are designed to keep it confined for long enough for the nuclei to fuse and produce energy.

A CHOICE OF FUELS

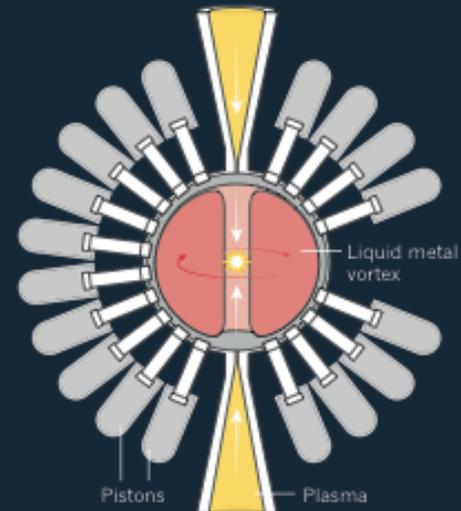
Many light isotopes will fuse to release energy. A deuterium-tritium mix ignites at the lowest temperature, roughly 100 million kelvin, but produces neutrons that make the reactor radioactive. Other fuels avoid that, but ignite at much higher temperatures.



TOKAMAK

(ITER AND MANY OTHERS)

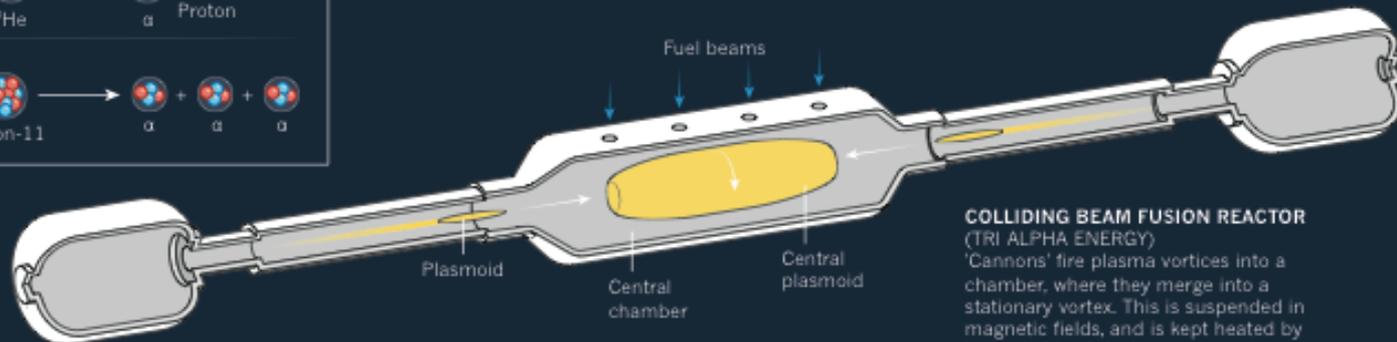
Multiple coils produce magnetic fields that hold the plasma in the chamber. A coil through the centre drives a current through the plasma to keep it hot.



MAGNETIZED TARGET REACTOR

(GENERAL FUSION)

Magnetized rings of plasma are injected into a vortex of liquid metal. Pistons punch the metal inwards, compressing the plasma to ignite fusion.



COLLIDING BEAM FUSION REACTOR

(TRI ALPHA ENERGY)

'Cannons' fire plasma vortices into a chamber, where they merge into a stationary vortex. This is suspended in magnetic fields, and is kept heated by beams of fresh fuel.

Outros caminhos para a Fusão?

