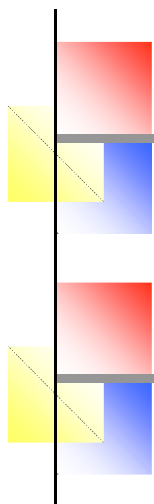


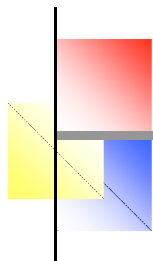
Universidade Federal Fluminense
Instituto de Física
Física IV



Energia Nuclear
Cap. 43 (Halliday)

Daniel

Niterói, 12 de novembro de 2014



Energia e Processos

Energia extraída de 1 kg de material

$$Q = \Delta mc^2$$

Tabela 43-1

Energia Liberada por 1 kg de Matéria

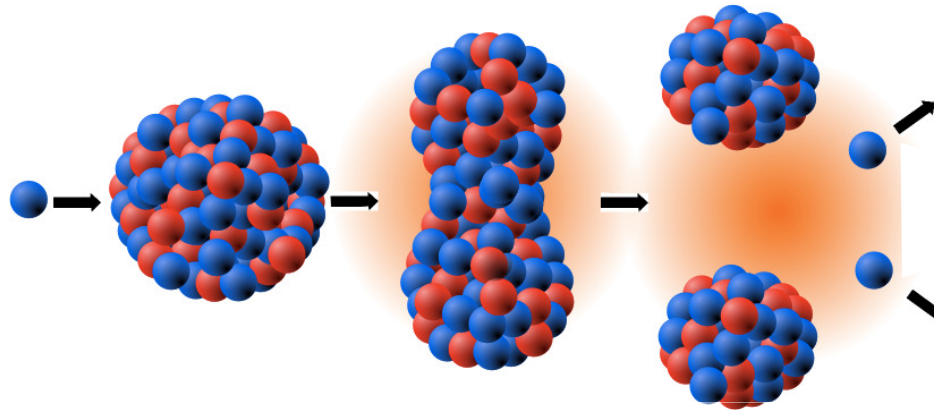
Forma de Matéria	Processo	Tempo ^a
Água	Queda d'água de 50 m	5 s
Carvão	Combustão	8 h
UO ₂ Enriquecido	Fissão em um reator	690 anos
²³⁵ U	Fissão total	3×10^4 anos
Deutério	Fusão total	3×10^4 anos
Matéria e antimatéria	Aniquilação total	3×10^7 anos

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

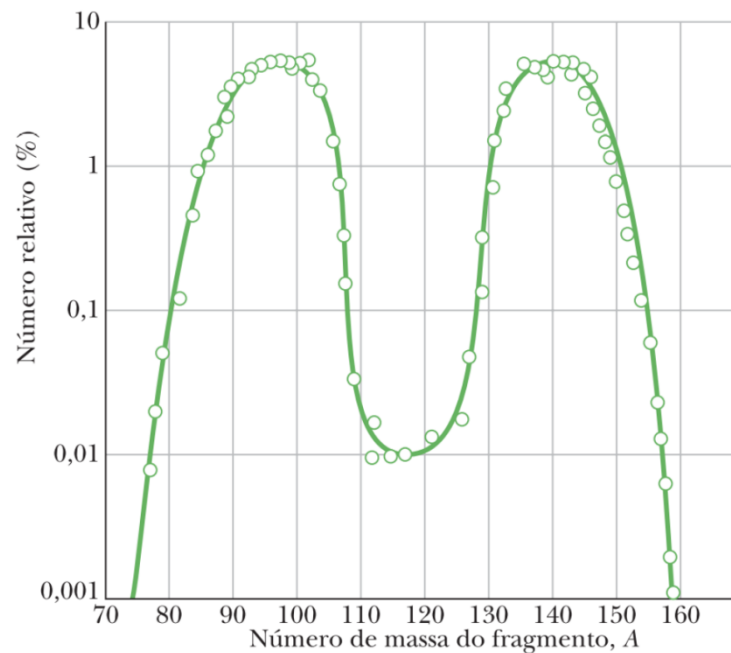
Fissão Nuclear

Ex: Urânio - ^{235}U

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

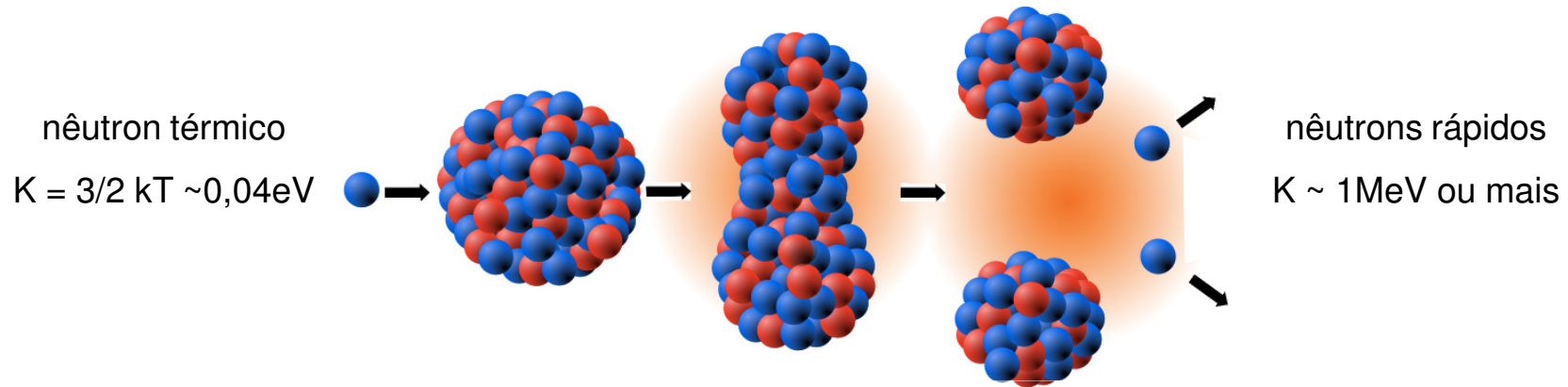


nêutrons rápidos
 $K \sim 1\text{MeV}$ ou mais



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

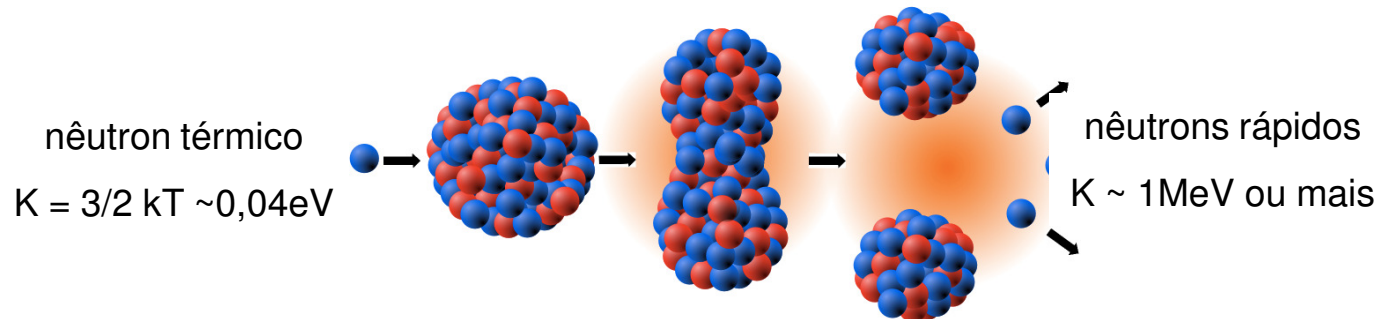
Fissão Nuclear



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

$^{140}\text{Xe} \rightarrow ^{140}\text{Cs} \rightarrow ^{140}\text{Ba} \rightarrow ^{140}\text{La} \rightarrow ^{140}\text{Ce}$						$^{94}\text{Sr} \rightarrow ^{94}\text{Y} \rightarrow ^{94}\text{Zr}$			
$T_{1/2}$	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



$^{140}\text{Xe} \rightarrow ^{140}\text{Cs} \rightarrow ^{140}\text{Ba} \rightarrow ^{140}\text{La} \rightarrow ^{140}\text{Ce}$						$^{94}\text{Sr} \rightarrow ^{94}\text{Y} \rightarrow ^{94}\text{Zr}$			
$T_{1/2}$	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

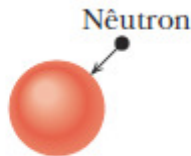
Ex. 43.1 - Determine a energia de desintegração para o evento de fissão acima (considerar o produto final ^{140}Ce e ^{94}Zr). As massas são:

^{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 .



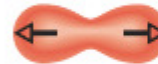
(a)

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



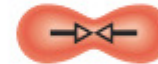
(b)

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



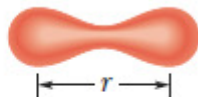
(c)

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.



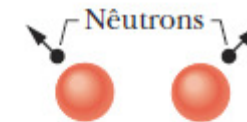
(f)

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

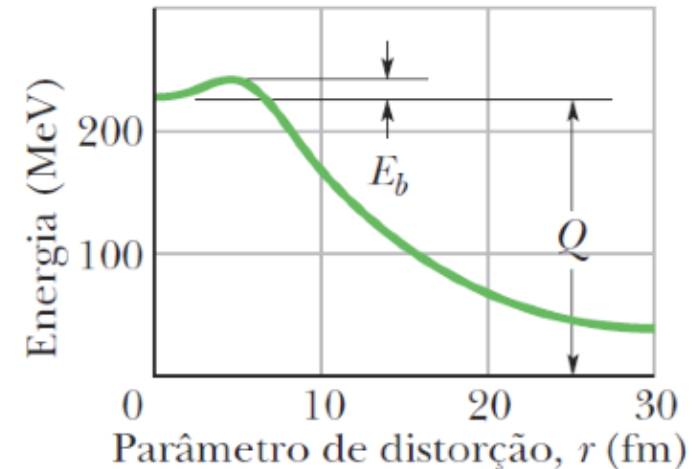


Tabela 43-2

Energia de Excitação e Barreira de Potencial para Quatro Núclídeos Pesados

Núclídeo Inicial	Núclídeo 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 .

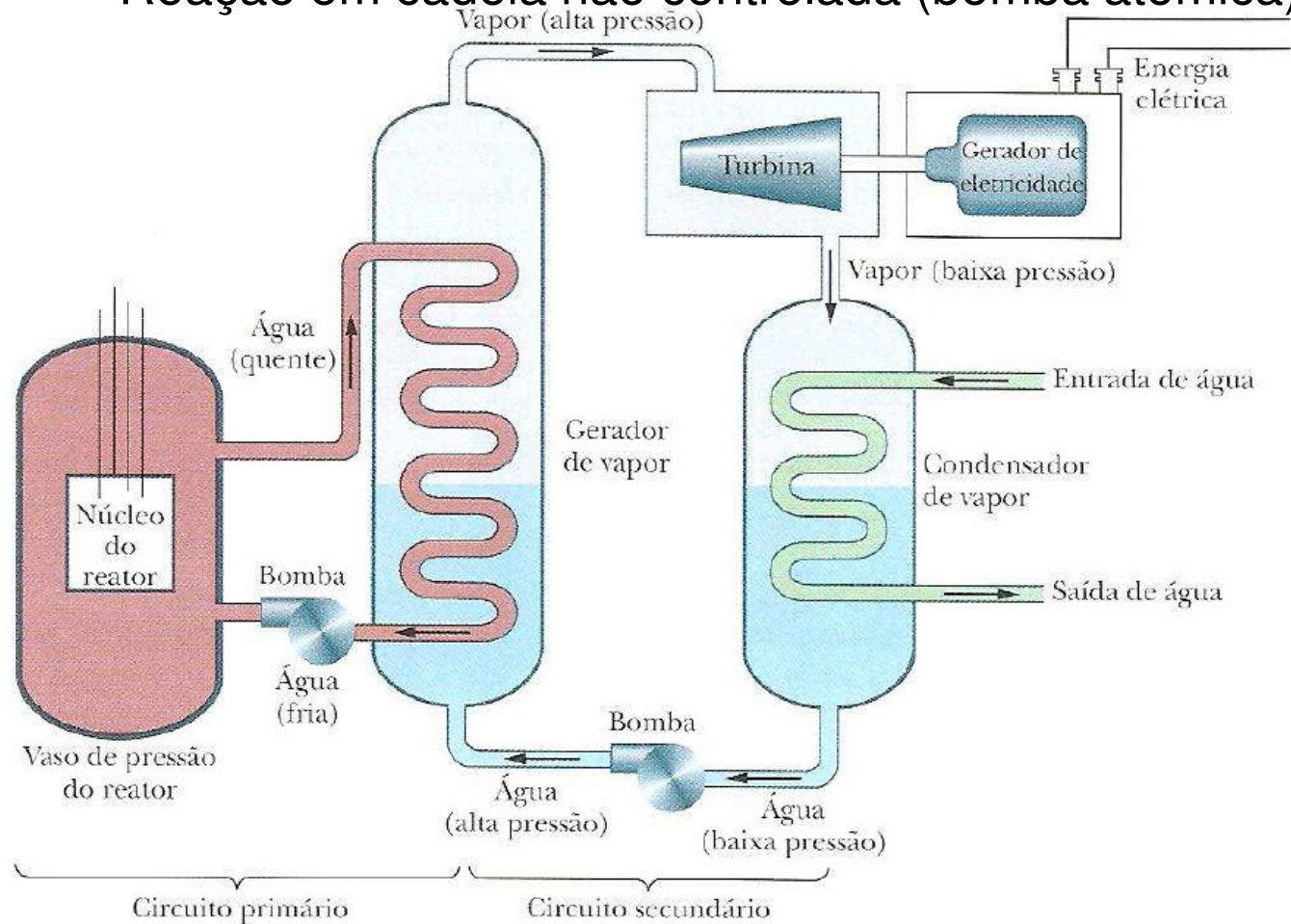
Qual a energia que o nêutron térmico acrescenta ao núcleo?

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

Reator Nuclear

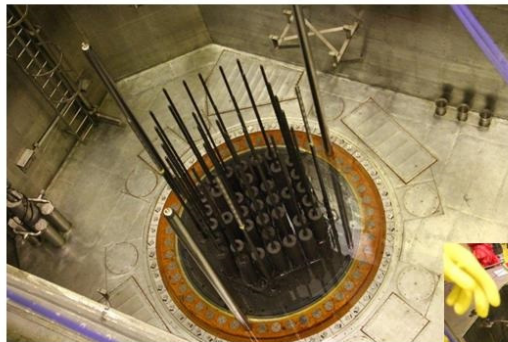
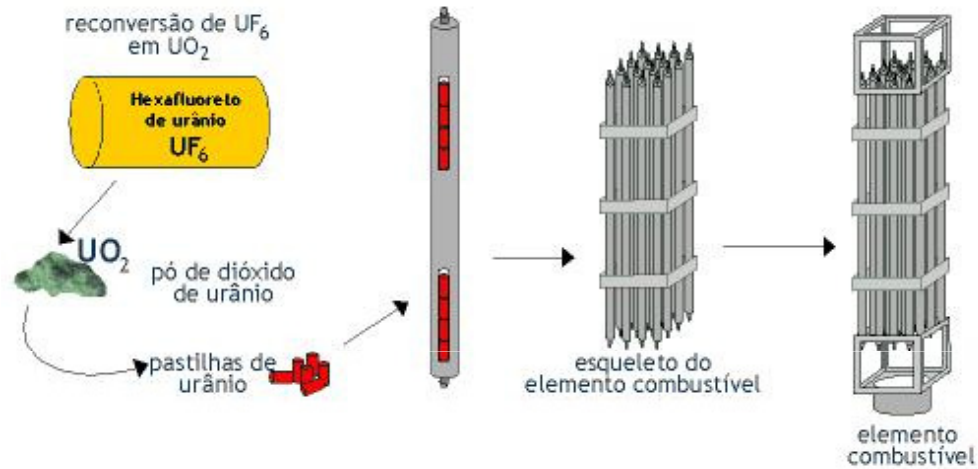
Reação em cadeia controlada (reator nuclear)

Reação em cadeia não controlada (bomba atômica)

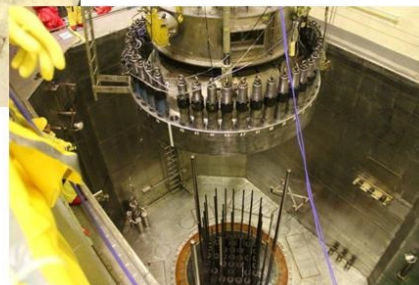


Reator Nuclear

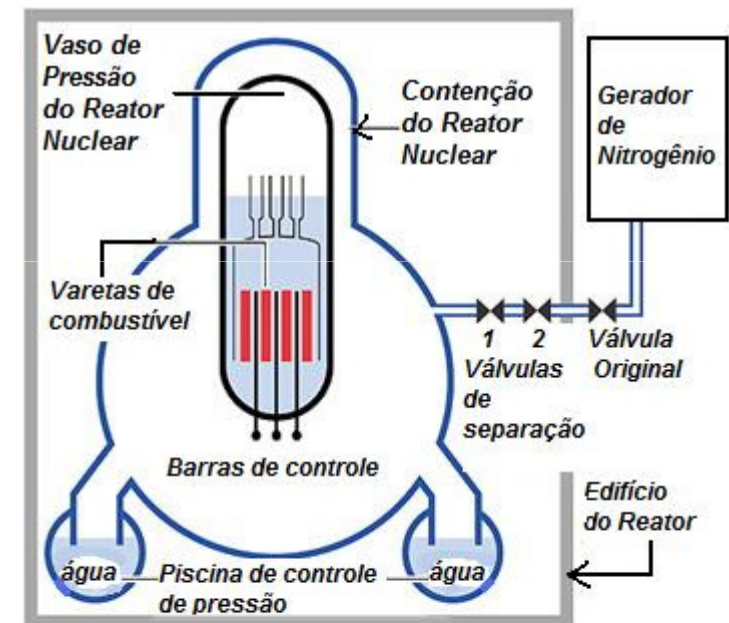
Varetas de combustível nuclear



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





Reator Nuclear

Reação em cadeia controlada (reator nuclear)

Reação em cadeia não controlada (bomba atômica)

Urânio natural contém 0,7 % ^{235}U o restante de ^{238}U . Enriquecimento de urânio é chegar a 3% de ^{235}U .

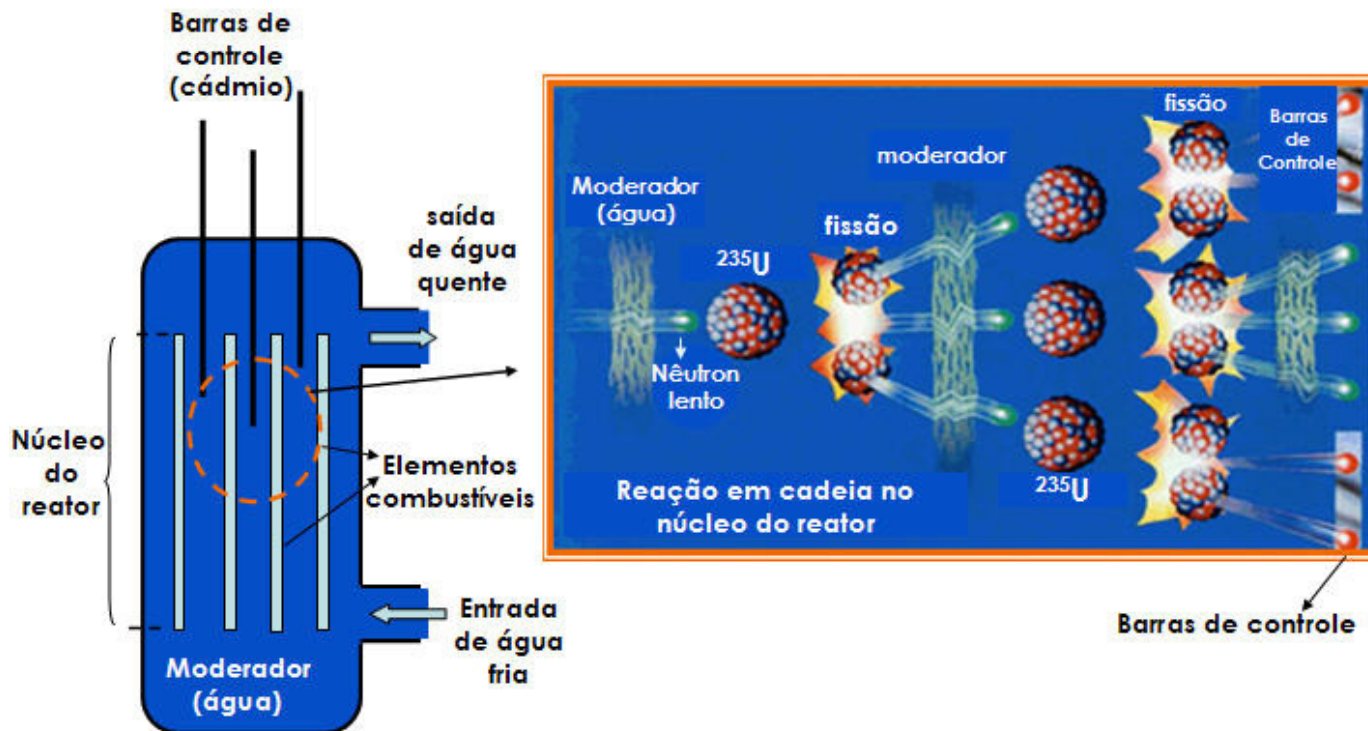
Problemas:

- 1) Fuga de nêutrons – 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 H_2O (colisão nêutron – próton).
- 3) Captura do nêutron - entre 1 e 100 eV existe uma grande probabilidade de ^{238}U absorver o nêutron (captura e emite um γ)

Reator Nuclear

Problemas:

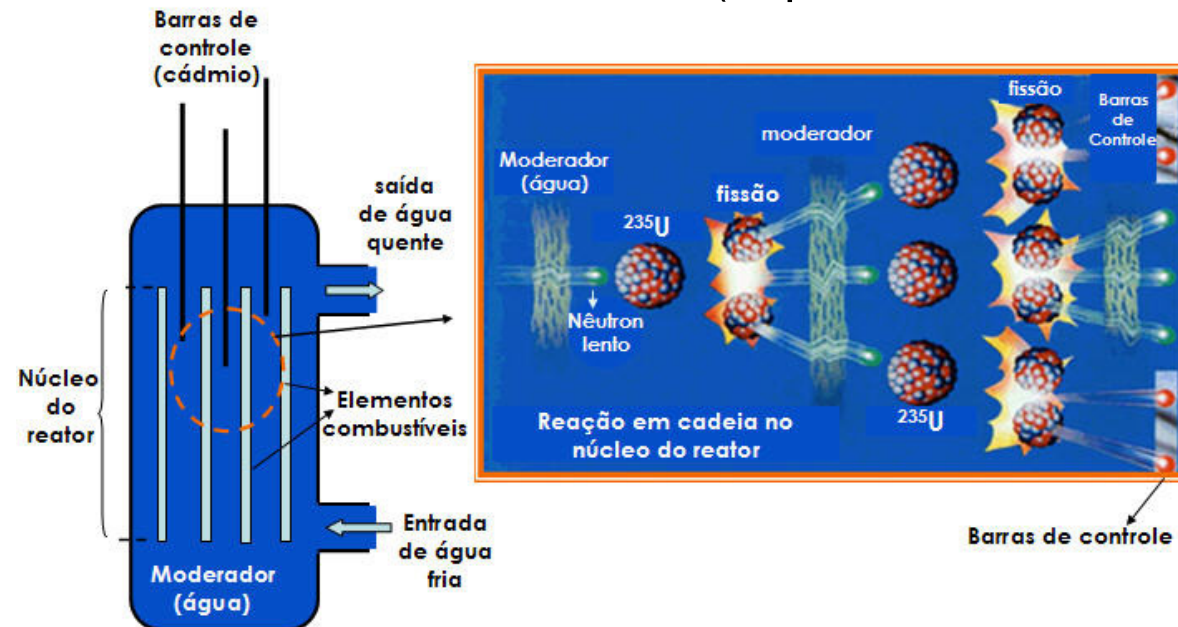
- 1) Fuga de nêutrons – aumenta-se a razão superfície volume.
- 2) Energia dos nêutrons – nêutrons ejetados tem energia de 2 MeV, necessita-se de um **moderador** (diminuir a energia de n sem absorve-lo). O mais utilizado é H₂O (colisão nêutron – próton).



Reator Nuclear

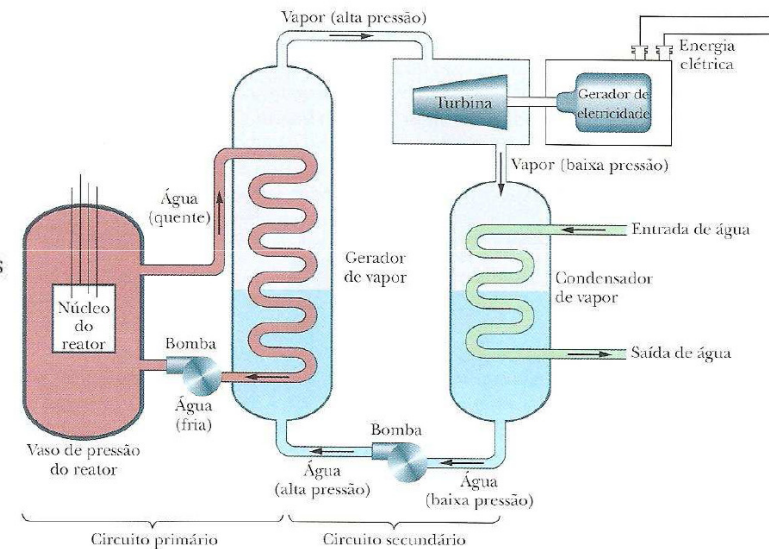
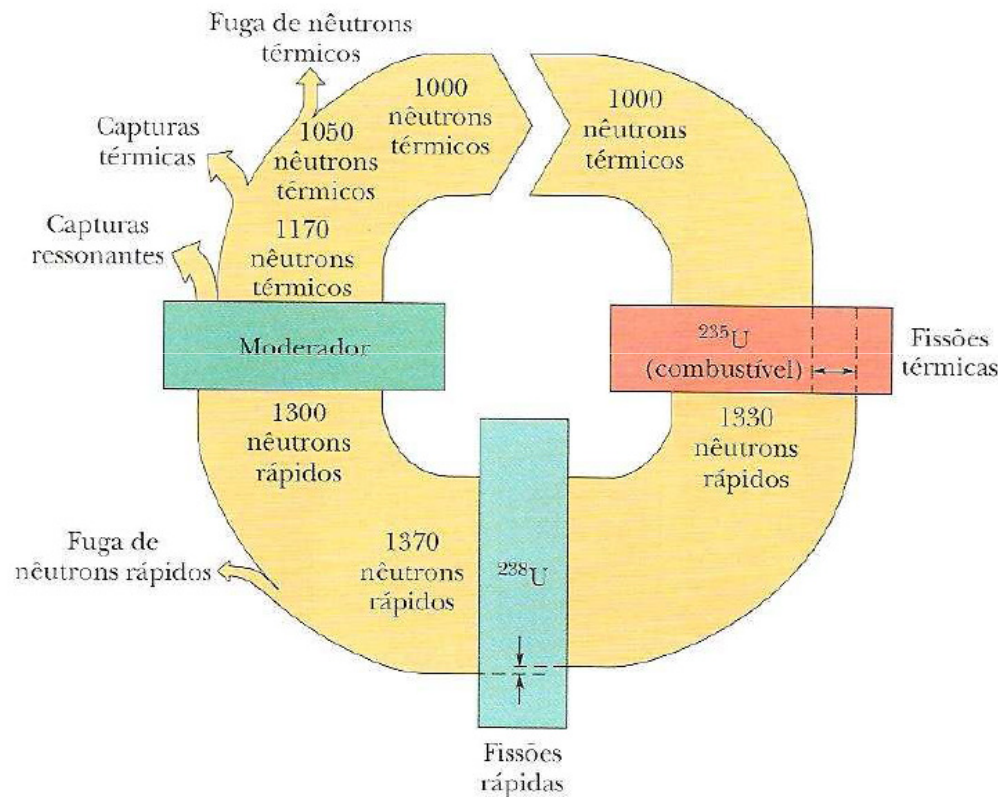
Problemas:

- 1) Fuga de nêutrons – 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 do nêutron - entre 1 e 100 eV existe uma grande probabilidade de ²³⁸U absorver o nêutron (captura e emite um γ)



Reator Nuclear

Ciclo (geração) de nêutrons



Captura ressonante - ^{238}U captura nêutrons com energia (1 e 100 eV)

Captura térmica - ^{235}U captura o nêutron sem se fissar

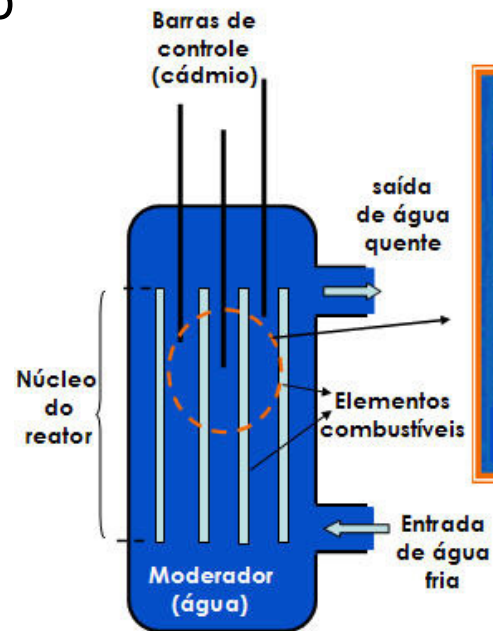
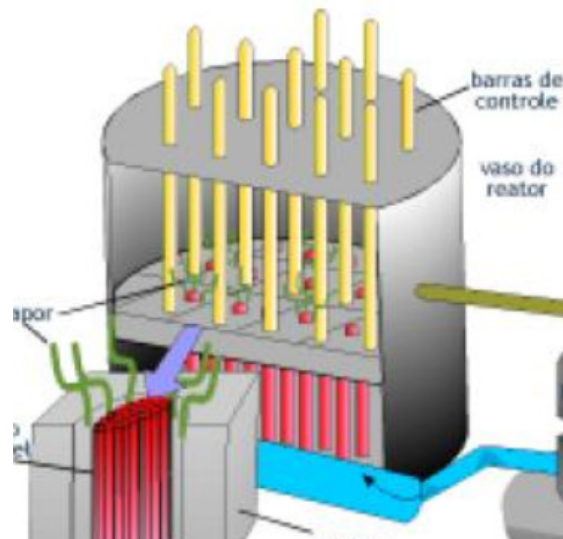
Reator Nuclear

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

$k = 1$ – regime crítico

$k < 1$ – regime subcrítico

$k > 1$ – supercrítico



Reator Nuclear

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

$k = 1$ – regime crítico



Acidente de Chernobyl (1986)

Até agora 56 mortes.

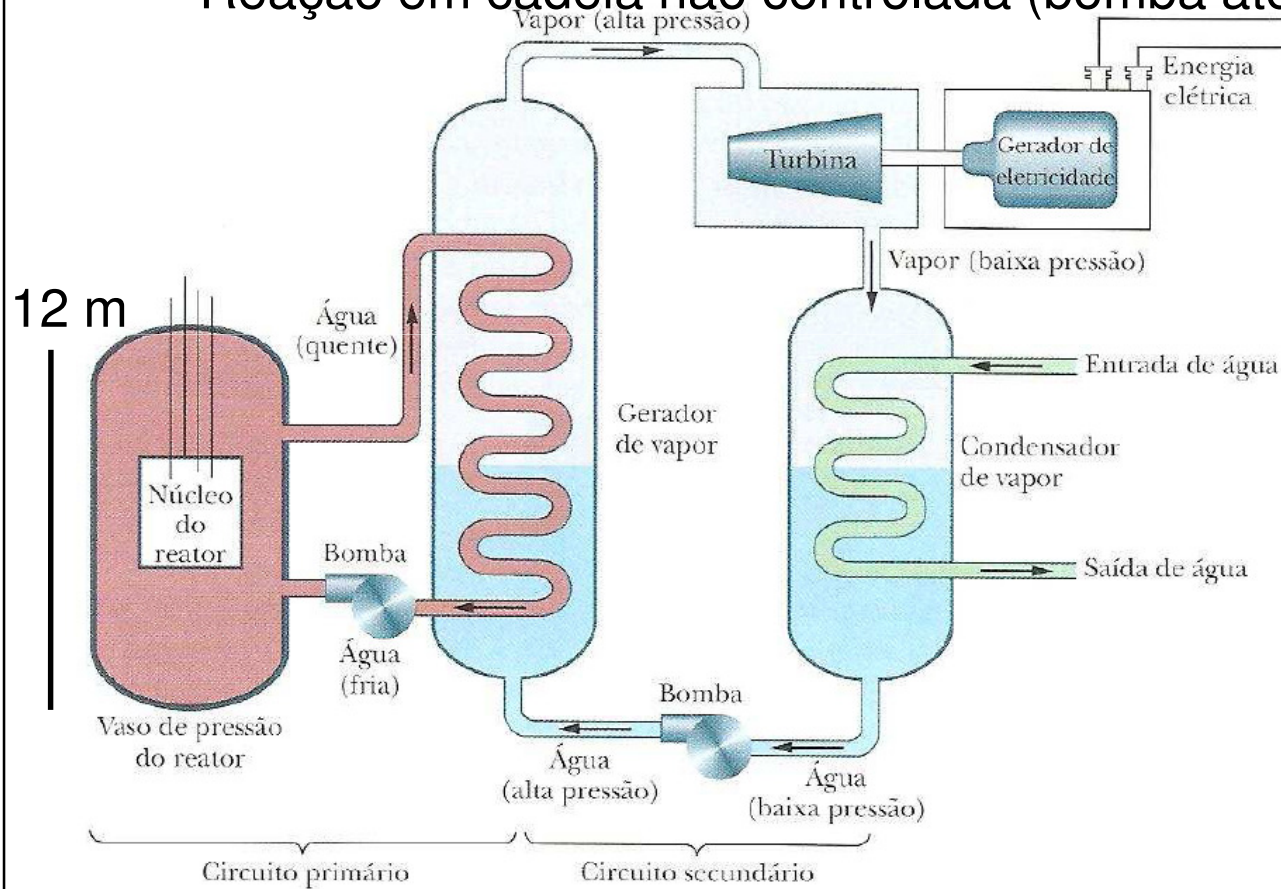
47 trabalhadores e 9 crianças
com câncer.

Erro na inserção das barras de
controle.

Reator Nuclear

Reação em cadeia controlada (reator nuclear)

Reação em cadeia não controlada (bomba atômica)



Água utilizada como moderador e fluído de transferência de calor.

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

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

$$\text{Vazão} = 1 \text{ ML/min}$$

$$\text{Massa} \sim 10^6 \text{ kg}$$

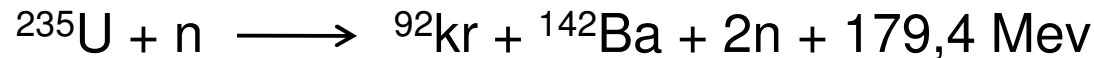
Fusão (vantagem?)



Energia por massa

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

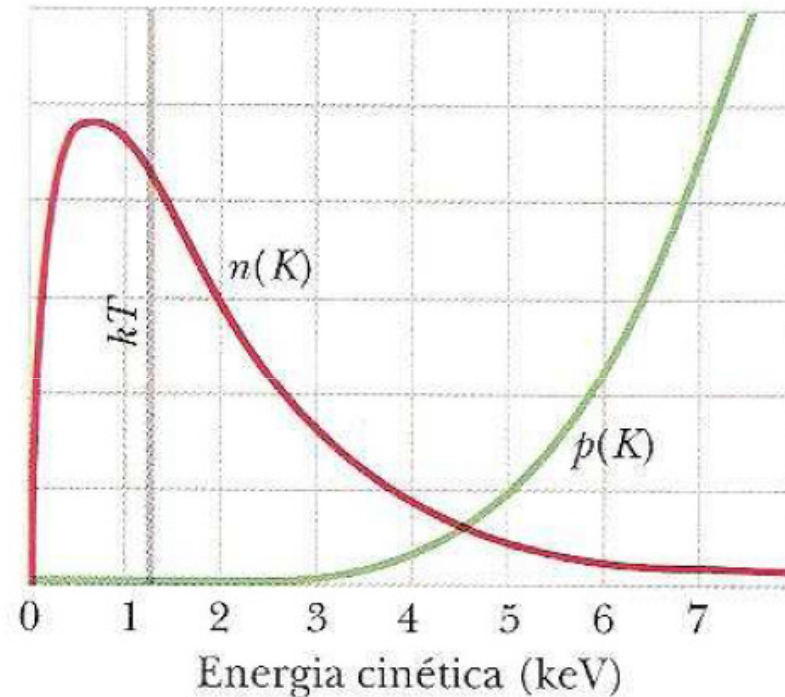
Dados: $m(^{235}\text{U}) = 235,043924 \text{ u}$; $m(^2\text{H}) = 2,014102\text{u}$; $m(^3\text{H}) = 3,016049$ ($\text{u} = 1,00866491600 \text{ kg}$)



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

Probabilidade de tunelamento – energia cinética dos prótons.

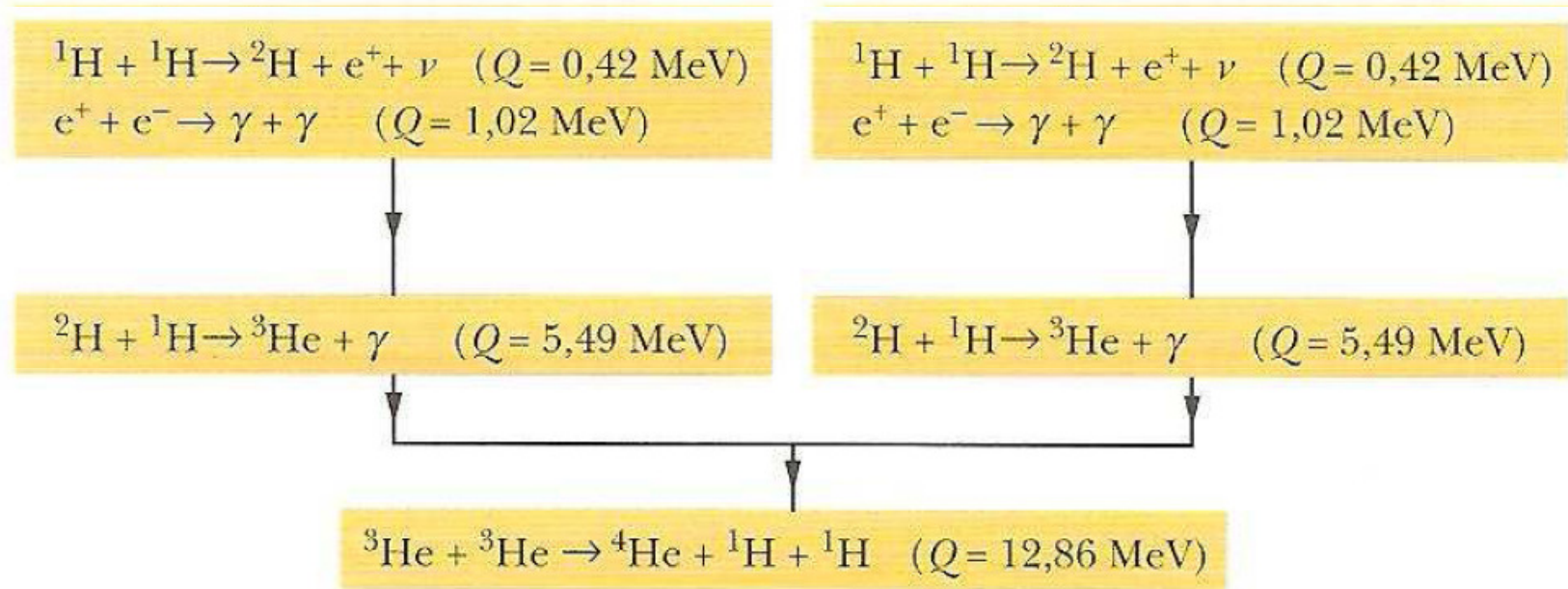


$K = kT$ (velocidade mais provável) – sol $T = 1,5 \times 10^7$ K; $K = 1,3$ keV.

Barreira de potencial: 400 keV

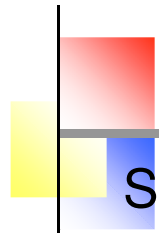
Fusão termonuclear (sol)

Ciclo próton-próton

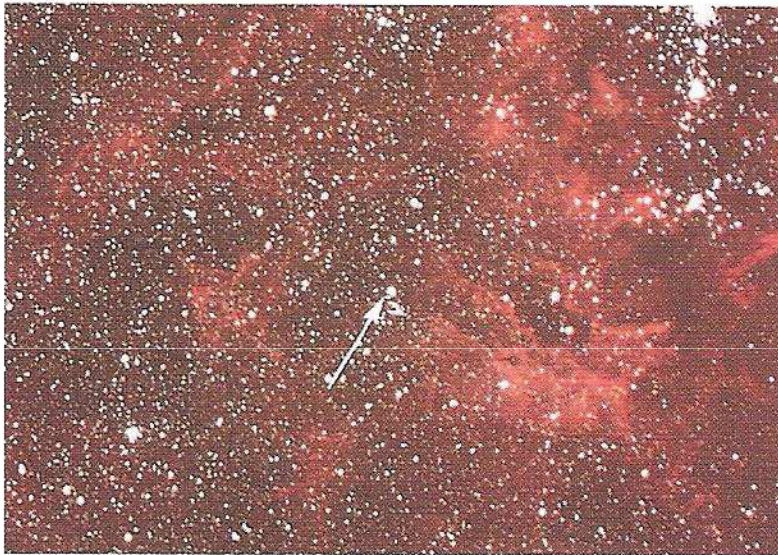


- 1) Uma em cada 10^{26} colisões acontece a fusão pp. 10^{12} kg/s
- 2) 10^5 anos é o tempo para que $^3\text{He} + ^3\text{He}$ se encontrem e se fundam.
- 3) Acabando o Hidrogênio, o sol começa a se resfriar e encolher, aquecendo e expandindo as camadas externas (gigante vermelha).
- 4) Quando acabar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

Fusão termonuclear (sol)



Sol (gigante vermelha)

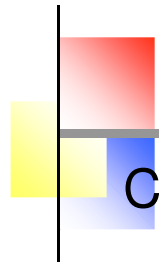


(b)

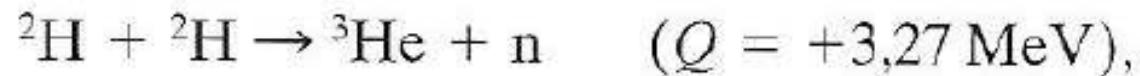


- 1) Uma em cada 10^{26} colisões acontece a fusão pp. 10^{12} kg/s
- 2) 10^5 anos é o tempo para que $^3\text{He} + ^3\text{He}$ se encontrem e se fundam.
- 3) Acabando o Hidrogênio, o sol começa a se resfriar e encolher, aquecendo e expandindo as camadas externas (gigante vermelha).
- 4) Quando acabar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

Fusão termonuclear controlada



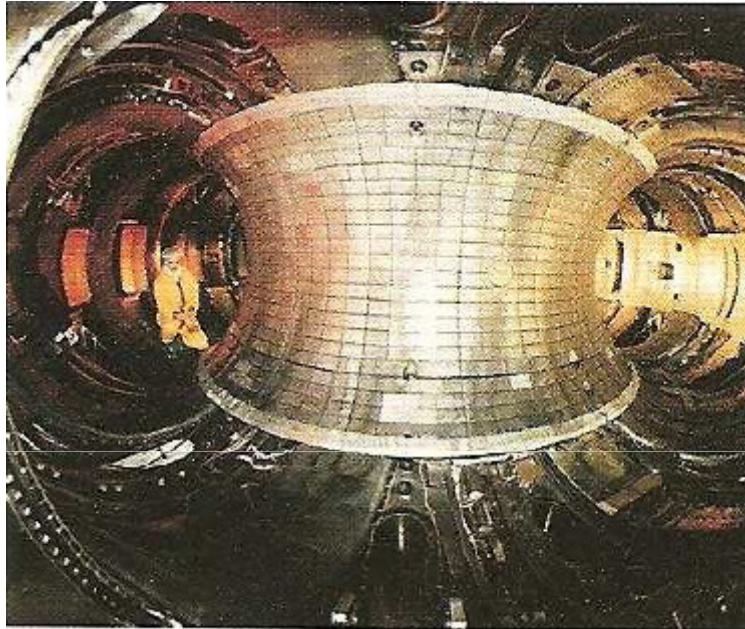
Ciclo próton-próton



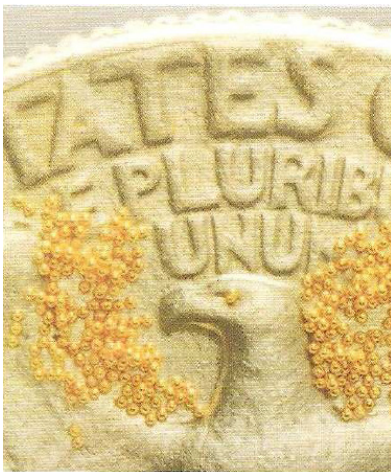
Condições necessárias:

- 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 produza mais energia do que a consumida).

Fusão (reatores)



Confinamento magnético



Confinamento por inércia

Emissão estimulada e lasers

Laser para fusão nuclear.

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

