

**MATERIAIS DE APLICAÇÃO NA ENGENHARIA NUCLEAR**





**Materiais dos Reactores Nucleares**



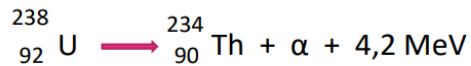
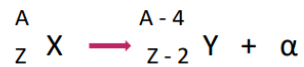
**Prof. Arnaldo Andrade e Raquel Lobo**



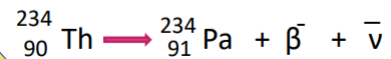
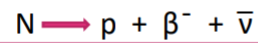
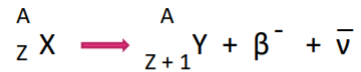
**Ipen**



### Decaimento alfa ( $\alpha$ )



### Decaimento beta ( $\beta$ )



## Decaimento $\gamma$

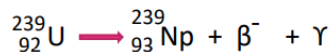
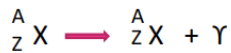
$\gamma$  é um fóton de alta energia  $\longrightarrow$  comprimento de onda muito curto  
( $\lambda = 0,0005 - 0,1 \text{ nm}$ )

Emissão  $\gamma$  acompanha a maioria das reações nucleares e resulta de uma mudança de energia dentro do núcleo

Um núcleo excitado resultante de uma emissão  $\alpha$  ou  $\beta$ , libera um fóton passando para um nível de energia mais baixo & mais estável

## Decaimento $\gamma$

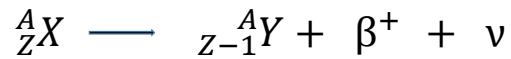
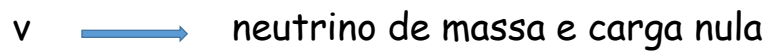
Emissão  $\gamma$  não muda o número atômico nem o número de massa!!



Existe ainda dois outros tipos de radioatividade:

- emissão pósitron  $\beta^+$  ( $e^+$ )
- captura eletrônica (elétron da camada K do átomo)

### Emissão pósitron - $\beta^+$

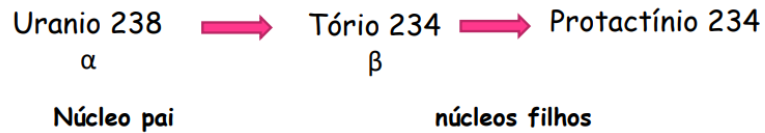


### Captura Eletrônica

Captura de um elétron orbital próximo ao núcleo (geralmente da camada K)  
Núcleo resultante possui um próton a menos



Transformações Radioativas  
Núcleos "geneticamente" relacionados



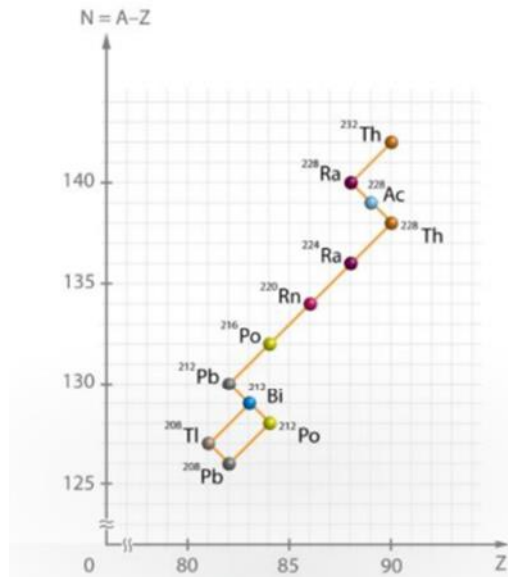
Desintegração : gera uma série ou cadeia de família radioativa

∃ quatro famílias radioativas:

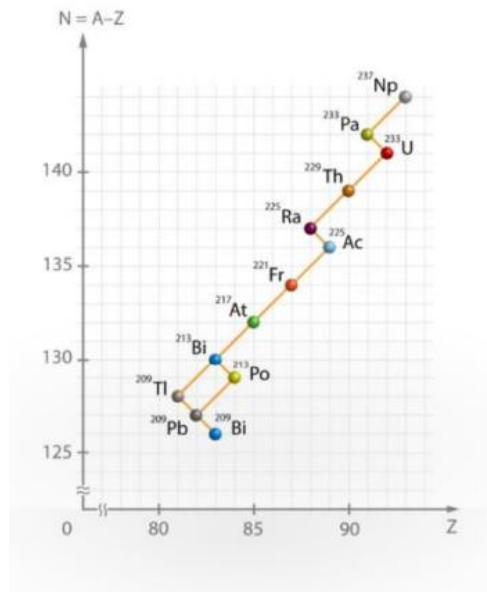
3 naturais - tório, urânio-rádio e actínidio (o primeiro membro tem meia vida excepcionalmente longa)

1 artificial - neptunio

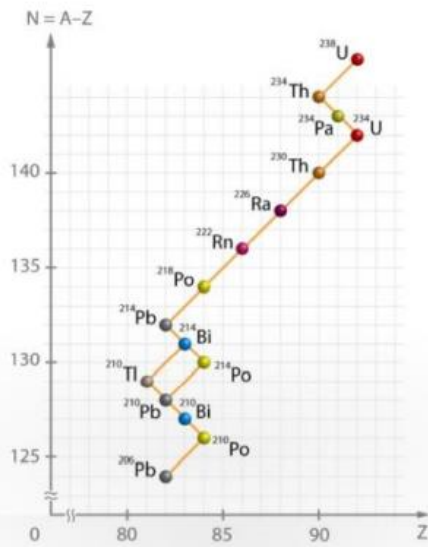
Nome da série	Isótopo	Meia-Vida (anos)	Isótopo estável final
Tório	${}_{90}^{232}\text{Th}$	$1,3 \times 10^{10}$	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
Urânio-Rádio	${}_{92}^{238}\text{U}$	$4,5 \times 10^9$	${}_{82}^{206}\text{Pb}$
Actínio	${}_{92}^{235}\text{U}$	$8,52 \times 10^8$	${}_{82}^{207}\text{Pb}$
Neptúnio	${}_{93}^{237}\text{Np}$	$2,2 \times 10^6$	${}_{83}^{209}\text{Bi}$



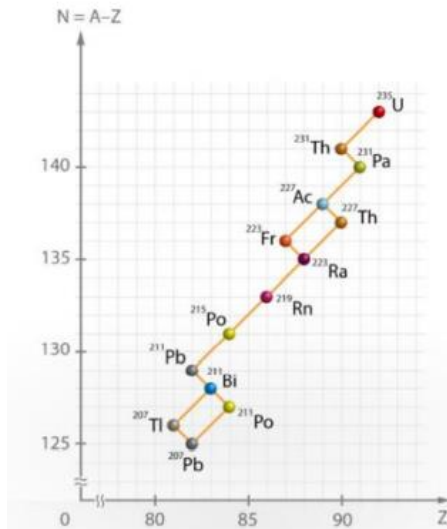
Thorium series



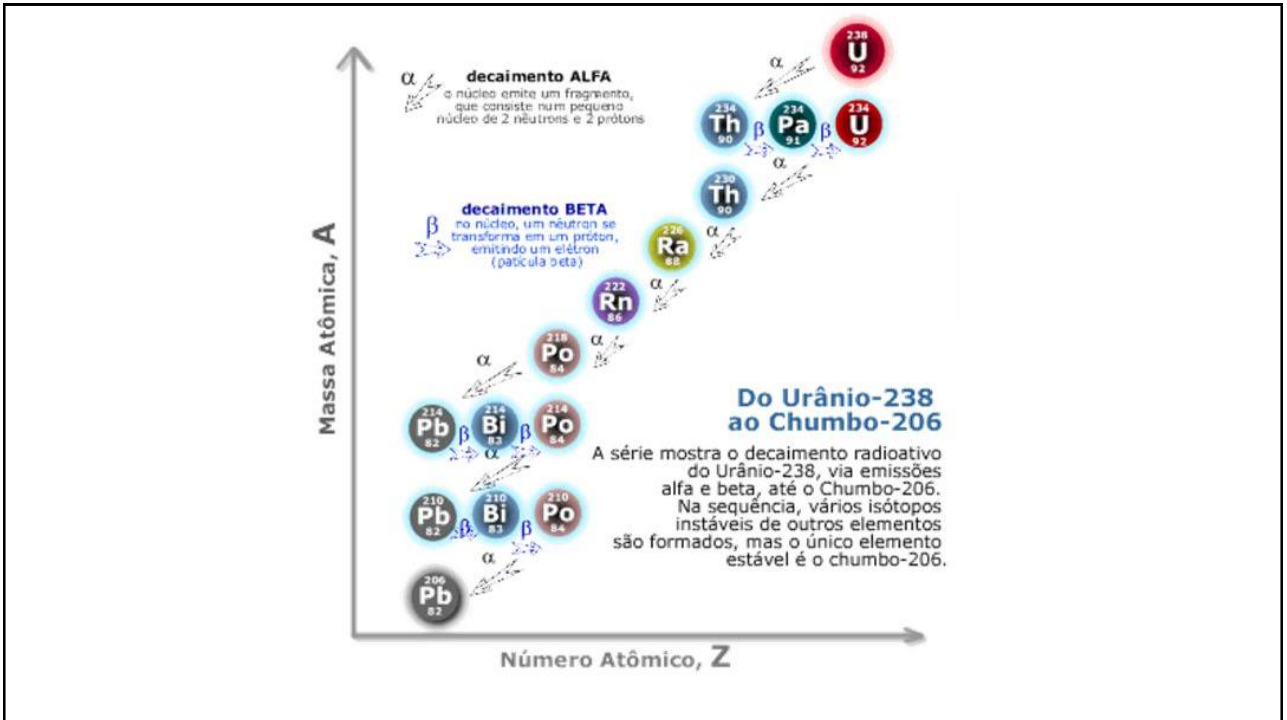
Neptunium series



Uranium series



Actinium series



## Fissão Espontânea

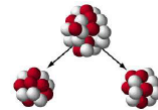
Decaimento  $\alpha$  - repulsão eletromagnética dos prótons diminui com a emissão de um fragmento contendo 2 desses prótons

Maior diminuição de energia - emissão de um fragmento maior

Núcleo  
Z grande



Fissão



Energia ~200 MeV  
 Diminuição da energia eletromagnética  
 Repulsiva do sistema

## Reações Nucleares

Reações Nucleares  $\neq$  Reações Químicas



Interação entre núcleos - Energias envolvidas são maiores!!

Conservação:

{  
do número de núcleons  
da carga  
do momentum e  
da energia

Partícula incide sobre um núcleo:

- Espalhamento elástico
- Espalhamento inelástico (núcleo é deixado em estado excitado e decai pela emissão de fótons ou outras partículas)
- Absorção da partícula acompanhada pela emissão de outras partículas



Espalhamento elástico: reflexão da onda incidente pelo canto do poço de potencial nuclear

Reação direta: partícula incidente interage com um nucleon simples dentro do núcleo  
nucleon deixa o núcleo (mais provável para altas E)

Nucleon permanece no núcleo, mas interage com vários outros nucleons  
pode levar a formação de estados excitados complicados no núcleo

E dividida entre muitas partículas → núcleo excitado recebe o nome de núcleo composto



Decai pela emissão de uma ou mais partículas (incluindo fótons)

## Seção de Choque

Medida quantitativa da probabilidade de uma dada reação nuclear

- Ser medida experimentalmente
- Ser calculada

Comparação entre valores experimentais e teóricos

$\sigma$  - seção de choque de um núcleo para uma reação particular

$\sigma$  - área transversal (área alvo) apresentada por um núcleo para uma partícula incidente

Núcleos  $\longrightarrow$  esferas de raio R

Partículas incidentes  $\longrightarrow$  projetos pontuais

$$\sigma = \pi R^2$$

Área alvejada ou  
Seção de choque



Exemplo:

Suponha que um próton de 15 MeV se aproxima de um núcleo de Al.

O raio de um núcleo de número de massa A pode ser obtido pela expressão:

$$R = 1,3 \times 10^{-13} \times A^{1/3}$$

A área alvo do  $^{27}\text{Al}$ , ou seja a seção de choque é igual a cerca de

$$\sigma = 0,48 \times 10^{24} \text{ cm}^2 = 0,48 \text{ barns}$$

$10^{-24} \text{ cm}^2$  = recebe o nome de barn

## Seção de choque para uma reação nuclear

Número de reações / unidade de tempo / núcleo

Número de partículas incidentes / unidade de tempo / unidade de área

Bombardeamento de  
 ${}^{13}_6\text{C}$  por prótons

Espalhamento elástico: pp  
Espalhamento inelástico: pp'  
Outros:  
(p,n), (p, $\gamma$ ), (p, $\alpha$ )....

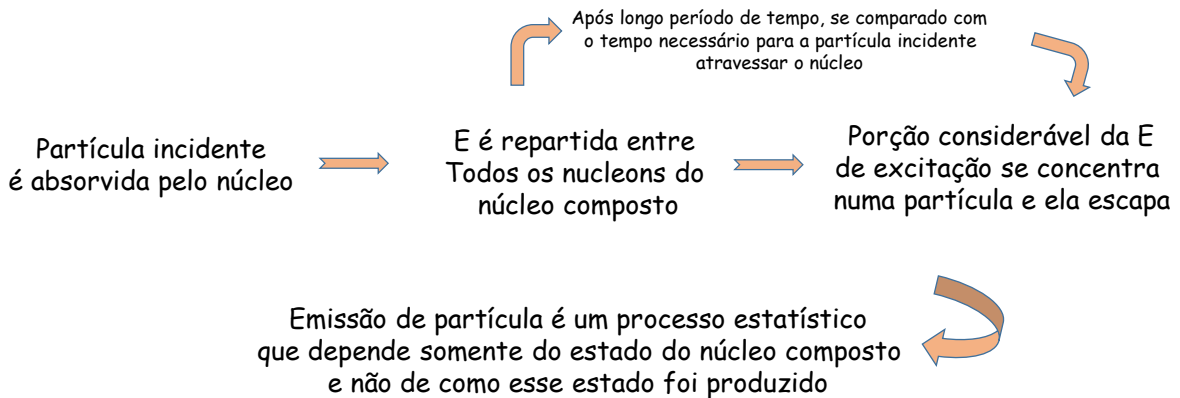
Seção de choque  
Para uma reação  
Particular será função  
da energia  
da partícula incidente

Seção de choque total = soma das seções de choque parciais

$$\sigma = \sigma_{p,p} + \sigma_{p,p'} + \sigma_{p,n} + \sigma_{p,\gamma} + \sigma_{p,\alpha} + \dots$$

## O Núcleo Composto

Muitas reações de baixa E - Formação de um núcleo composto  
- decaimento



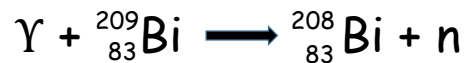
## O Núcleo Composto

Um próton incidente com  $E = 1 \text{ MeV}$ , tem velocidade de cerca de  $10^9 \text{ cm / s}$

Tempo para cruzar uma distância nuclear:  $\frac{R}{v} \approx \frac{10^{-13}}{10^9} \approx 10^{-22} \text{ s}$

Tempo de vida de um núcleo composto é da ordem de  $10^{-16} \text{ s}$

Reação Nuclear via formação de núcleo composto - núcleo excitado que tem uma vida bastante longa:

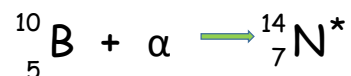


## Estados Excitados\*

Estados excitados podem ser determinados a partir das reações nucleares

Um pico na secção de choque  $\sigma(E)$  como uma função da  $E$  indica um estado excitado do núcleo composto.

Informações sobre o tempo de vida dos estados excitados do núcleo Composto é obtida pela medida da largura dessas ressonâncias



## Captura de Neutrons

Moderador

A reação mais favorável entre um núcleo e um neutron de energia superior a 1 MeV é o espalhamento.

Mesmo sendo um espalhamento elástico, o neutron cede alguma E ao núcleo.

Se um neutron é espalhado muitas vezes por um material, sua E vai decrescendo até que atinja um valor de equilíbrio térmico da ordem de KT. Um neutro com  $E \sim KT$  é chamado de neutron térmico.

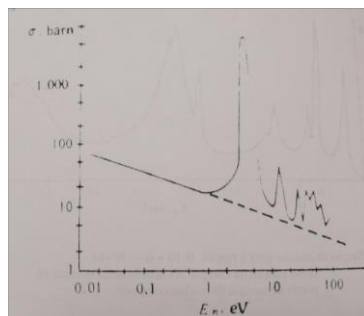
Em baixas E, o neutron pode ser capturado, com a emissão de algumas partículas  $\gamma$ ,  $\alpha$ , p, etc., pelo núcleo excitado ou núcleo composto

Reações de Captura de Neutron são:  $(n, \gamma)$ ;  $(n, \alpha)$ ;  $(n, p)$  etc.

## Barras de Controle

## Absorvedor

Seção de choque para a captura de nêutrons como função da E, no caso da Ag



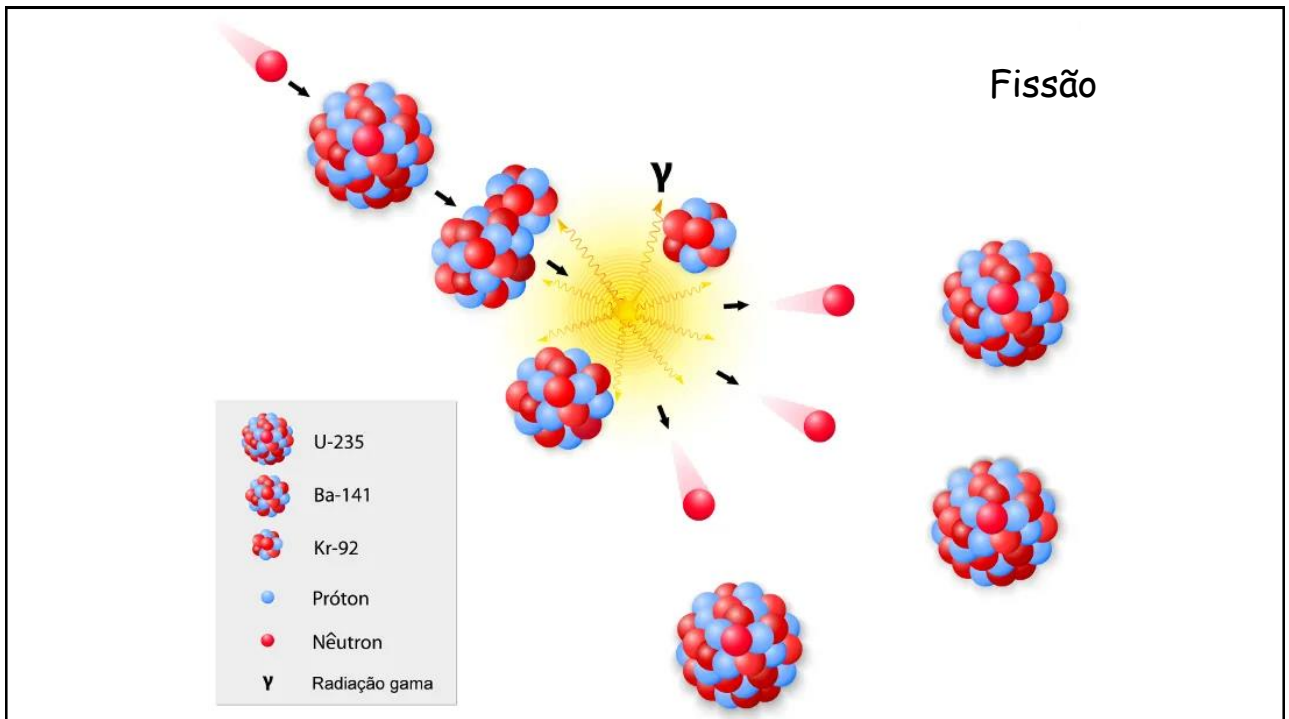
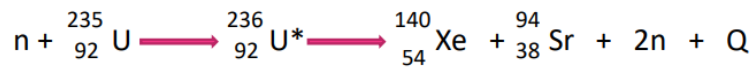
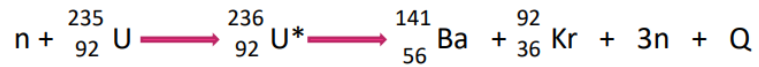
Muitos elementos apresentam ressonâncias semelhantes na seção de choque para a captura de neutron.

O valor máximo da seção de choque para o Cadmio 113 é cerca de 57.000 barns, de forma que este material é útil para se fazer uma proteção que impeça a passagem de neutrons com baixas E

## Fissão Nuclear

Reação exotérmica quando um núcleo é excitado devido a captura de um neutrón e separa-se em dois núcleos (**FRAGMENTOS**) aproximadamente iguais no que diz respeito as suas massas

A força de repulsão coulombiana mantém os fragmentos de fissão separados, com a E eventualmente aparecendo como E térmica



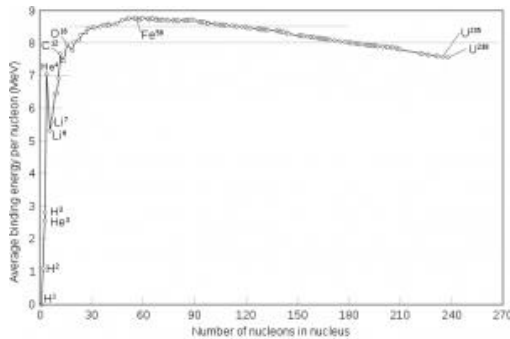
## Fusão Nuclear

Processo no qual um elemento mais pesado é produzido a partir de um ou mais elementos mais leves

Elementos mais leves



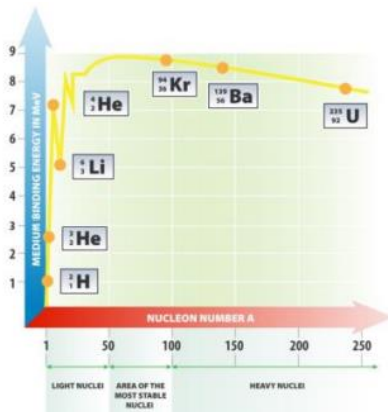
Energia é liberada



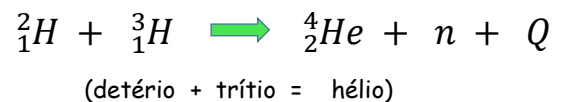
massa do núcleo formado  
<  
soma das massas  
dos núcleos fundidos

## Fusão Nuclear

Energia de ligação por nucleon, para núcleos muito leves ( $A \cong 2$ ) é menor do que para núcleos intermediários



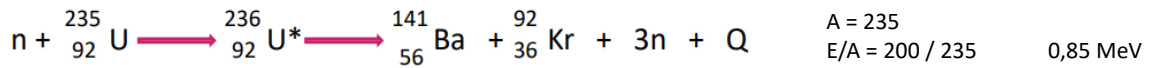
Na fusão dois núcleos mais leves se fundem para formar um elemento mais pesado



$$Q = 17,6 \text{ MeV}$$

$$Q = 17,6 \text{ MeV} \quad < \quad \cong 200 \text{ MeV} \quad (\text{fissão})$$

Mas é muito maior do que o total da energia por unidade de massa!



Portanto:

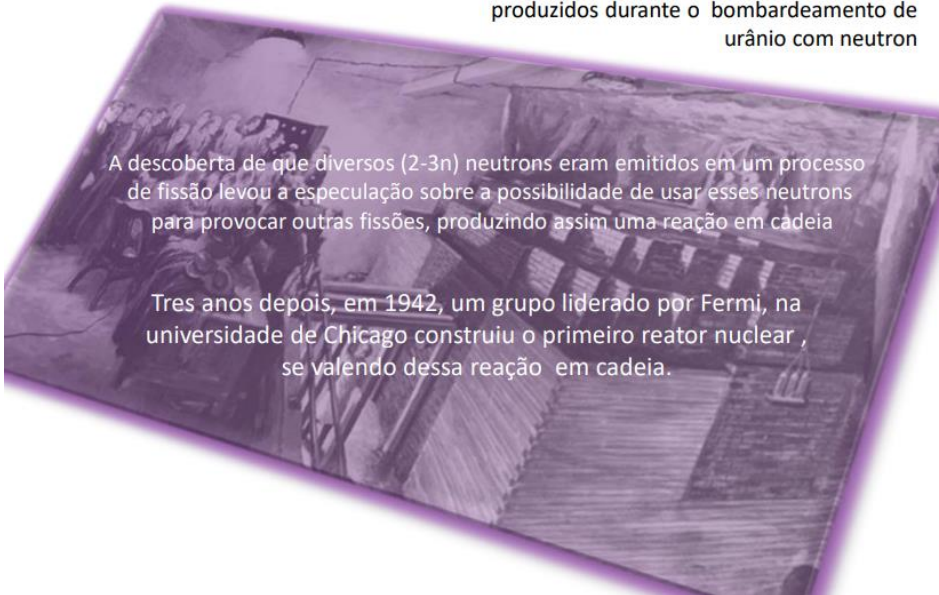
A E/A liberada nesta reação de fusão é da ordem de 4 - 5 vezes maior do que a liberada por fissão

### Reatores de Fissão:

A fissão do urânio foi descoberta em 1939 por Hahn e Strassman, ao encontrarem elementos de massa leve tais como o bário e o lantânio produzidos durante o bombardeamento de urânio com neutron

A descoberta de que diversos (2-3n) neutrons eram emitidos em um processo de fissão levou a especulação sobre a possibilidade de usar esses neutrons para provocar outras fissões, produzindo assim uma reação em cadeia

Tres anos depois, em 1942, um grupo liderado por Fermi, na universidade de Chicago construiu o primeiro reator nuclear, se valendo dessa reação em cadeia.





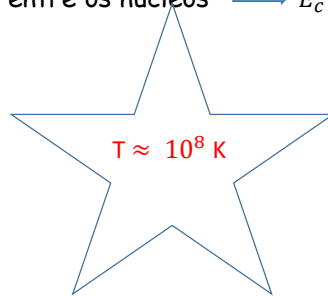
## Reatores de Fusão

Abundância do combustível + ausência de alguns perigos apresentados nos reatores de fissão

D-T (deutério-trítio)

Repulsão coulombiana entre os núcleos  $\rightarrow E_c \geq 10 \text{ KeV}$  para manter núcleos juntos e possibilitar a fusão

$E_{fusão}$



Esta é aproximadamente a temperatura no interior de estrelas, onde tais reações acontecem

## Reatores de Fusão

Plasma: gás totalmente ionizado, mantendo-se numa mistura estacionária de íons positivos e elétrons livres

Plasma confinado



manter alta temperatura e densidade suficiente para que ocorra a reação

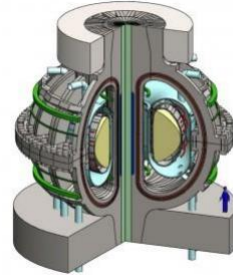
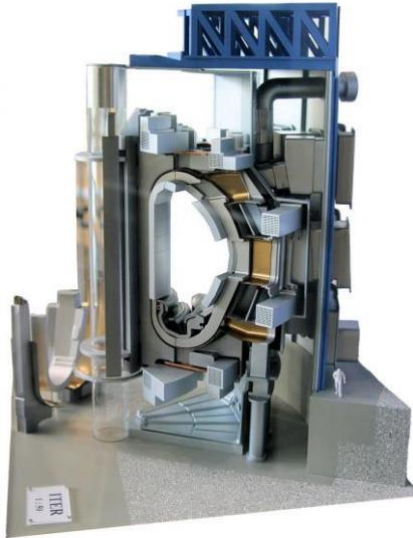
Confinamento: campo magnético



Íons e elétrons executam trajetórias helicoidais em torno das linhas de indução magnética que se fecham ao longo de um toróide

Base dos reatores de fusão experimentais do tipo ToKamaK (Rússia, EUA e Inglaterra)

# ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor

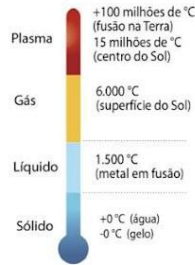


O impossível não é um fato,  
O impossível é uma opinião

## Iter: projeto de reator experimental de fusão nuclear

União Europeia, Índia, Japão, China, Rússia, Coreia do Sul, Estados Unidos e Suíça se juntam para tentar produzir, através de fusão nuclear, uma energia como a gerada no centro do Sol

① Para entrar em fusão, o deutério\* e o trítio\* têm que chegar ao estado de plasma

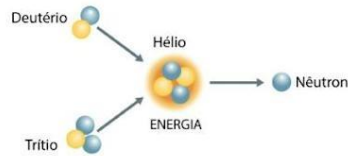


\* Isótopos (variedades) de hidrogênio  
Deutério: encontrado na água (40 mg/l)  
Trítio (radioativo): fabricado a partir do lítio, presente na crosta terrestre

Centro ITER («caminho» em latim)



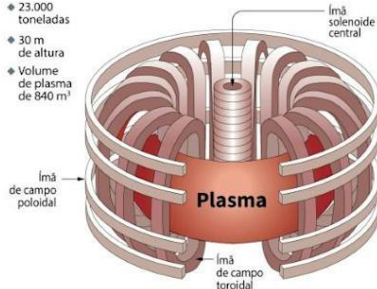
② Princípio da fusão



### Reator experimental «Tokamak»

Somente um campo magnético muito potente, como o que gera os ímãs de um «Tokamak», pode limitar o plasma muito quente (150 milhões de graus) em que ocorrem as reações de fusão

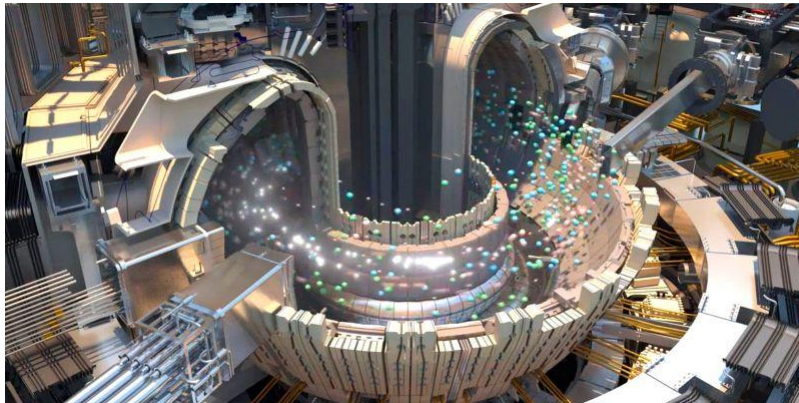
- ◆ 23.000 toneladas
- ◆ 30 m de altura
- ◆ Volume de plasma de 840 m<sup>3</sup>



Os ímãs fazem o confinamento, a modelagem e o controle do plasma no espaço vazio

Fontes: ITER, CEA

AFP



O ITER é um reator de fusão que pretende imitar o poder do sol. Composto por um milhão de componentes e 10 milhões de peças, este é considerado o maior investimento científico da atualidade, segundo a ISQ, a empresa portuguesa especialista em suporte científico-tecnológico, envolvida no projeto desde o primeiro momento, na área de competência.

Depois de montado e a funcionar, a empresa salienta que este será o maior e mais potente reator de fusão do mundo, estimando-se que tenha a capacidade de produzir 500 MW, aquilo que será suficiente para iluminar 325 mil habitações. O projeto internacional envolve os Estados Unidos, Japão, Rússia, Coreia do Sul, China, Índia e a União Europeia.



Temas de Seminário	
01	Nanocompósitos de Matriz Metálica com Nanotubos de Carbono e sua Potencial Aplicação na Indústria Nuclear
02	Combustíveis Nucleares
03	Aplicação do Aço Inoxidável na Indústria Nuclear e suas Tecnologias
04	Seleção de Materiais para Embalado de Transporte de Substâncias Radioativas
05	Processo de Produção de Fibra de Carbono e sua Aplicação na Área Nuclear
06	Aço Inoxidável como Material Estrutural de Reatores do Tipo PWR
07	SMR – Small Modular Reactor
08	ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor
09	Análise de Aspectos Relevantes para Materiais Candidatos ao Revestimento de Combustíveis Nucleares Metálicos
10	Métodos de Enriquecimento de Urânio: Ultracentrifugação, Difusão Gasosa e Laser
11	A Corrosão dos Materiais nos Reatores a Sais Fundidos
12	As maravilhas e os Problemas Associados com Submarinos Nucleares