



Tecnologia Nuclear

Prof. Hudson Zanin

O que conhecemos sobre?



Tópicos

- Tipos de radiação
- Porquê elementos são radioativos
- Radionuclídeos
- Meia vida
- Reações de Fissão e Fusão
- Seção de choque
- Nêutrons rápidos e térmicos
- Moderadores

- Bomba A
- Design básico de reatores
- Porque produtos de fissão são perigosos
- História do design de reatores e a história bélica
- Tipos de reatores construídos

- Lixo radioativo
- Por dentro de um PWR
- Radiofármacos
- Tecnologias esquecidas?!?!?
- Reatores - Fusão

Programa:

- O que é Radioatividade?
- Radionuclídeos e meia vida
- De onde vem a energia?
- Reações de Fissão e Fusão nuclear
- Dinâmica de nêutrons livres
- Fissão do Urânio

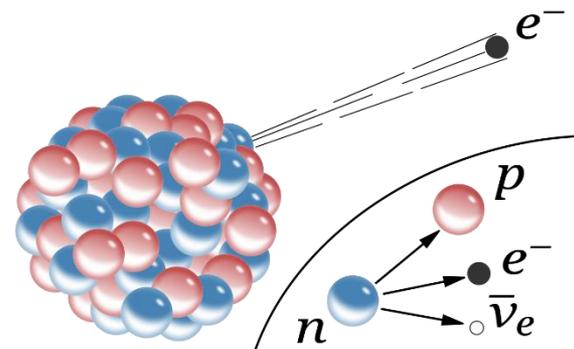
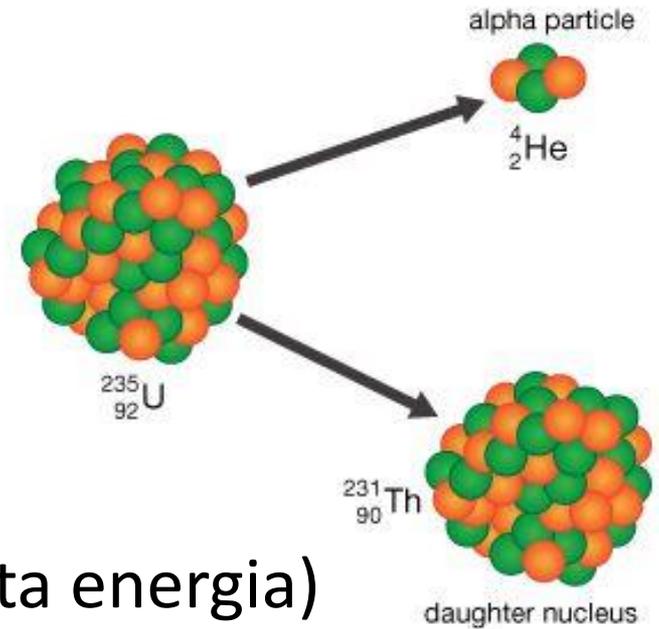
- Design Básico de reatores Nucleares
- Produtos de Fissão - Lixo
- História - Bomba A...e agora José?
- Tipos de reatores
- Por dentro de um PWR
- Acidentes em PWRs
- Tecnologias esquecidas - LFTR
- Reatores de Fusão

O que é Radioatividade?

- Google it

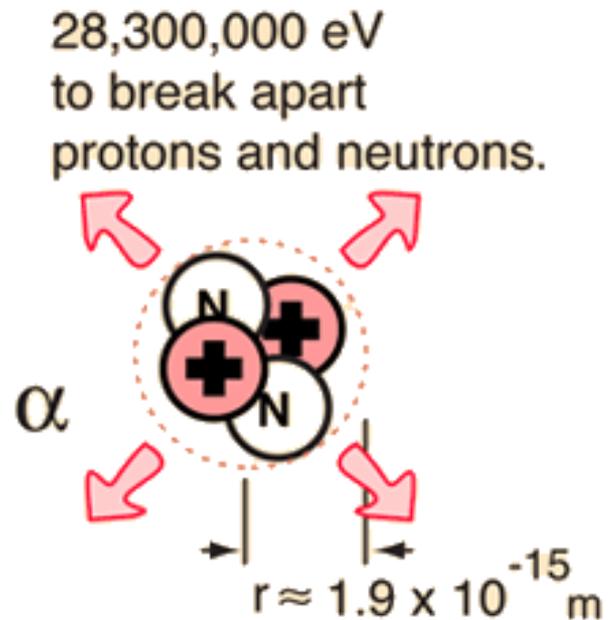
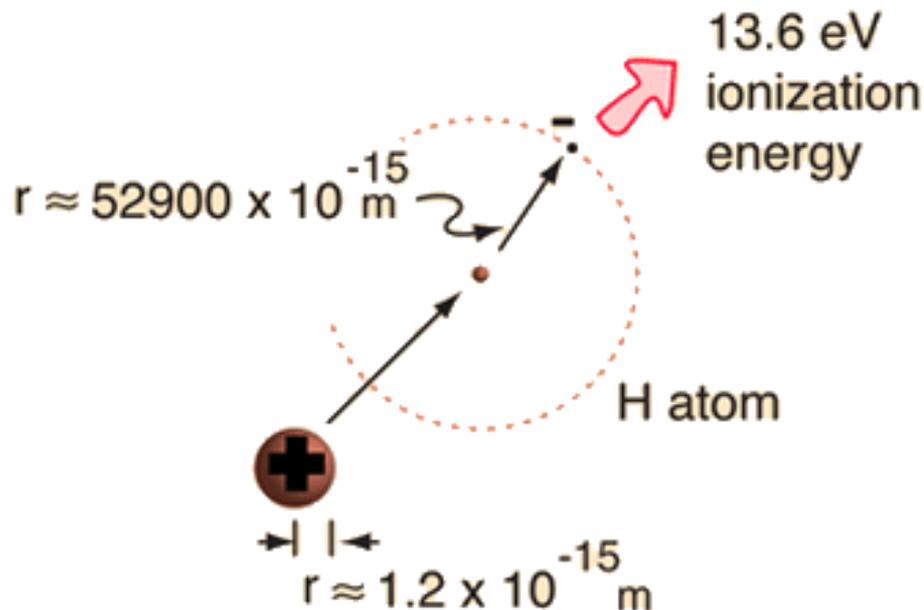
- Emissão espontânea

- α (He^{2+})
- β (e^-)
- Γ (Onda eletromagnética de alta energia)
- n (nêutron livre)
- ...



Porque a Radioatividade é tão perigosa?

- Nível energético!!
 - Reações Químicas: **eV**
 - Reações Nucleares: **MeV**



Comparison of atomic and nuclear scales and binding energy

Porquê elementos são radioativos

- Qual a razão para emissões espontâneas?



KEEP CALM

AND

AGUARDE: CENAS DOS

PRÓXIMOS

CAPÍTULOS

Você conhece a tabela periódica completa?

- Quantos elementos existem?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18															
1	1 H Hydrogen 1.00794	Atomic # Symbd Name Atomic Mass																	2 He Helium 4.002602														
2	3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;"> <p>C Solid</p> <p>Hg Liquid</p> <p>H Gas</p> <p>Rf Unknown</p> </div> <div style="width: 70%;"> <table border="1"> <tr> <td rowspan="2">Alkali metals</td> <td colspan="2">Metals</td> <td colspan="2">Nonmetals</td> </tr> <tr> <td>Alkaline earth metals</td> <td>Lanthanoids Actinoids</td> <td>Transition metals</td> <td>Poor metals Other nonmetals Noble gases</td> </tr> </table> </div> </div>																Alkali metals	Metals		Nonmetals		Alkaline earth metals	Lanthanoids Actinoids	Transition metals	Poor metals Other nonmetals Noble gases	5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.0067	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797
Alkali metals	Metals		Nonmetals																														
	Alkaline earth metals	Lanthanoids Actinoids	Transition metals	Poor metals Other nonmetals Noble gases																													
3	11 Na Sodium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.3050																	13 Al Aluminium 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.065	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948									
4	19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titanium 47.887	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938045	<div style="border: 2px solid black; padding: 10px; font-size: 2em; font-weight: bold;">78 Pt Platinum 195.084</div>					31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798															
5	37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.96	43 Tc Technetium (97.9072)						49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.293															
6	55 Cs Caesium 132.9054519	56 Ba Barium 137.327	57-71		72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.94788	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207						81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98040	84 Po Polonium (208.9824)	85 At Astatine (208.9871)	86 Rn Radon (222.0176)														
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89-103		104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)						113 Uut Ununtrium (284)	114 Uuq Ununquadium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Uuh Ununhexium (292)	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium (294)														

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com). <http://www.ptable.com/>



57 La Lanthanum 138.90547	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutetium 174.9668
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.03806	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

Mini-Quiz para quem manja de química...

78	2
Pt	8
Platinum	18
195.084	32
	17
	1

Quantos prótons tem a Platina?

- a) 78
- b) 7598
- c) depende se início do mês

Quantos e⁻ tem a Platina?

- a) 78
- b) Cada Pt deve ser livre para se identificar com quantos e⁻ quiser
- c) $4,59 \cdot 10^{-32}$

Quantos Nêutrons tem a Platina?

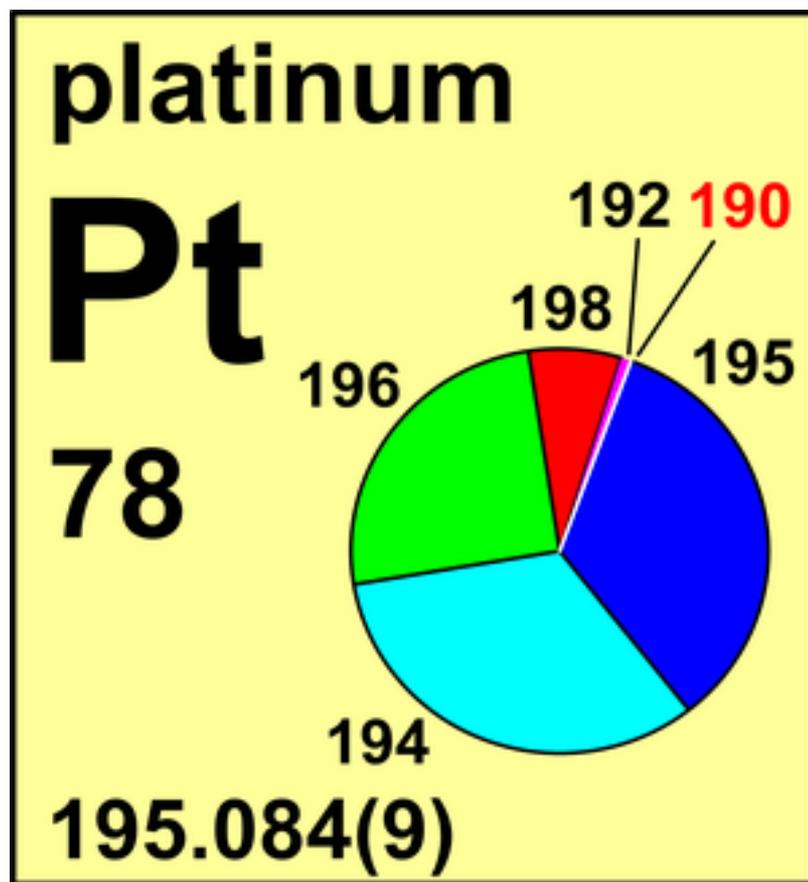
- a) 117
- b) 118
- c) 116
- d) 114
- e) 120
- f) Todas as alternativas

Isotope	Atomic mass/u	Mole fraction
¹⁹⁰ Pt	189.959 930(7)	0.000 14(1)
¹⁹² Pt	191.961 035(4)	0.007 82(7)
¹⁹⁴ Pt	193.962 663(3)	0.329 67(99)
¹⁹⁵ Pt	194.964 774(3)	0.338 32(10)
¹⁹⁶ Pt	195.964 934(3)	0.252 42(41)
¹⁹⁸ Pt	197.967 875(5)	0.071 63(55)

Isótopos mais estáveis					
iso	AN	Meia-vida	MD	Ed	PD
				MeV	
¹⁹⁰ Pt	0,01%	6,5 x 10 ¹¹ a	α	3,249	¹⁸⁶ Os
¹⁹² Pt	0,782	estável com 114 neutrões			
¹⁹³ Pt	sintético	50 a	ε	0,057	¹⁹³ Ir
¹⁹⁴ Pt	32,97%	estável com 116 neutrões			
¹⁹⁵ Pt	33,83%	estável com 117 neutrões			
¹⁹⁶ Pt	25,24%	estável com 118 neutrões			
¹⁹⁸ Pt	7,16%	estável com 120 neutrões			

Unidades do SI & CNTP, salvo indicação contrária.

v • e



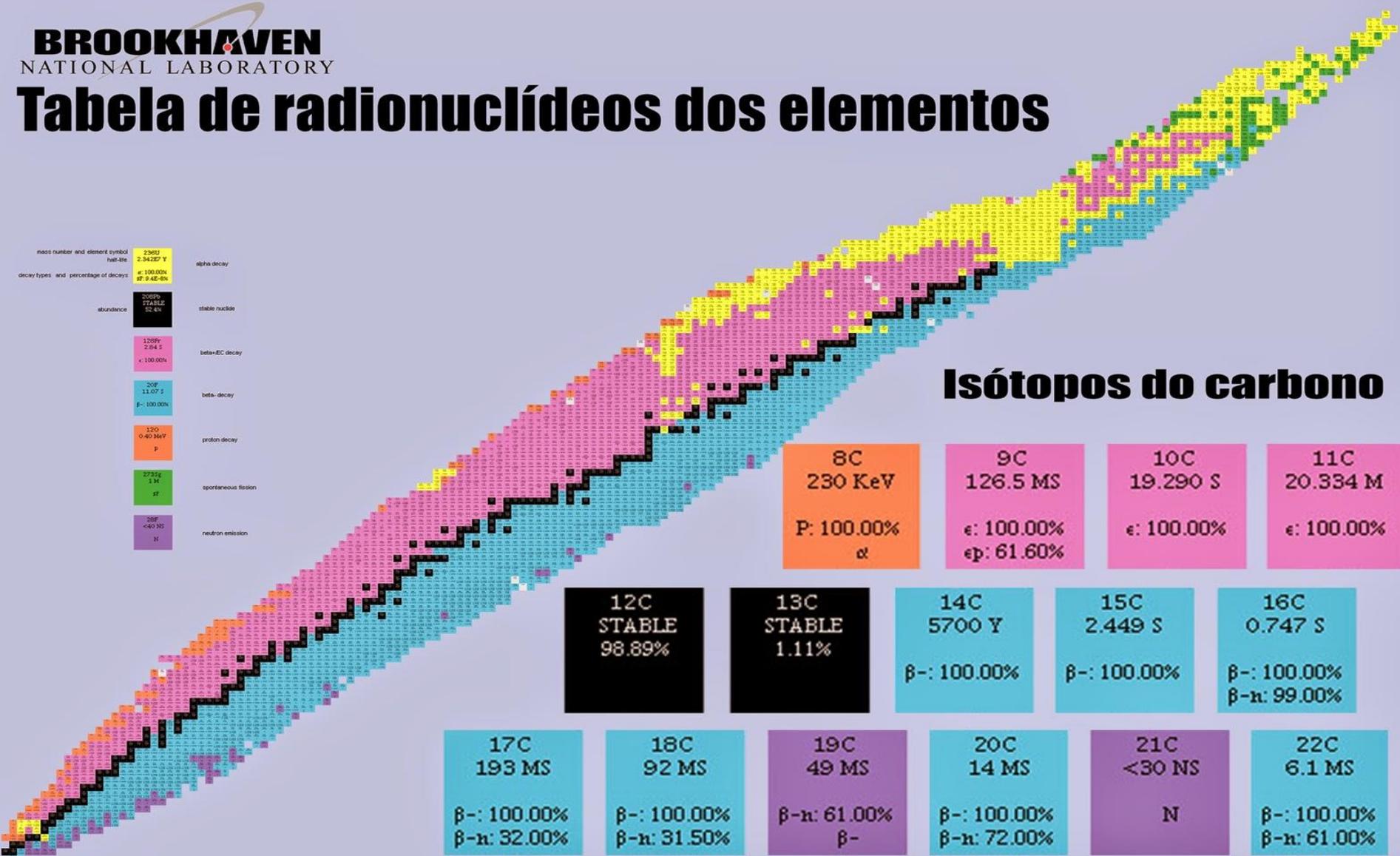
<http://www.ciaaw.org/platinum.htm>

<http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/fulltext/?id=23a71e6c-605b-458b-b56e-5efb0a347895>

Radionuclídeos

BROOKHAVEN
NATIONAL LABORATORY

Tabela de radionuclídeos dos elementos

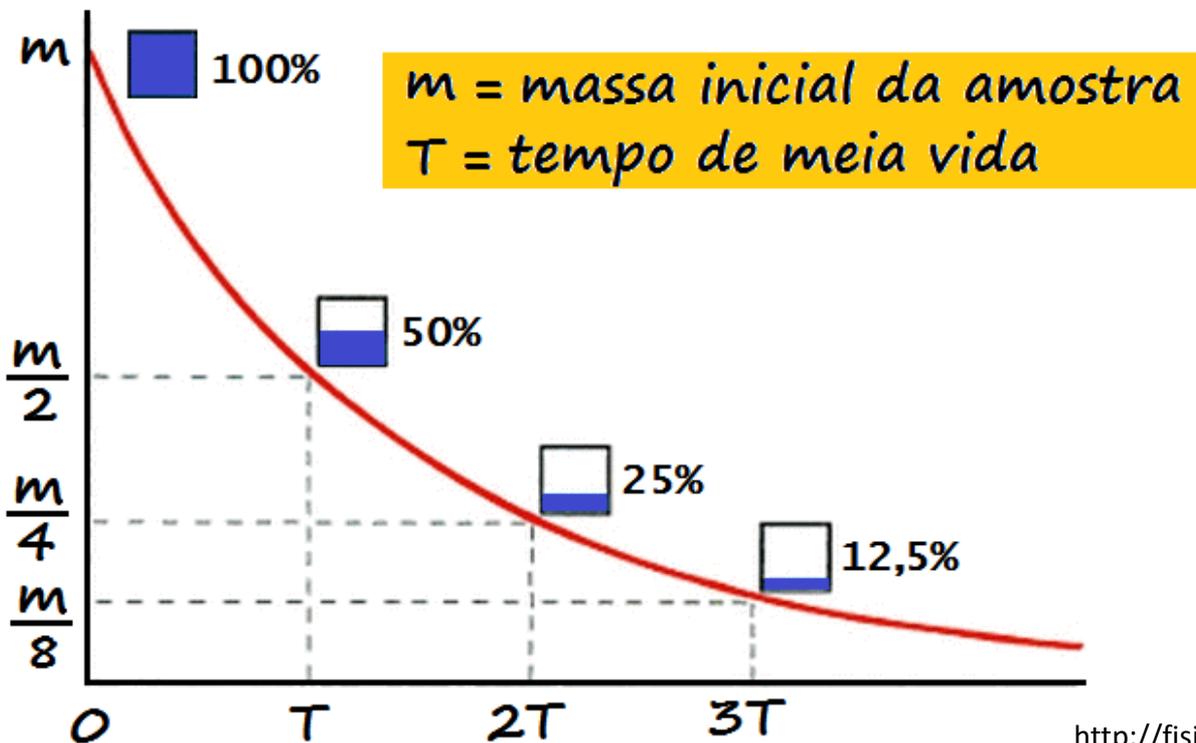


Isótopos do carbono

⁸C 230 KeV P: 100.00% α	⁹C 126.5 MS ε: 100.00% εp: 61.60%	¹⁰C 19.290 S ε: 100.00%	¹¹C 20.334 M ε: 100.00%		
¹²C STABLE 98.89%	¹³C STABLE 1.11%	¹⁴C 5700 Y β-: 100.00%	¹⁵C 2.449 S β-: 100.00%	¹⁶C 0.747 S β-: 100.00% β-n: 99.00%	
¹⁷C 193 MS β-: 100.00% β-n: 32.00%	¹⁸C 92 MS β-: 100.00% β-n: 31.50%	¹⁹C 49 MS β-n: 61.00% β-	²⁰C 14 MS β-: 100.00% β-n: 72.00%	²¹C <30 NS N	²²C 6.1 MS β-: 100.00% β-n: 61.00%

Meia Vida

- O que é a meia vida de um radioisótopo?
 - É o tempo necessário para decair metade da massa de uma amostra de determinado radioisótopo
 - Característica de um decaimento exponencial



Meia Vida

- Qual material radioativo é o mais ativo baseado na informação sobre a sua meia vida?
 - A) meia vida = $3,4 \cdot 10^{16}$ s
 - B) meia vida = $2,3 \cdot 10^{-3}$ s
- Imagine amostras de 1 kg do material A e B.
- Após a meia vida 500g do material B terão decaído e com isso emitido o seu equivalente em partículas α , β , n e raios gama em muito menos do que 1 s !!!!

Meia vida

Radioisótopo	Meia-vida
Urânio-235	$7,1 \cdot 10^8$ anos
Actínio-227	21,6 anos
Frâncio-223	22 minutos
Tálio-207	4,78 minutos
Bismuto-211	2,15 minutos
Polônio-211	0,52 segundos
Polônio-215	$1,78 \cdot 10^{-3}$ segundos
Astato-215	10^{-4} segundos

Isotope	Half Life
Pt-188	10.2 days
Pt-190	6.0E11 years
Pt-191	2.96 days
Pt-192	Stable
Pt-193	60.0 years
Pt-193m	4.33 days
Pt-194	Stable
Pt-195	Stable
Pt-195m	4.02 days
Pt-196	Stable
Pt-197	18.3 hours
Pt-197m	1.59 hours
Pt-198	Stable

Defeito de massa

ENERGIA EM REAÇÕES NUCLEARES

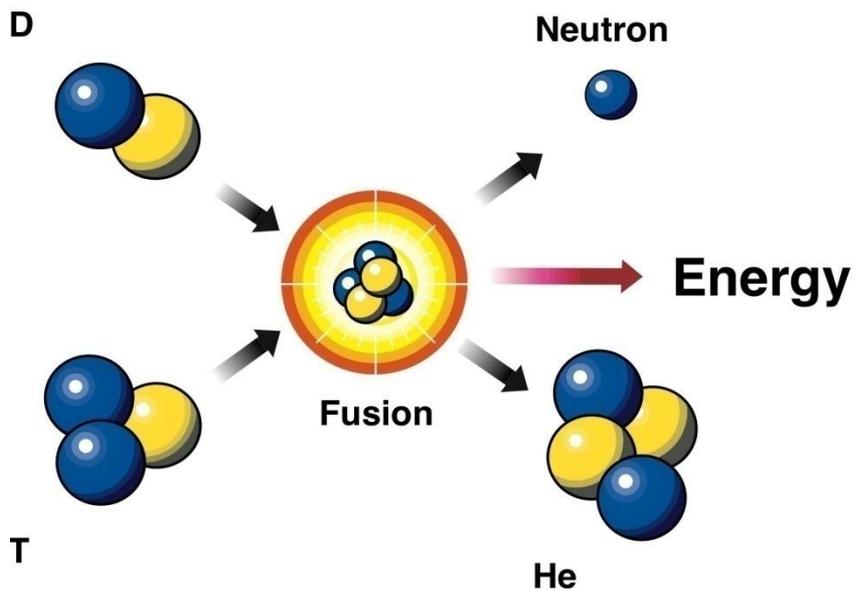
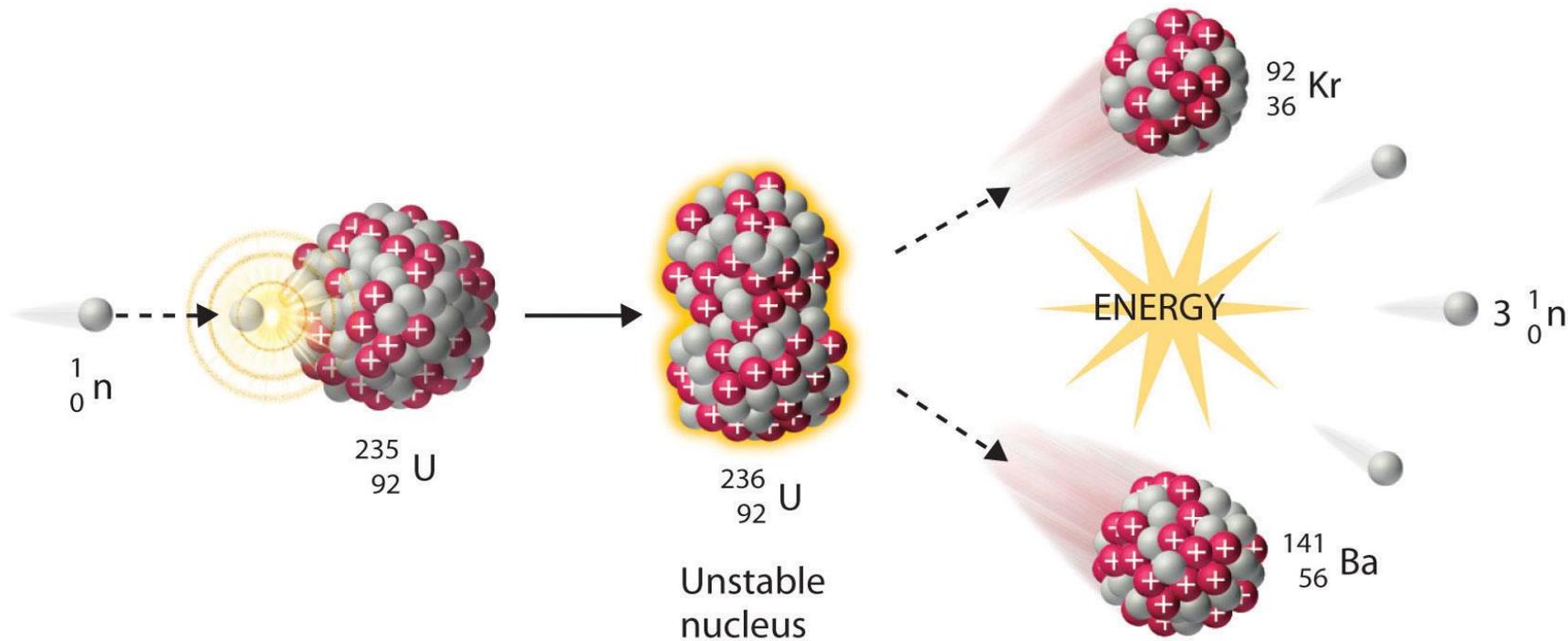
Reações Nucleares

- Reações de Fissão

- São reações que ocorrem no núcleo atômico causando o fissionamento desse núcleo e assim gerando 2 ou mais átomos mais leves.

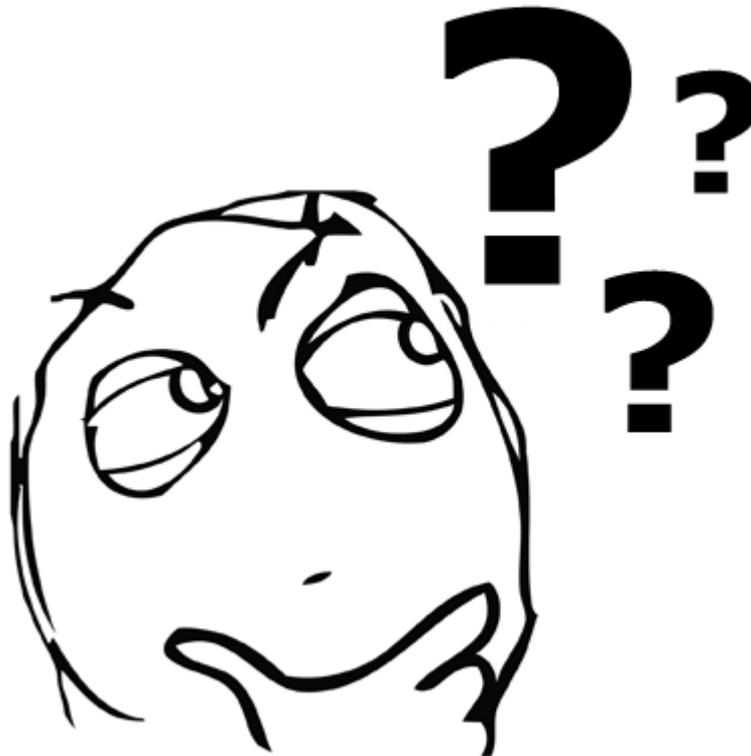
- Reações de Fusão

- São reações que ocorrem no núcleo atômico quando 2 núcleos se fundem gerando um novo núcleo mais pesado.



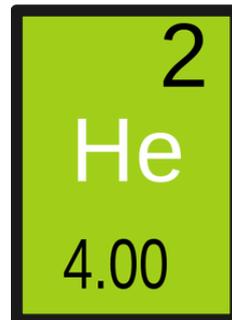
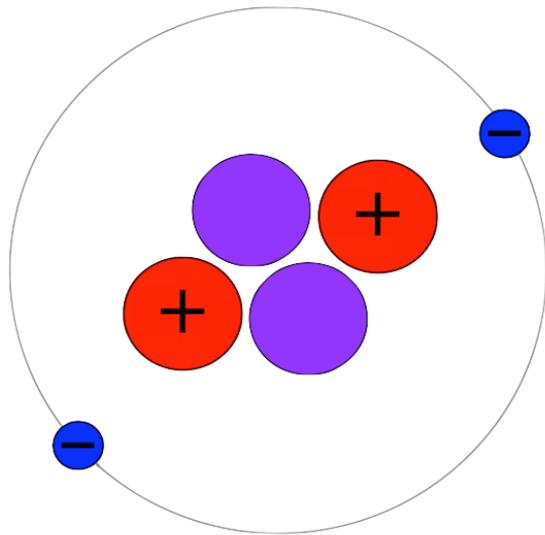
Energia liberada em reações Nucleares

- Afinal de onde vêm toda essa energia liberada em reações nucleares?!



De onde vem a energia?

- Antes de falarmos mais sobre Reações nucleares, vamos entender mais sobre a massa atômica



Qual a massa de um Próton?

- 1,00727647 u

Qual a massa de um Nêutron?

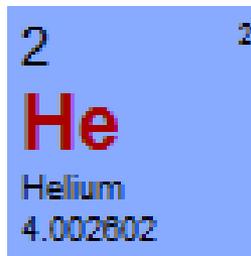
- 1,00866490 u

Qual a massa de um elétron?

- 0,000549 u

Portanto a massa do He:

- 4,032981 u



Defeito de massa de

- **0,030378 u**

De onde vem a energia?

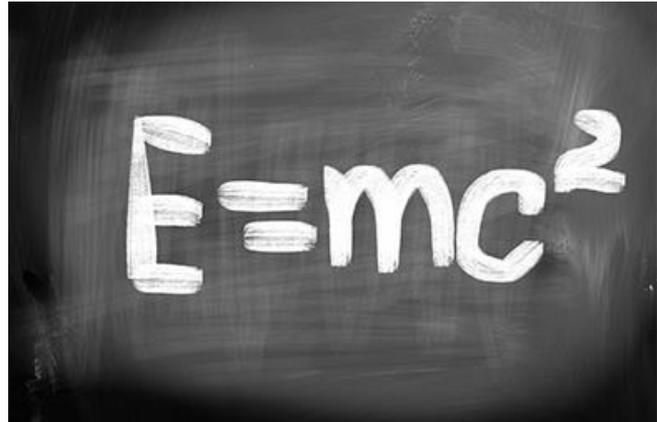
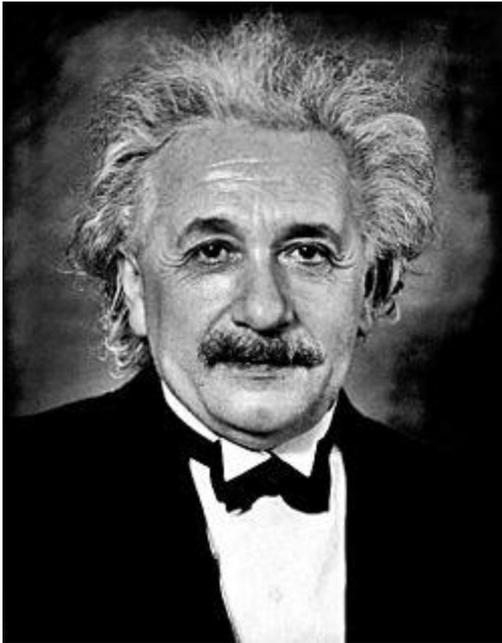
- Para onde foi 0,030378 u?



- Antoine L. De Lavoisier



De onde vem a energia?



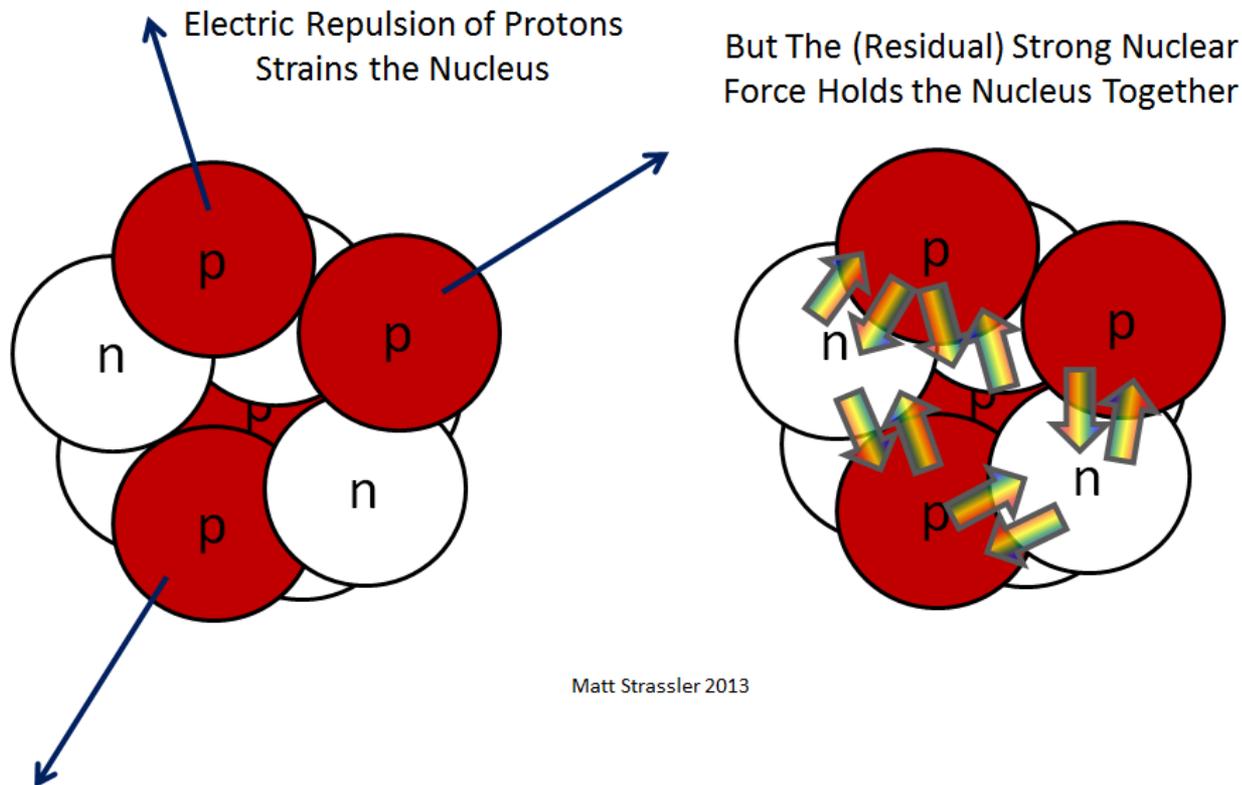
$$E = \left[0,030378(u) * 1,66054 * 10^{-27} \left(\frac{kg}{u} \right) \right] * [2,99792 * 10^8 (m/s)]^2$$

$$E = 4,5336 * 10^{-12} J = 28296,6 keV$$

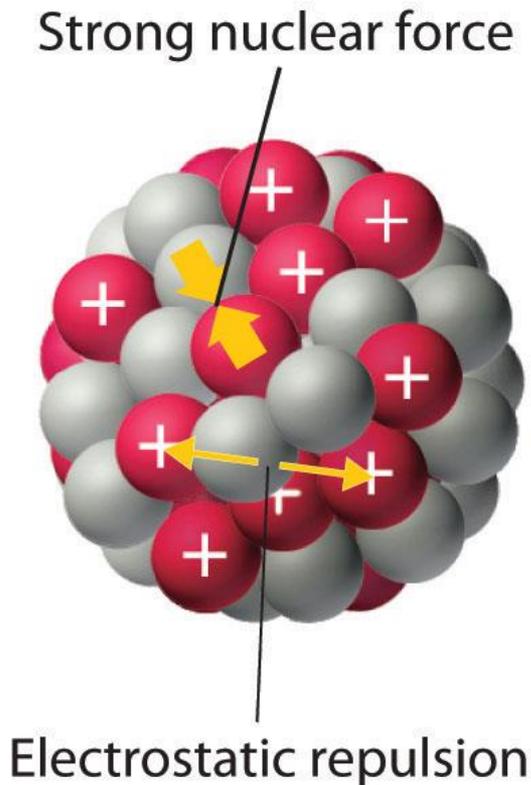
Corresponde a uma energia de
ligação de **7074 keV/A**

De onde vem a energia?

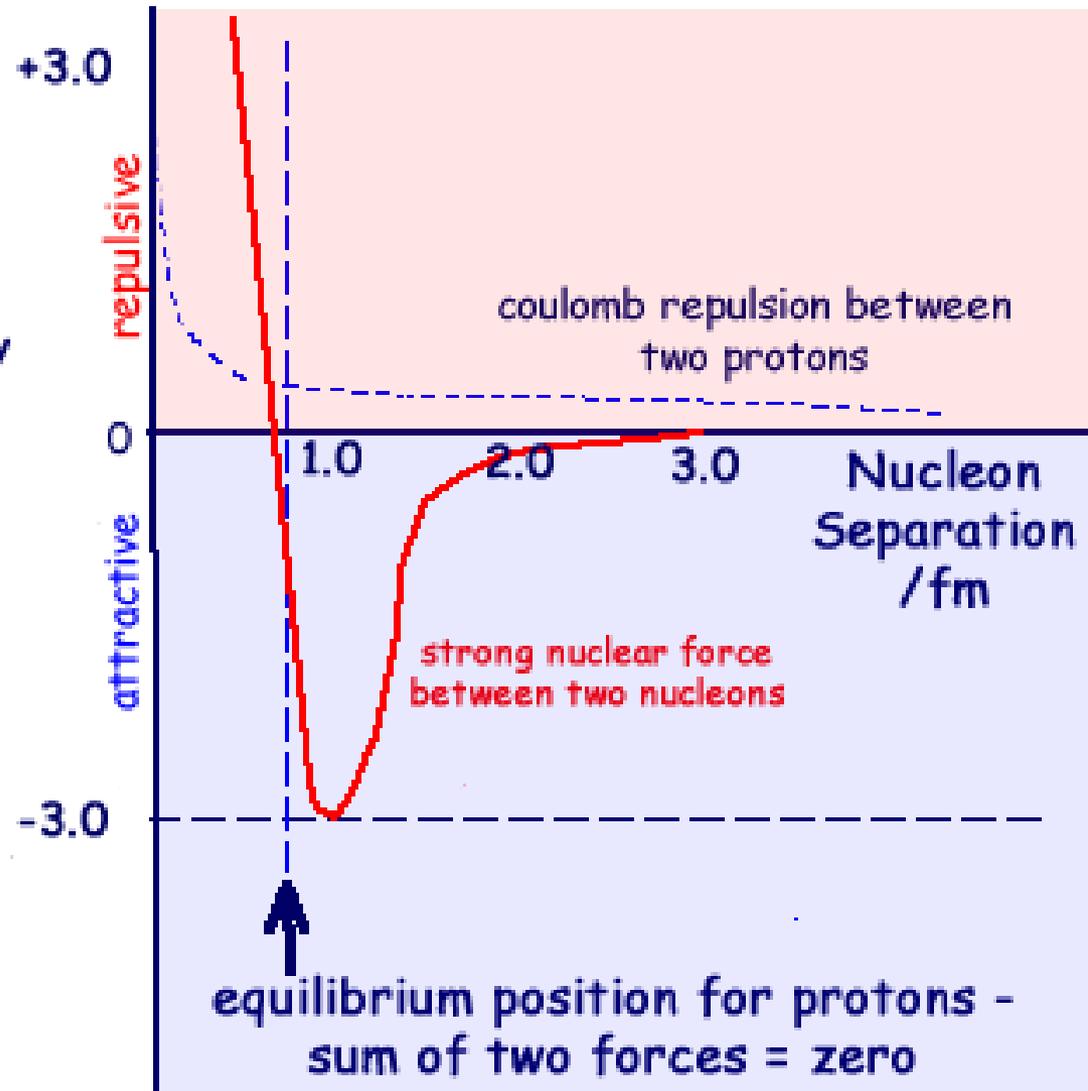
- Há uma competição entre a repulsão coulombica e a força nuclear forte entre cada núcleo atômico
 - A formação de um núcleo atômico trás um aumento da estabilidade de todo o sistema



De onde vem a energia?



Force
between
nucleons /
 10^{-4} N



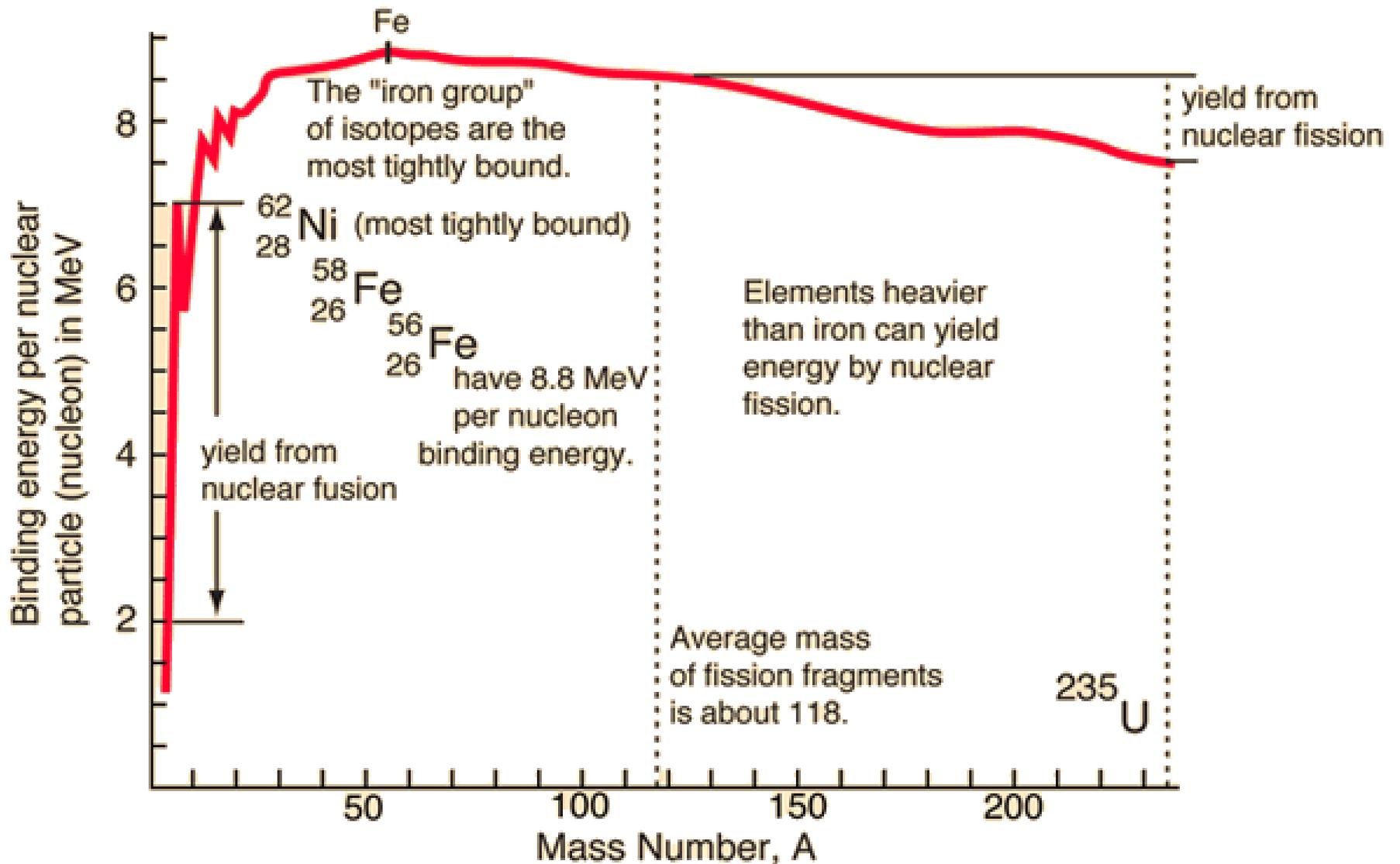
De onde vem a energia?

- Mas para núcleos maiores, algo interessante começa a ocorrer...
- Alguém imagina?
 - Como a força nuclear forte só age a distâncias muito curtas, em núcleos muito grandes a atração entre prótons e nêutrons não consegue chegar ao outro lado do núcleo, porém a força eletrostática ainda atua de modo intenso.
 - Acúmulo de força repulsiva, sem acúmulo da atrativa

De onde vem a energia?

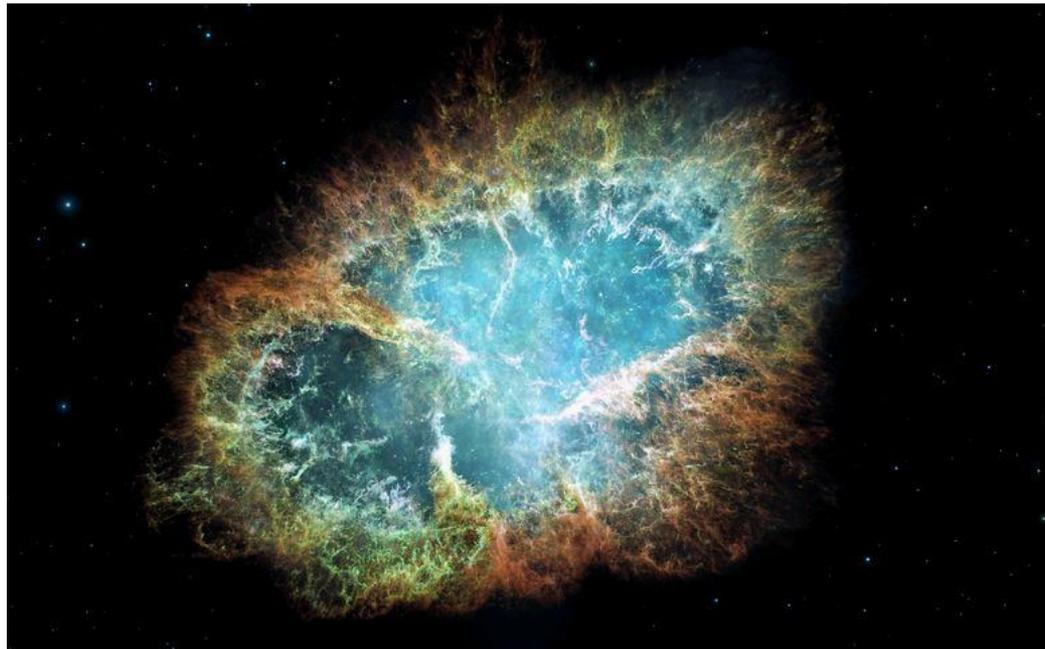
- Há 2 consequências desse fato que dependerão do tamanho do núcleo
 - Há um máximo para o ganho de estabilidade energético que advém da formação de um núcleo (limite para fusão)
 - Para núcleos muito massivos, eles se tornam instáveis ao ponto de emitirem partes de si mesmo para ficarem mais estáveis.



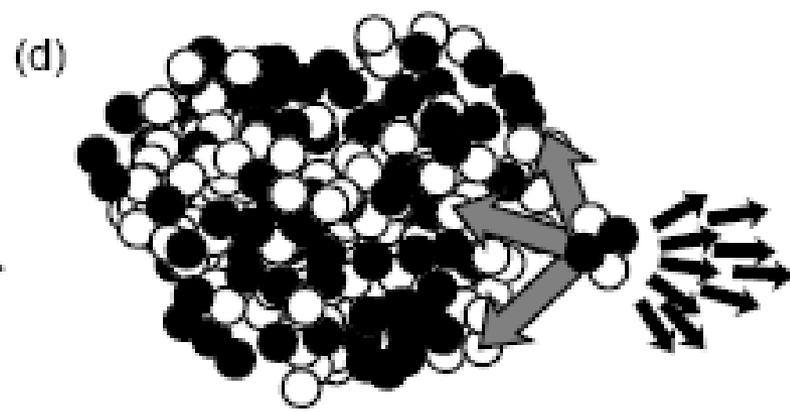
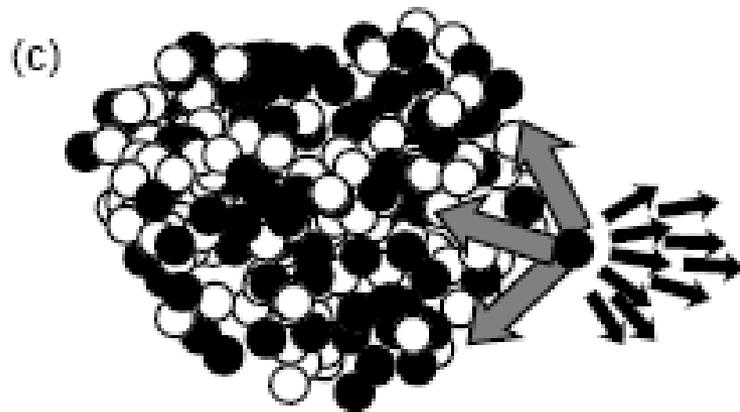
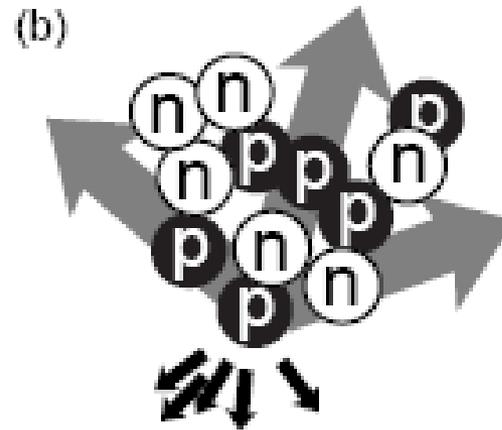
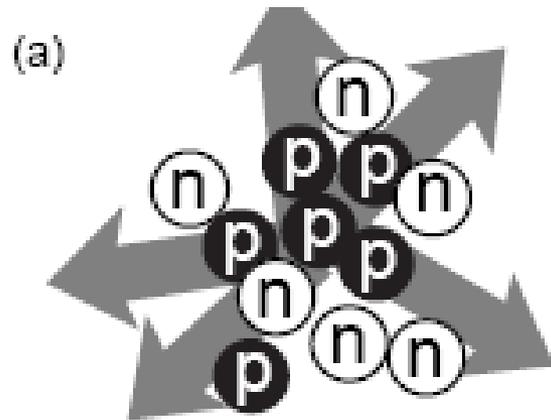


Fusão vs Fissão

- **Fe-56** é o elemento mais energeticamente estável e é o produto final presente no núcleo de estrelas $> 25x$ Sol.
- Como elementos mais pesados são formados?



Emissão Alfa



Portanto o que ocorre com a energia total do núcleo ao emitir radiação?

Para aonde vai esta energia?!?!?

Reações de Fissão nuclear

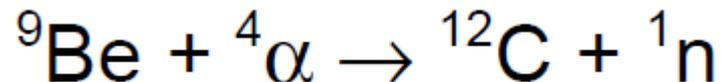
- Reações de fissão nuclear foram as primeiras reações nucleares descobertas no início do século XX
- Temos mais conhecimento sobre a sua dinâmica pelos estudos conduzidos por cerca de 50 anos.
- Toda a reação de fissão é iniciada com o bombardeamento de nêutrons.

Segredos da fissão

DINÂMICA DE NÊUTRONS LIVRES E SEÇÃO DE CHOQUE

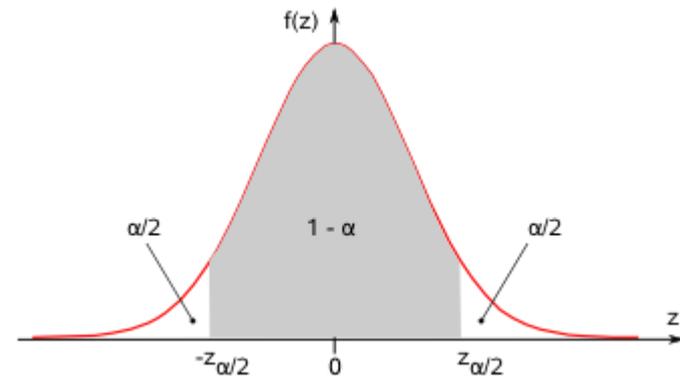
Dinâmica dos Nêutrons livres

- O design básico de qualquer reator nuclear, assim como o entendimento sobre as reações nucleares de Fissão, baseiam-se na dinâmica dos nêutrons livres...
- Única fonte
 - Reações nucleares que emitam nêutrons
 - Ex: Fonte Ra-Be



Dinâmica dos Nêutrons livres

- Não interagem com forças coulombianas e assim não são desviados pela eletrosfera.
- Só perdem energia interagindo com núcleos
 - Espalhamento elástico
 - Espalhamento inelástico
 - Captura
 - Captura radiativa
 - Emissão de nêutrons
 - Fissão



Dinâmica dos Nêutrons livres

- São classificados de acordo com sua energia cinética, uma vez que ela altera profundamente a probabilidade do fenômeno resultante

Espalhamento

– Nêutrons Muito Rápidos : (15 MeV – 50 MeV)

– Nêutrons Rápidos: (0,1 MeV – 15 MeV)

– Nêutrons Intermediários (1 keV – 100 keV)

– Nêutrons Epitérmicos (1 eV – 1 keV)

– Nêutrons Térmicos (< 1 eV)

Captura

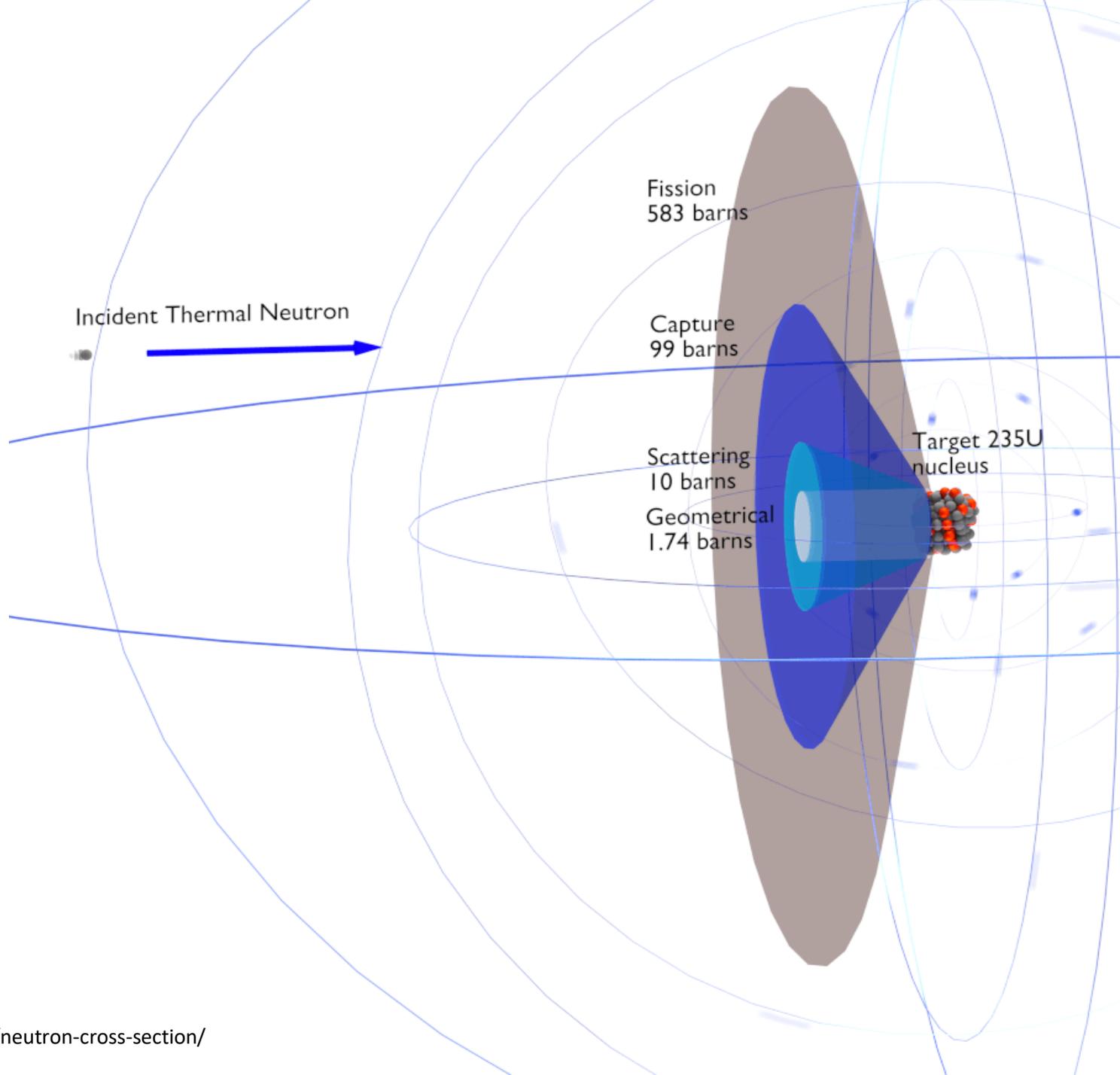
Dinâmica dos Nêutrons livres - Seção de choque

- Para nêutrons com E_c definida incidindo em um núcleo atômico definido, a probabilidade da cada fenômeno é uma constante chamada **seção de choque**

σ Barn = 10^{-28} m^2

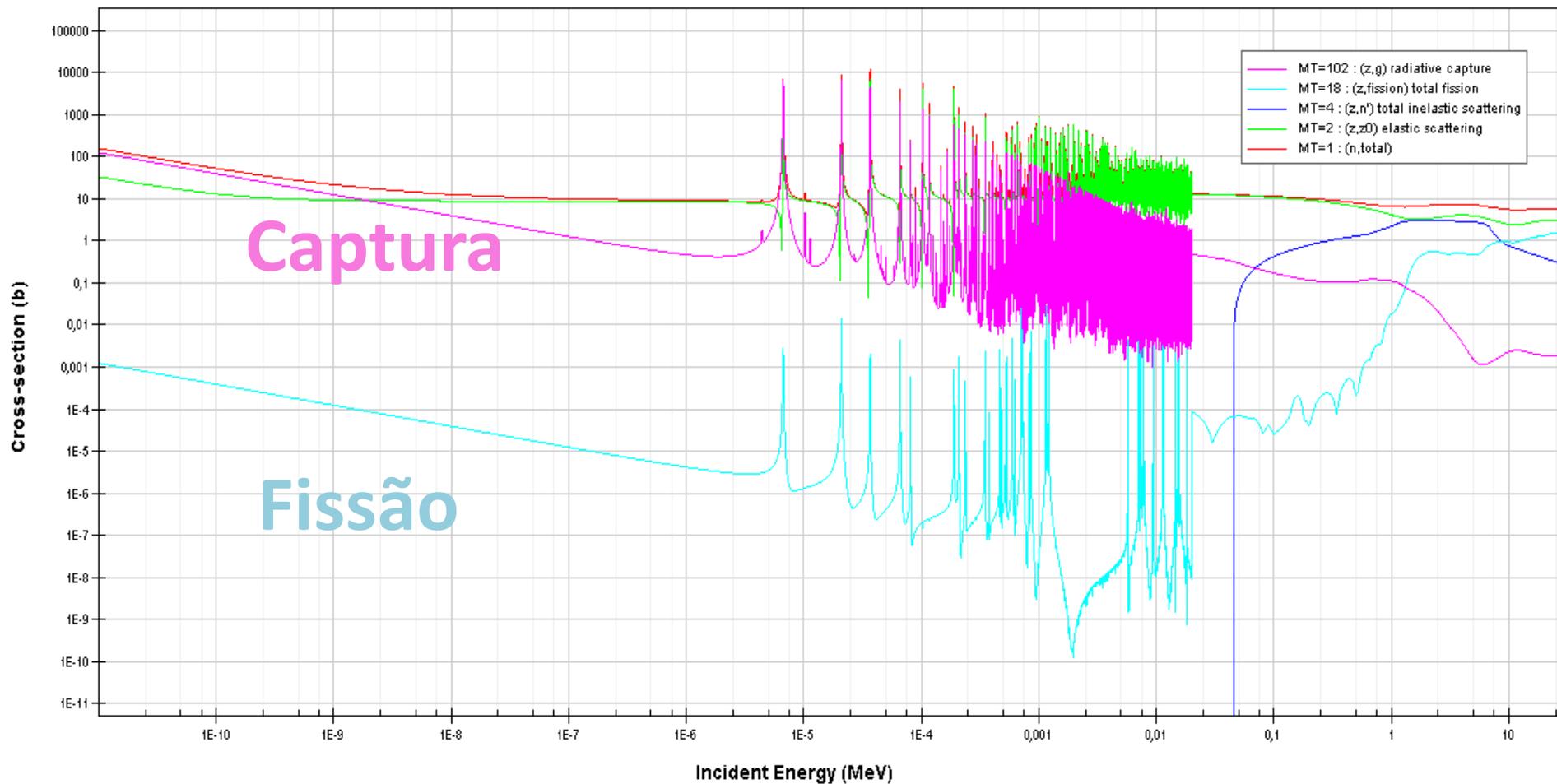
$$\Sigma = N \cdot \sigma$$

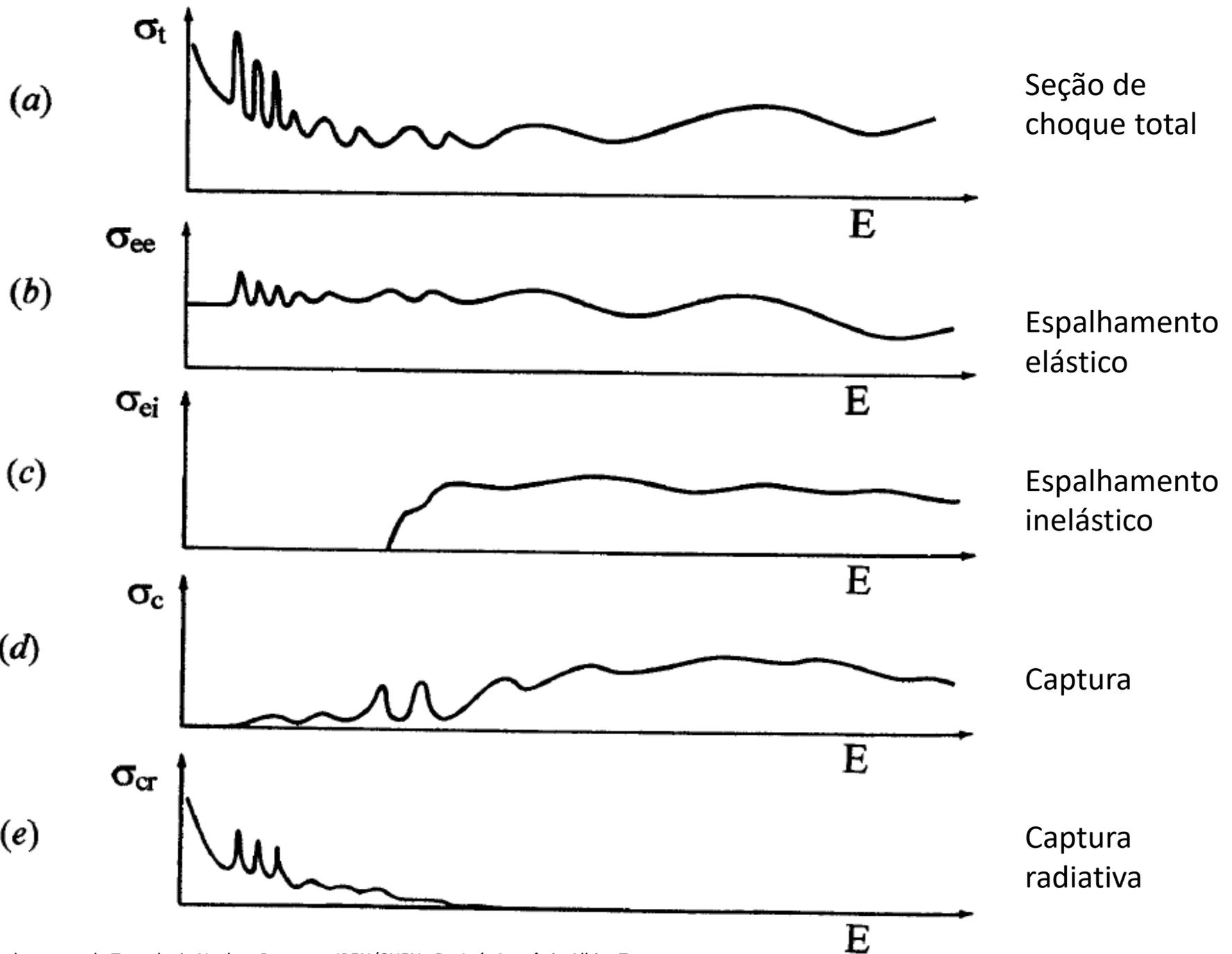




Seção de Choque – U²³⁸

Incident neutron data / JEFF-3.1.1 / U238 // Cross section

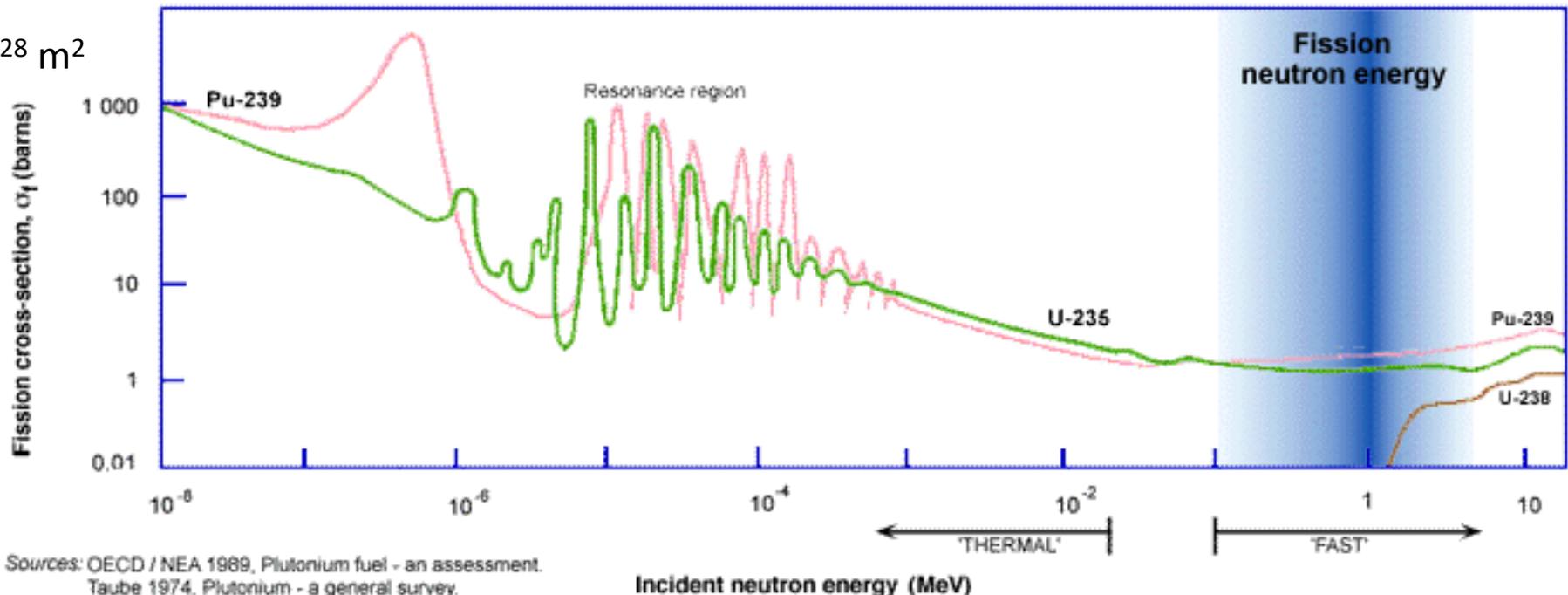




Como funciona – Probabilidade de Fissão

- A Reação de fissão tem uma probabilidade de ocorrer em função da natureza do elemento e da energia cinética do nêutron.

NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM



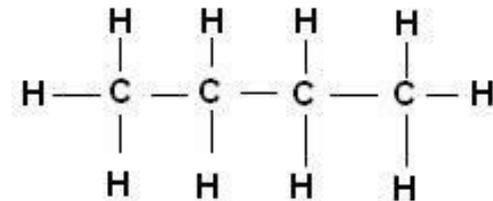
Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.

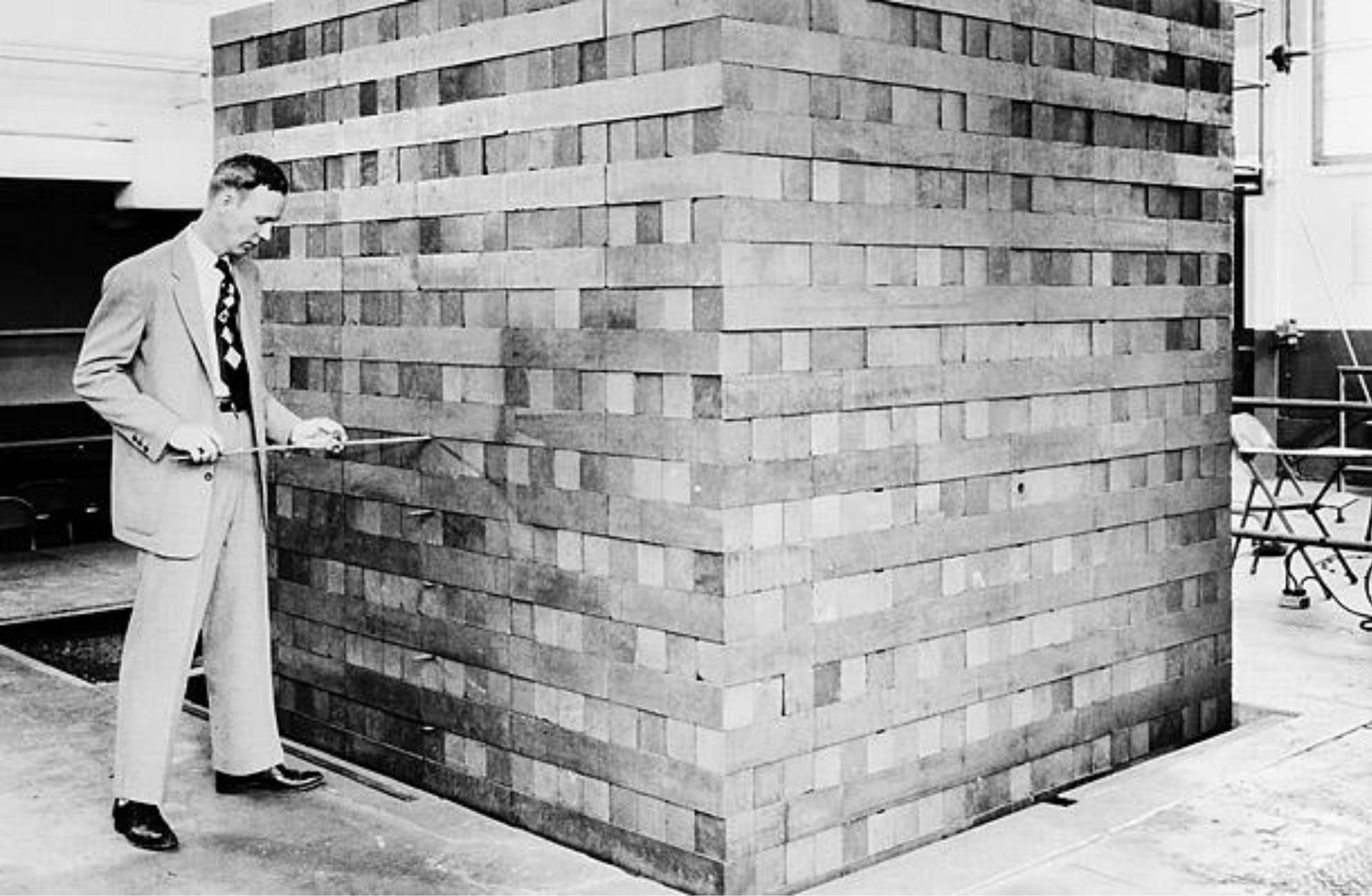
Taube 1974, Plutonium - a general survey.

1 barn = 10^{-28} m^2 , 1 MeV = $1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$

Moderação de nêutrons

- Devido a grande diferença na probabilidade de fissão entre nêutrons Térmicos e Rápidos, em reatores é interessante moderar a energia dos nêutrons para um valor desejável.
- A moderação é feita diminuindo a energia cinética dos nêutrons.....como fazer?
 - Choques com outros núcleos





Aqui E. Fermi, vestindo sua gravata inspirada em nêutrons térmicos, casualmente ajusta um elemento combustível nuclear. *Universidade de Chicago, 1942.*

Moderador	Poder de moderação (cm^{-1})	Razão de moderação
H ₂ O	1,53	72
D ₂ O	0,370	12000
Be	0,176	159
Grafite	0,064	170

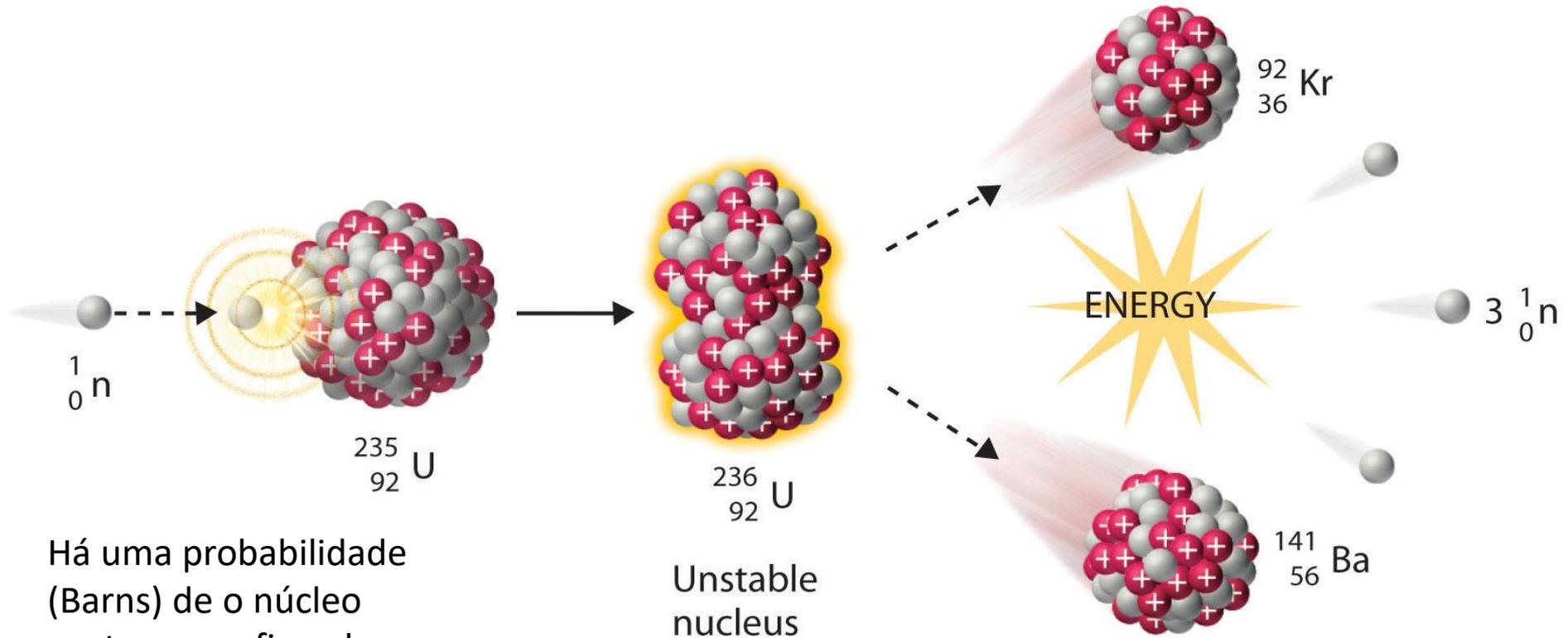
Atualmente....

H₂O e D₂O



FISSÃO DO URÂNIO

Como funciona – Fissão U^{235}

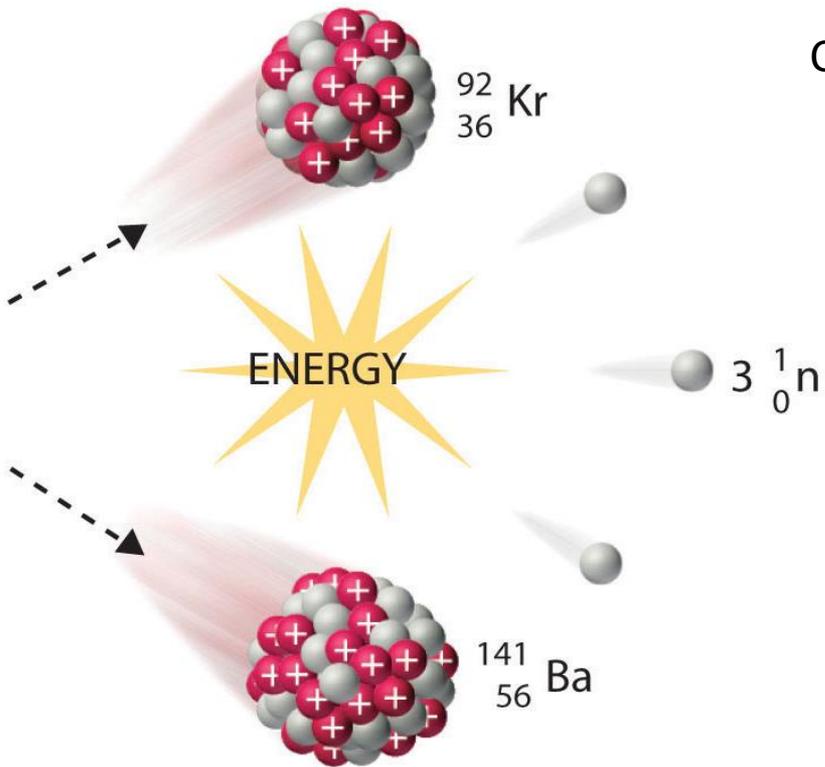


Há uma probabilidade (Barns) de o núcleo capturar o n ficando mais instável

Há uma probabilidade (Barns) de o núcleo instável fissionar ou decair

Após a fissão do núcleo 2 novos de menor massa são criados e energia é liberada

Como funciona – Fissão U^{235}



Como 1 nêutron originou 3 novos, a reação nuclear pode ser sustentada sem uma fonte externa de nêutrons livres e assim fornecer energia

De onde vem a energia liberada pela fissão do núcleo?

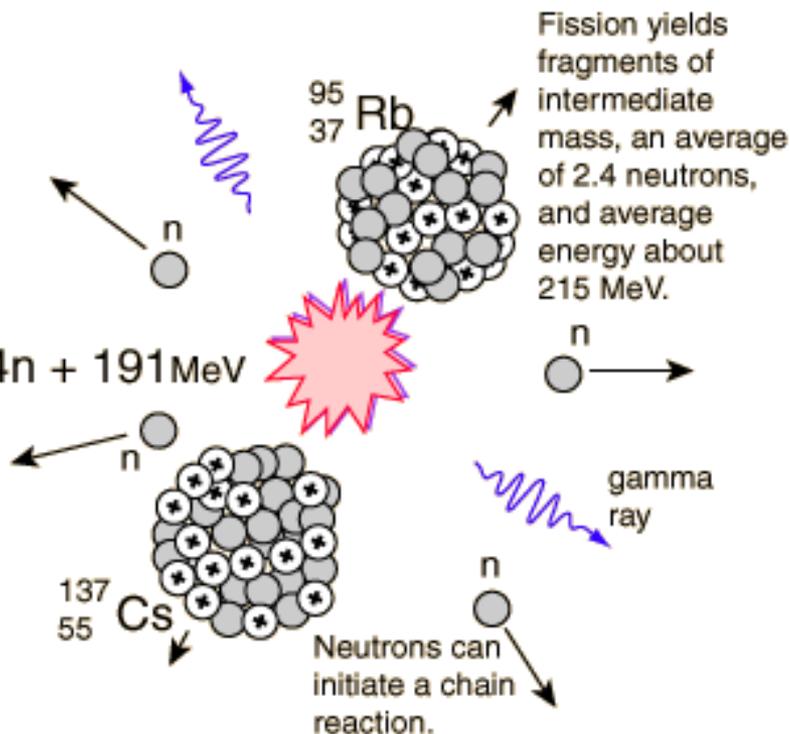
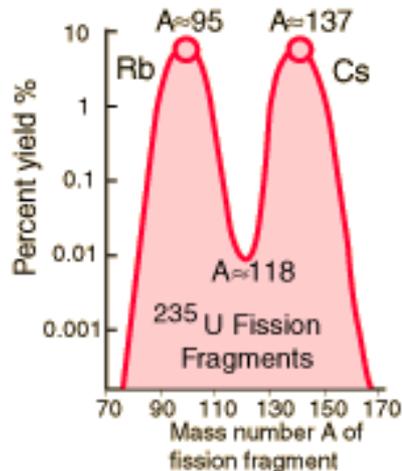
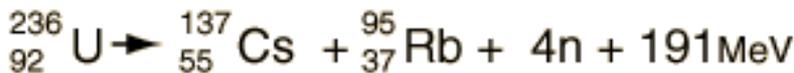
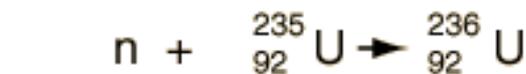
Quanto é essa energia?

A liberação de $3n$ fornece mais nêutrons para continuar o processo

Como funciona – Fissão U^{235}

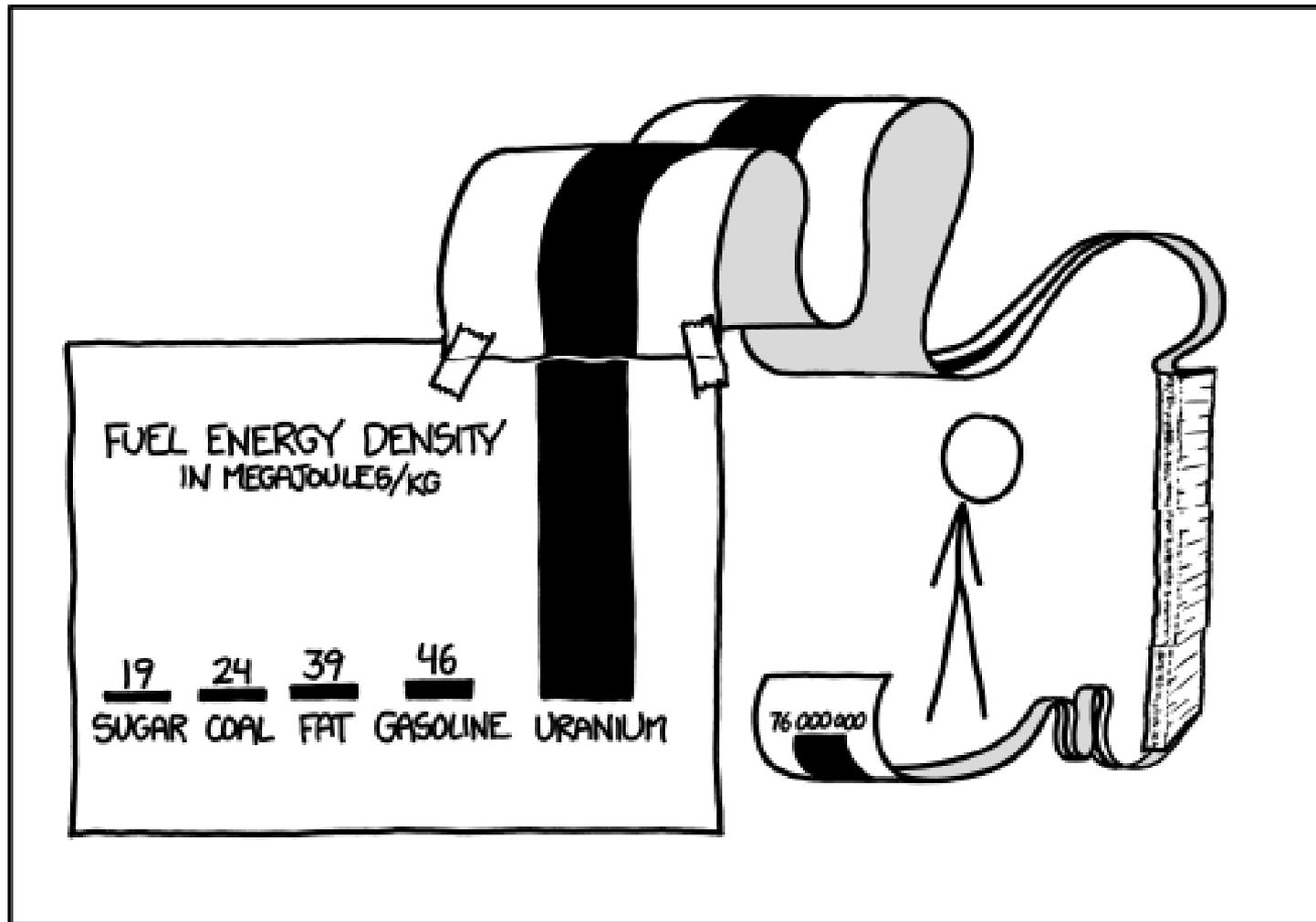
- A quebra do núcleo do U^{235} pode ser feita de 53 maneiras diferentes, nem sempre resulta em Ba e Kr
- Além dos novos núcleos, a reação também gera uma média de 2,4 nêutrons livres além da emissão de raios gama
- A diferença entre a massa do U^{235} e a massa dos núcleos resultantes + massa dos nêutrons emitidos corresponde a massa que foi transformada em energia

Energy yield calculation for a typical fission of uranium-235



Energy balance:	${}^{235}_{92}\text{U}$	218.8969 GeV rest mass energy	
	${}^{137}_{55}\text{Cs}$	127.5011 GeV	Energy yield
	${}^{95}_{37}\text{Rb}$	88.3859 GeV	$= E = \Delta mc^2$
	$3n$	$3 \times 0.93956 \text{ GeV}$	
Net conversion of mass energy		<u>0.1911 GeV</u>	$= 191.1 \text{ MeV}$

Quanto é 200 MeV/átomo?

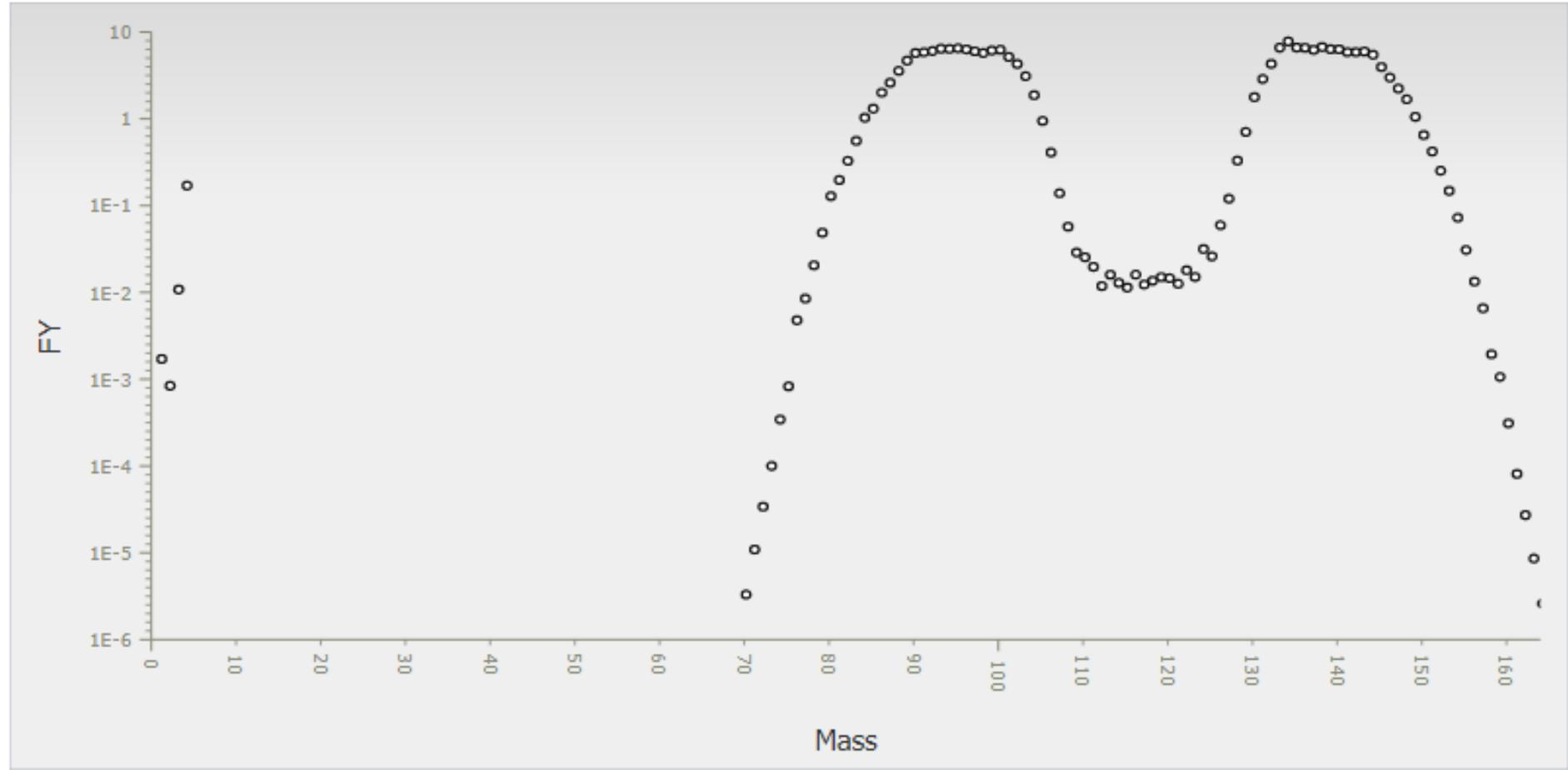


SCIENCE TIP: LOG SCALES ARE FOR QUITTERS WHO CAN'T FIND ENOUGH PAPER TO MAKE THEIR POINT PROPERLY.

Fission Yields

Chain FY: sum of the cumulative yields of the last (stable or long-lived) chain members

²³⁵U Chain Thermal



Chain

Ther.

Fast

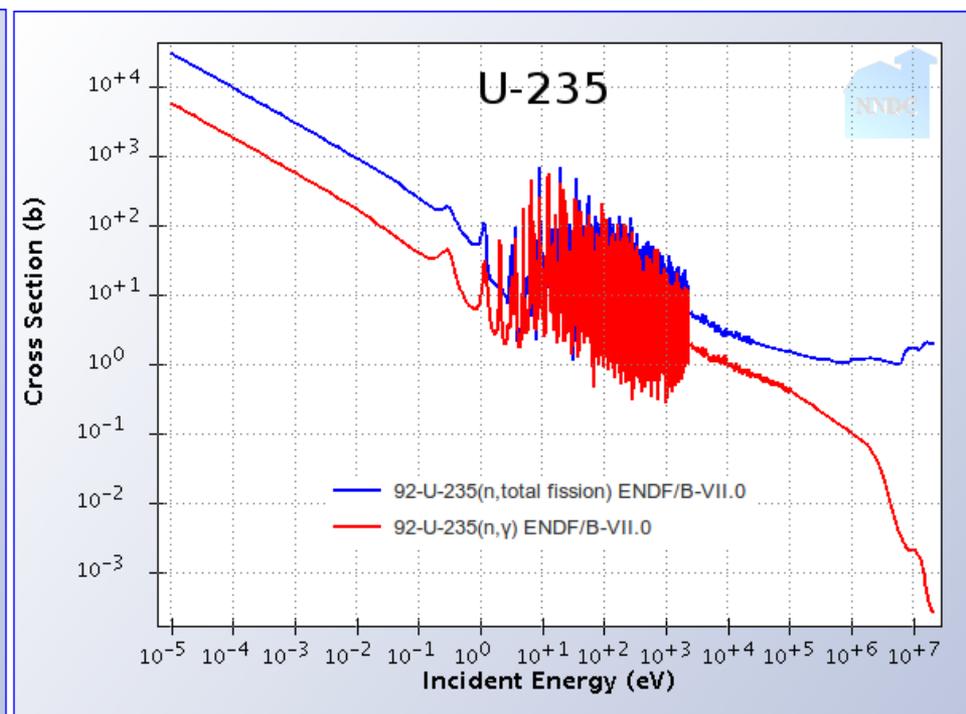
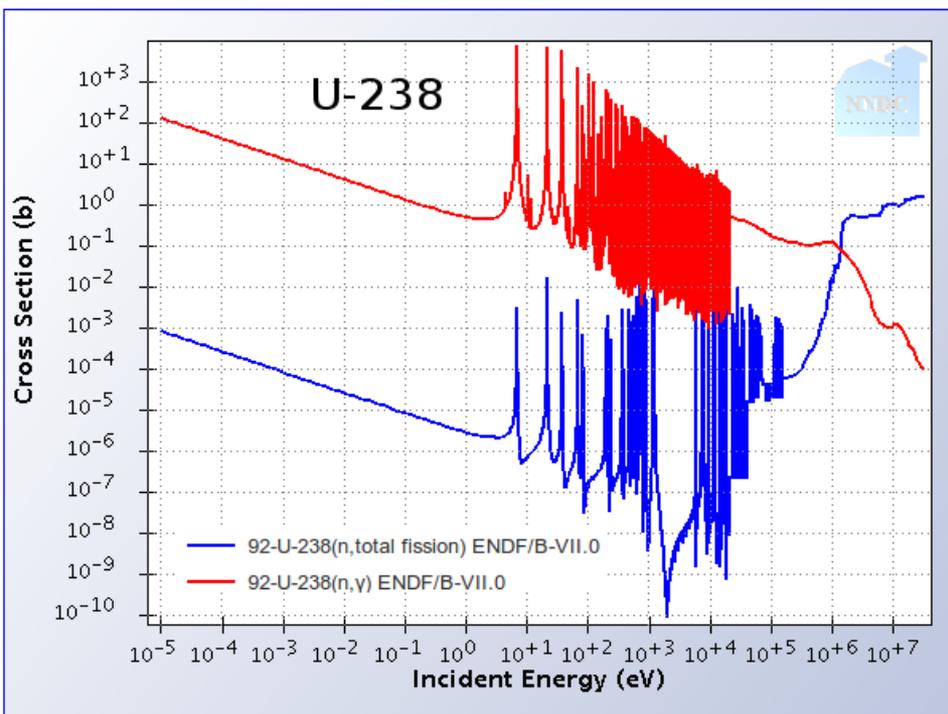
14 MeV

[Redraw](#)

[Reset](#)

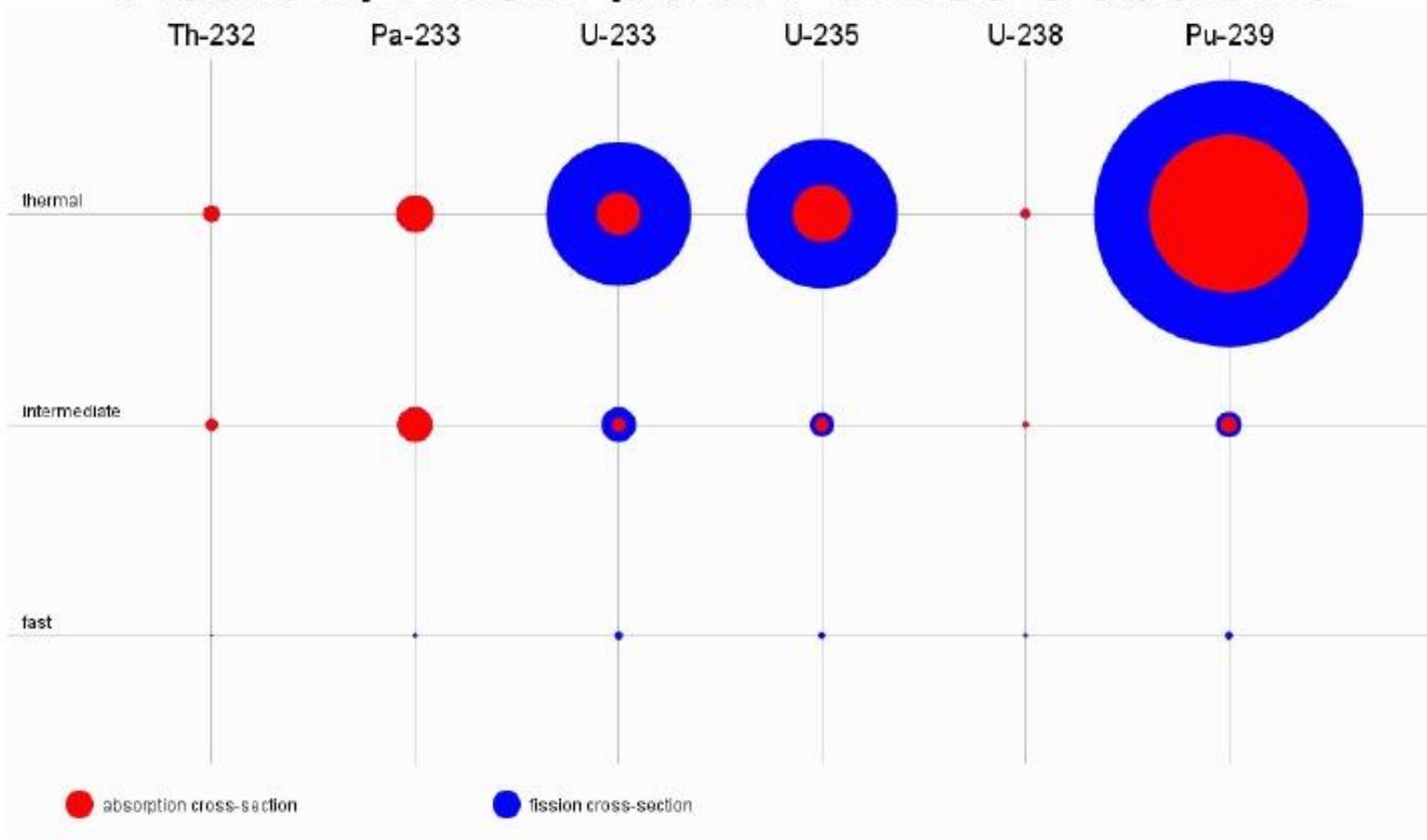
U²³⁵ vs U²³⁸

- Usamos a reação do U²³⁵ como exemplo de fissão, mas o mesmo poderia ser feito com o U²³⁸?
 - U²³⁵ = 0,72% do U existente na terra ~Pt

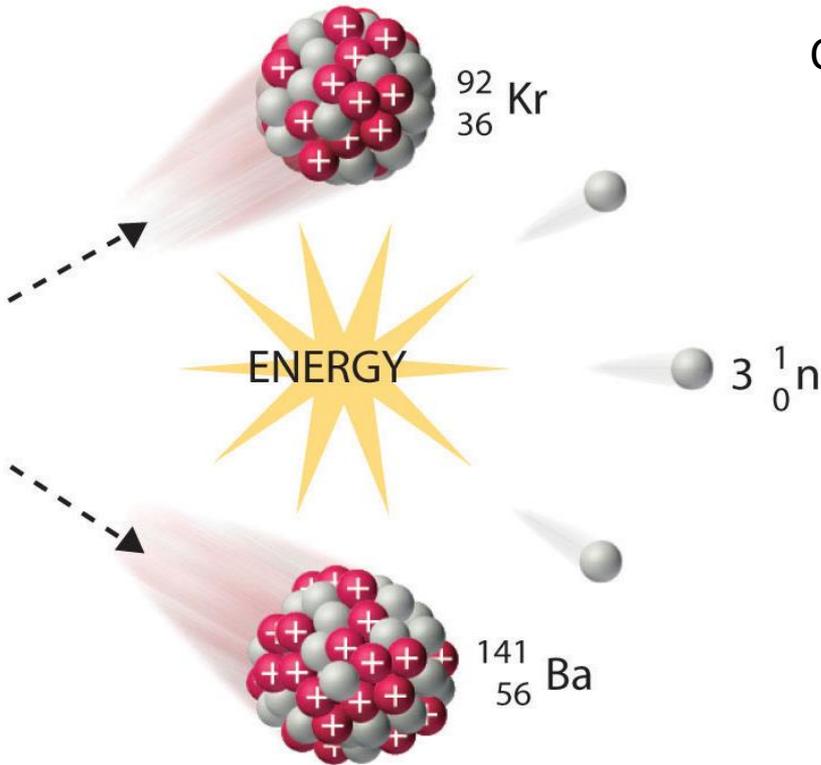


Outros combustíveis?

Fission/Absorption Cross Sections



Como funciona - Fissão



Como 1 nêutron originou 3 novos, a reação nuclear ocorre em cadeia ramificada e cresce exponencialmente, sendo cada reação $\sim 10^{-9}$ s

A liberação de $3n$ fornece mais nêutrons para continuar o processo

Porém, é garantido que cada novo nêutron livre desencadeie uma nova reação de fissão?

Como eu poderia aumentar essa probabilidade?

Bomba A

- Na década de 40 os EUA estavam atrás do desenvolvimento da bomba atômica
 - Reação nuclear em cadeia ramificada

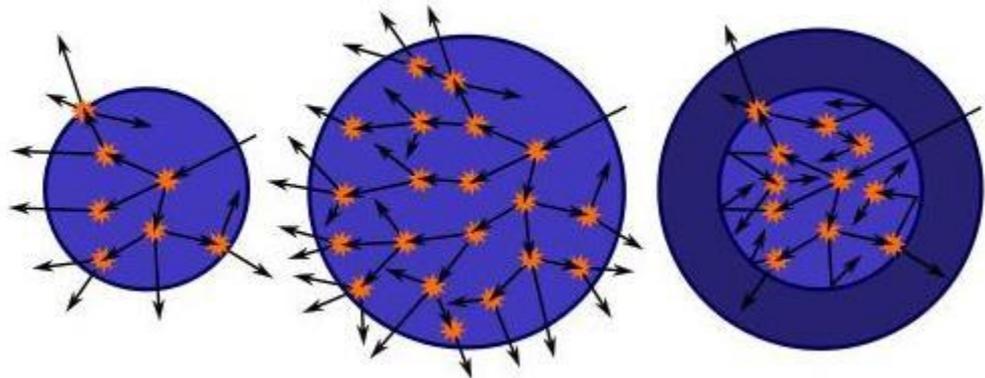
- Como garantir essa reação?
 - Qual combustível?
 - Moderação?
 - Dimensão?



Bomba A

- Reação em cadeia ramificada
 - Fissão do núcleo com $n_{\text{emitidos}} > n_{\text{capturados}}$
 - Captura de n sem fissão
 - Captura de n por outros materiais
 - Escape de n

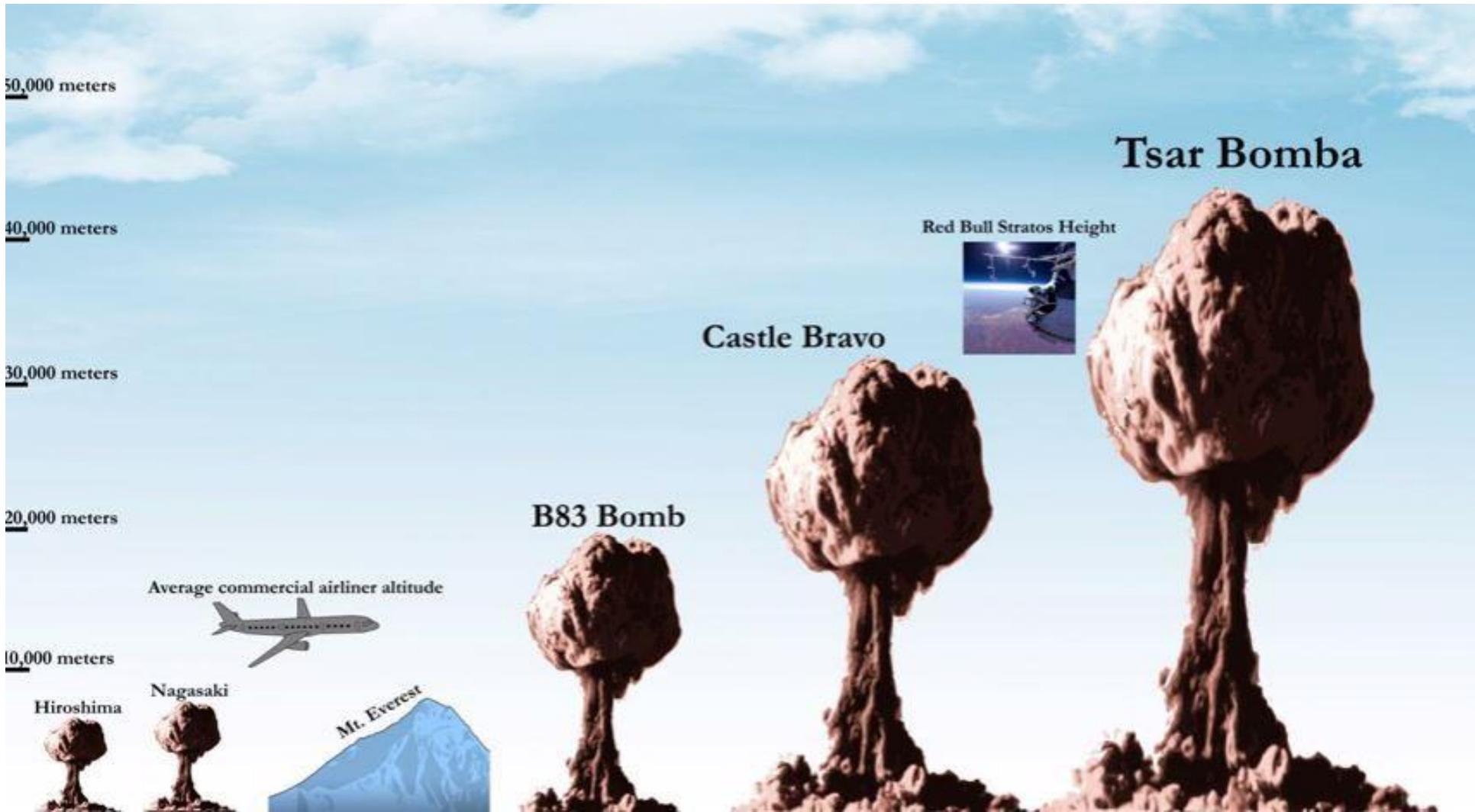
**Tamanho crítico
ou Massa crítica**



Bomba A

- Apenas nêutrons rápidos são usados
- Considerando uma esfera de apenas 1 material:
 - Não é possível obter uma reação autossustentável somente com U^{238}
 - É possível com U^{235} e Pu^{239}
 - >15 kg de U^{235}
 - >5 kg de Pu^{239}

<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq4-1.html>



Reator vs. Bomba

- Falaremos mais adiante em mais detalhes sobre tipos de reatores
- Principal diferença reside no tipo de reação
 - Bomba: Reação em cadeia ramificada
 - Reator: Reação em cadeia autossustentada



Quais os pontos chaves para um reator de fissão

DESIGN BÁSICO DE REATORES

Design Básico de Reatores

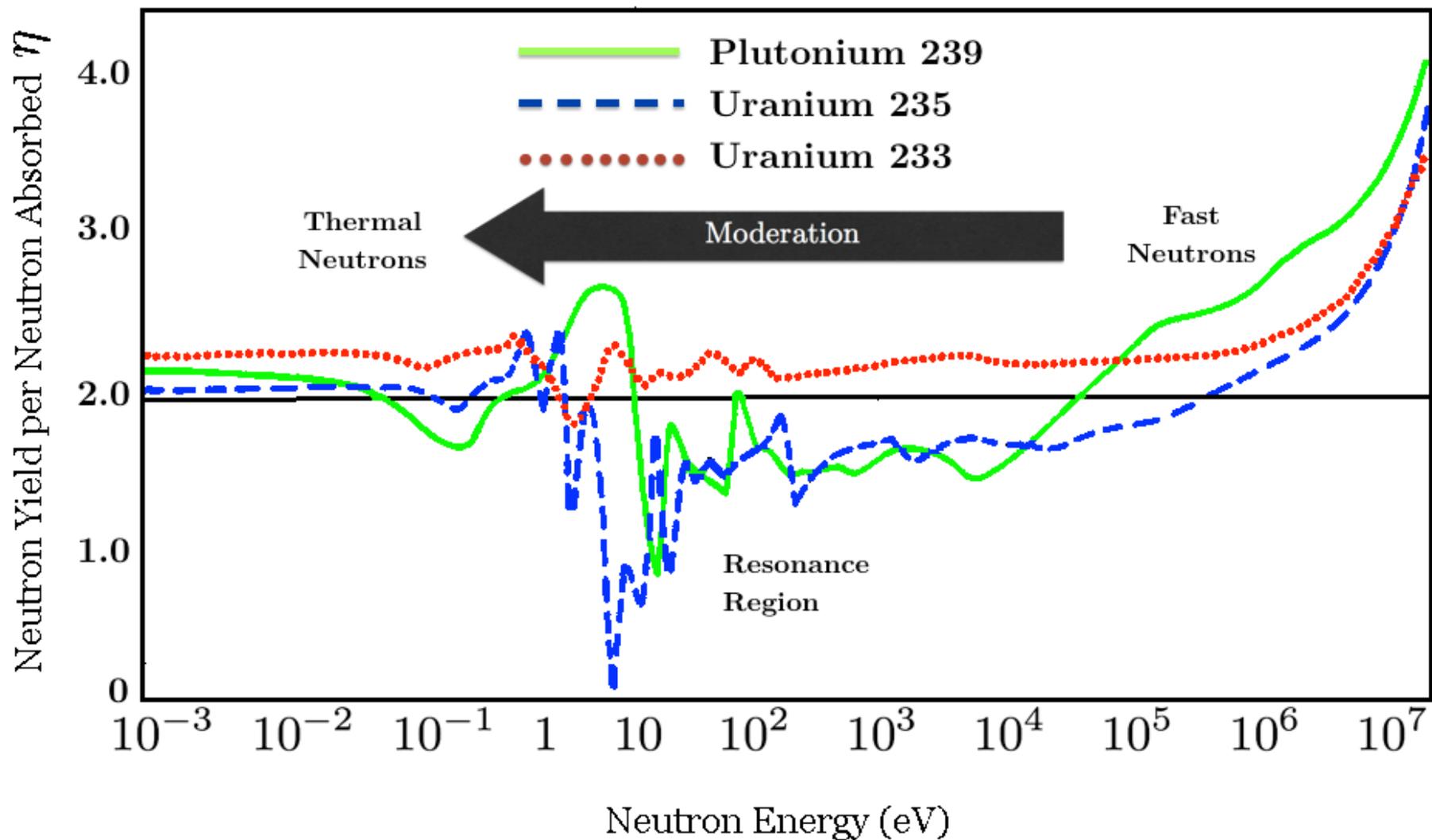
- Pelo que vimos até agora, o que seria necessário para construir um reator nuclear?
 - Em primeiro lugar, o que gera o reator?
 - Calor
 - De onde vem a energia?
 - Do núcleo atômico
 - Como extrair energia do núcleo?
 - Deixando ele mais estável (Fissão ou Fusão)

Design Básico de Reatores

- Se nos concentrarmos na Fissão nuclear...
 - Como fissionar um núcleo?
 - Bombardeando com nêutrons
 - Posso usar qualquer tipo de nêutron?
 - Não, depende do núcleo do meu combustível
 - Se usar um núcleo com alto Barn de fissão para nêutrons térmicos?
 - Preciso moderar os nêutrons
 - Se após fissionar, o meu núcleo liberar só 1 n?
 - Já era, deu ruim!

Quantos Nêutrons são liberados?

- Parâmetro fundamental!
- Há muitas dezenas de núcleos capazes de fissionar, porém só alguns irão emitir um número suficiente de novos nêutrons para permitir uma reação auto-sustentada....e menos ainda irão emití-los e ainda possuir uma alta seção de choque para fissão.



Design Básico de Reatores

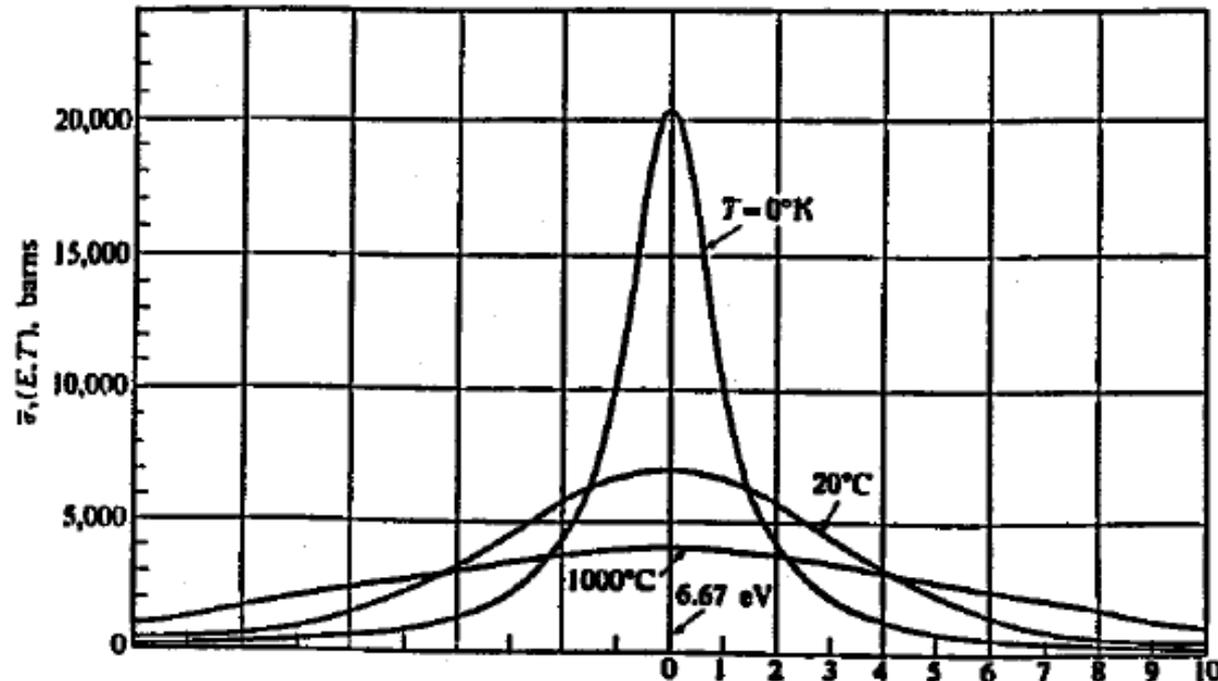
- Caso tudo dê certo até aqui, e eu consiga gerar calor com a fissão auto-sustentada de um núcleo....
 - Como eu uso este calor?
 - Posso gerar vapor a alta pressão e usar o ΔP para gerar trabalho útil
 - O que eu preciso para gerar vapor?
 - Trocadores de calor que refrigerem o núcleo do reator
 - O que ocorre se eu não conseguir refrigerar?
 - Melt-down (derretimento do núcleo)

E aí?!?!?

Efeito da Temperatura

- A temperatura influencia em reações de fissão?
 - Pode mudar a seção de choque, mas só para nêutrons térmicos devido a ordem de grandeza de energia \sim eV

$$\bar{\sigma}(E, T) = \frac{1}{N_V} \int v_r \cdot \sigma(E_c) \cdot N(\vec{V}) \cdot d\vec{V}$$



Design Básico de Reatores

- O aumento da temperatura ou não influencia ou apenas diminui a reação nuclear
- Mas e porque então é algo perigoso?
 - O perigo está na perda da contenção e em reações químicas decorrentes.
 - Vazamento de material radioativo
 - Acúmulo de H_2 e O_2

Design Básico de Reatores

- Imaginando que tudo ocorra bem...
 - Após um certo tempo de operação, o que ocorre com o meu elemento combustível (material físsil)
 - Será consumido e irá acabar uma hora
 - Porém bem antes de acabar, o que deve ocorrer com a sustentabilidade da minha reação se a sua concentração diminuir?
 - A competição entre captura de n e fissão não irá mais permitir uma reação auto-sustentada, mesmo que ainda haja material físsil presente.

Design Básico de Reatores – Perguntas Difíceis

- Quanto ainda sobra de material físsil no momento em que não é mais possível manter a reação em cadeia?
 - Dependerá do design do meu reator
 - Para a maioria dos reatores existentes...~ 30%
- O que fazer com esse material?
 - Armazenar em estruturas protegidas e enterrar dentro de uma montanha!

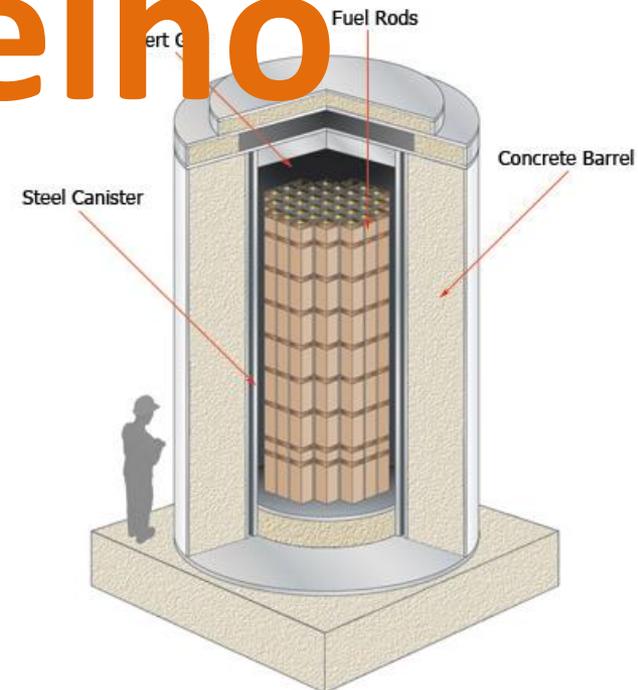
Produtos de Fissão

- O que são produtos de fissão?
 - Resultado da quebra do U e Pu
 - Presentes no lixo radioativo

Novo



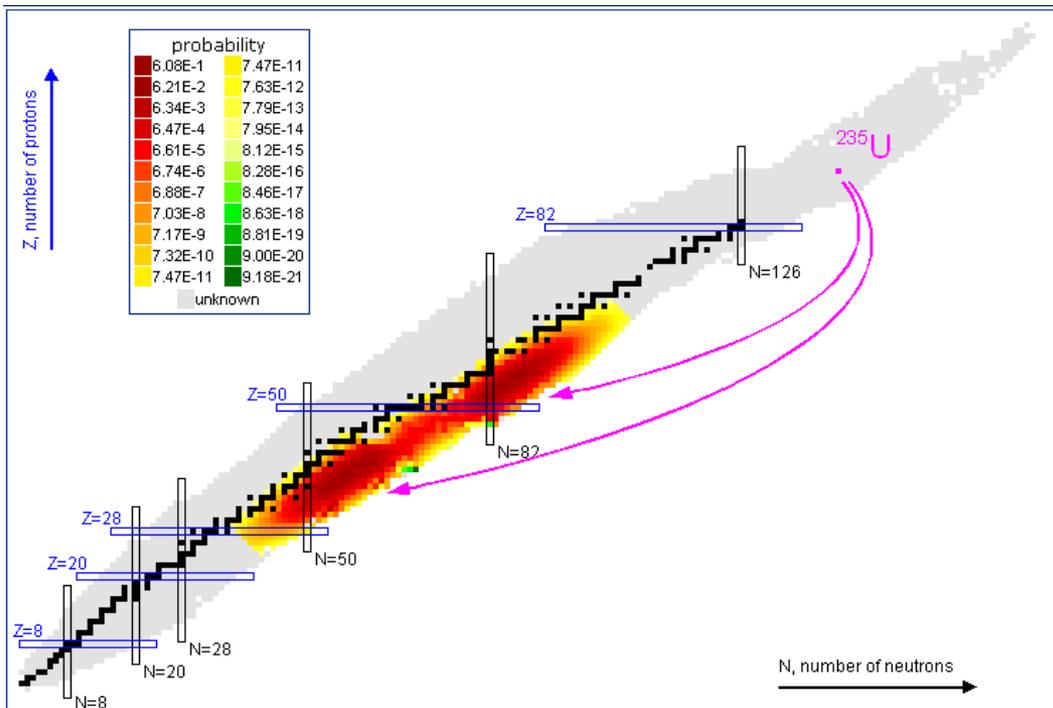
Velho



Produtos de Fissão

A relação **Nêutrons/Prótons = 1** para elementos estáveis mais leves, porém é de **1,5** para elementos estáveis mais pesados.

Após a reação nuclear de fissão do U, os **2 novos núcleos mais leves, herdaram** essa relação de **1,5** o que os torna muito mais radioativos do que o combustível inicial





GREENPEACE



ATÉ KA INSPECCÃO NOS SEPARÉ .

JR-22-67

P
1984

Porquê estamos aonde estamos

BREVE HISTÓRICO

Breve Histórico

- Um pouco sobre a história da tecnologia nuclear
 - Início?
 - Final 1800 início 1900
 - Joseph Thompson (1897) – e-
 - Albert Einstein (1905) – $E=mc^2$
 - Ernest Rutherford (1917) – N_2 em O_2 e Próton
 - James Chadwick (1932) – Nêutron
 - Enrico Fermi (1938) Nêutrons moderados
 - Enigma do Urânio
 - Otto Hahn & Lise Meitner (1938-1939) - Fissão
 - Idda Nodack – enigma do U em 1934



Breve Histórico

- Após o enigma do U ter sido resolvido, houve imediata preocupação de que uma nova bomba poderia ser criada.
- Tal fato foi levado para o presidente Roosevelt em uma carta encaminhada por Albert Einstein
- Iniciou-se uma corrida a partir de 1940 em Columbia e Universidade de Chicago para desenvolver a reação em cadeia
- Glenn Seaborg 1941 – Berkeley Plutônio
- Após Pearl Harbor em 1941 – Investimento massivo

Breve Histórico

- Wigner liderou o projeto para a construção da bomba após 1942
 - 1945 atingiram o objetivo
 - Possíveis caminhos:



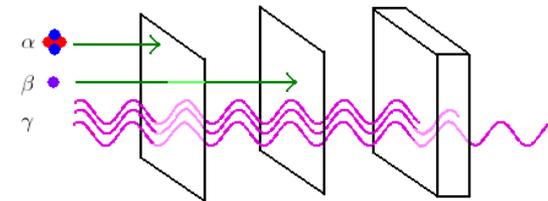
Uranium-233



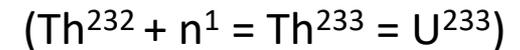
Uranium-235



Plutonium



Paper Aluminium Lead



(Enriquecimento Isotópico)



Breve Histórico

- Somente após a guerra se pensou em utilizar a recém desenvolvida tecnologia para produção de energia
- Quais caminhos seguir?
 - Abundância dos elementos
 - Facilidade de se obter o combustível
 - Como ele deveria ser utilizado em um reator

	16	LEAD
	15	GALLIUM
10 ppm	10	THORIUM
	7	SAMARIUM
	6	GADOLINIUM
	6	PRASEODYMIUM
	3	BORON
	3	BROMINE
	2.5	URANIUM
	2	BERYLLIUM
	1.5	TIN
1000 ppG	1	TUNGSTEN
	1	MOLYBDENUM
100 ppG	0.2	MERCURY
	0.1	SILVER
	0.018	URANIUM-235
	0.005	PLATINUM
	0.002	GOLD

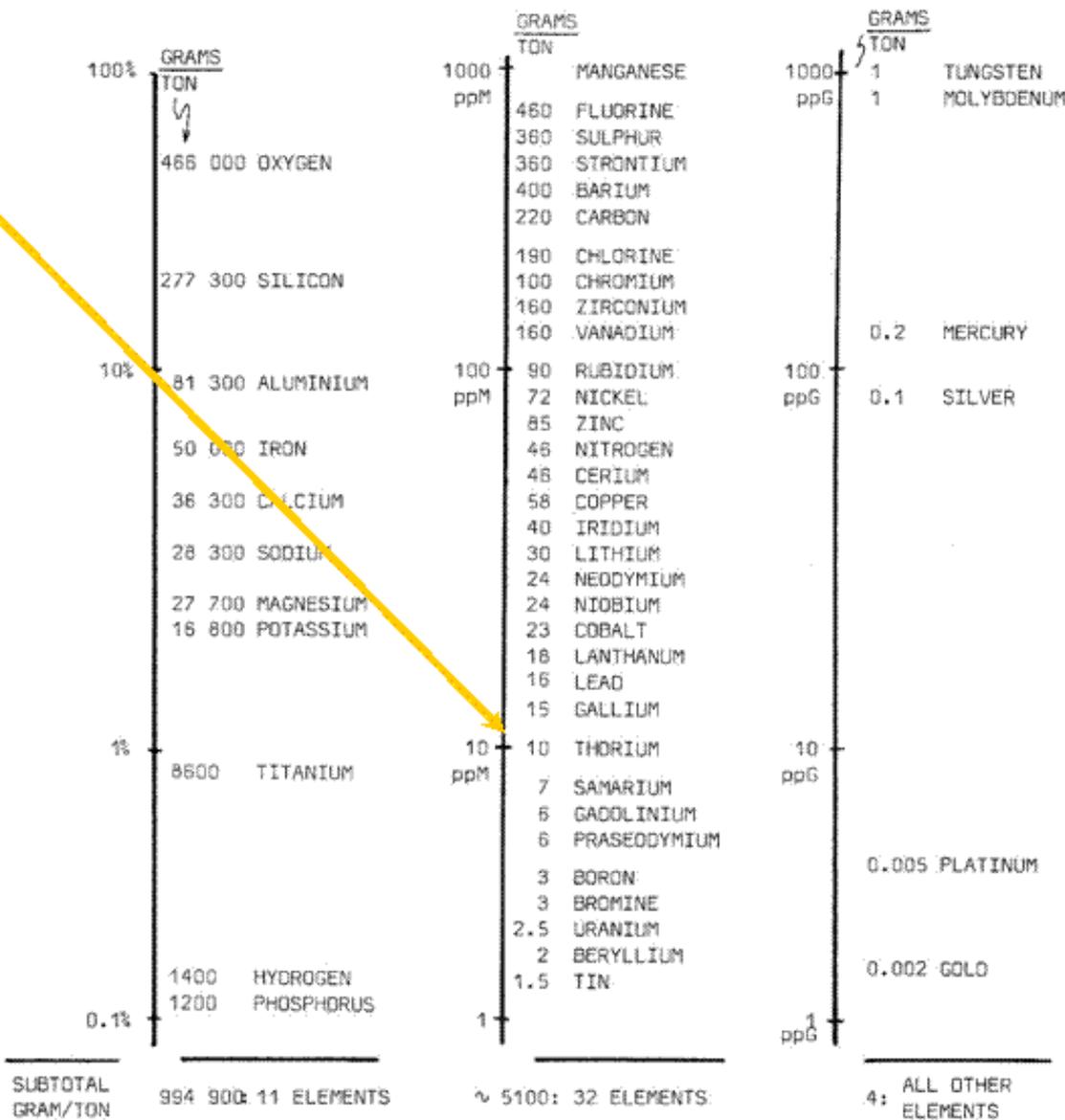
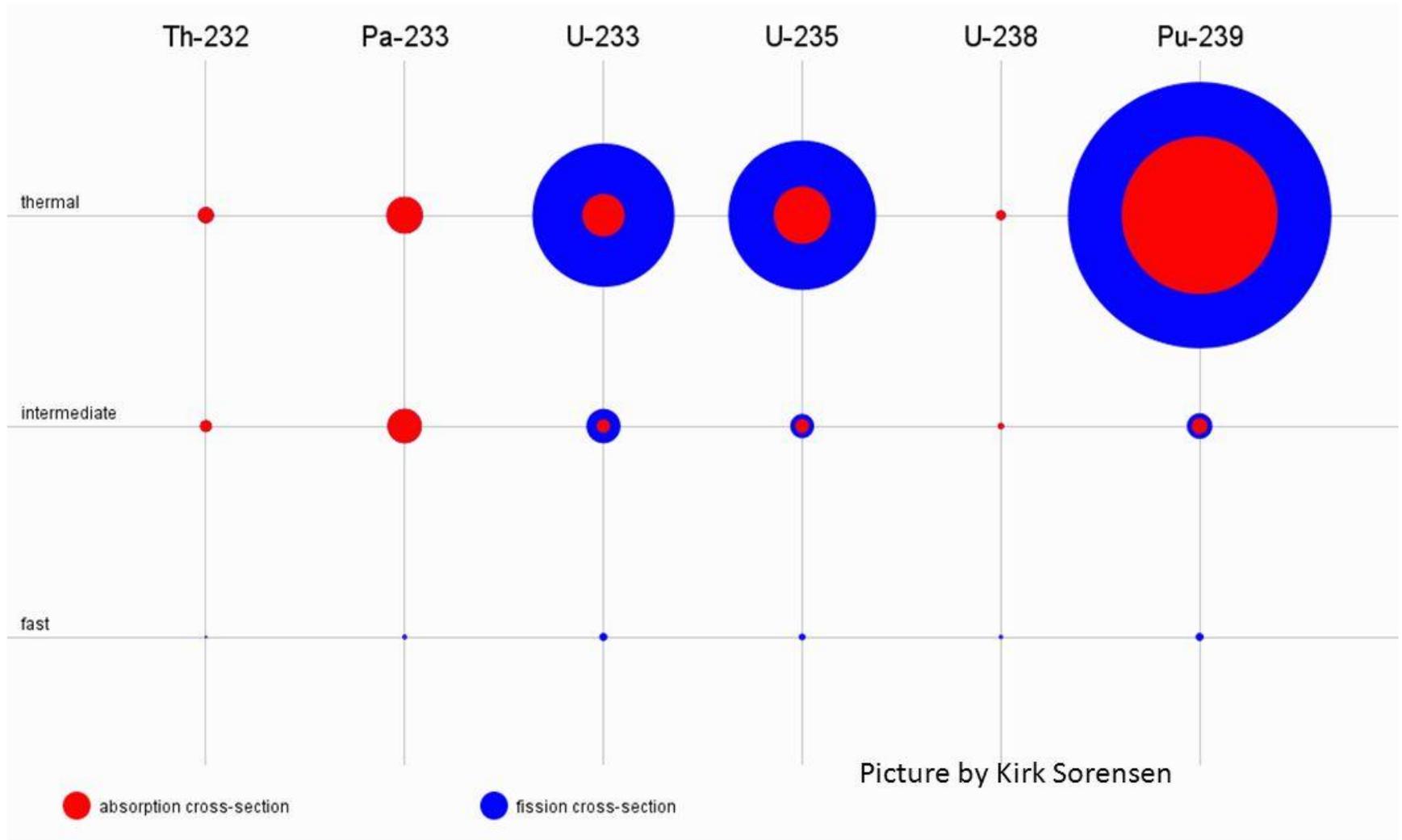


Fig. 5.13. The chemical composition of the Earth's crust.

Fission/Absorption Cross Sections



Breve Histórico

- Na época houve uma discussão sobre qual tecnologia seguir
 - Laboratório de Argonne
 - (U²³⁵ - U²³⁸)
 - Thermal - (U²³⁵ - U²³⁸) (nuclear airplane)
 - (Th²³² - U²³³)
- Wigner para o uso civil
- A defesa defendia o uso para fins militares, bem como durante o programa nuclear

U²³⁵

E no fim....

- No final, nenhum dos dois reatores foi seguido, e o design predominante foi o PWR baseado em U^{235} .
- Patente do PWR era de Weinberg, mas que surpreendentemente advogava em favor do Th
 - Weinberg era Eng. Químico e não acreditava que altas pressões em um reator seria algo seguro
 - Falaremos mais sobre isso em tecnologias esquecidas...

Porquê o PWR

- A escolha final na direção do PWR também sofreu influência nos reatores fast-Breeder baseados em Plutônio.
 - Combustível sólido
 - Design semelhante

Hoje

- A herança tecnológica para construir um reator de potência veio do que funcionava bem para a bomba, mas não do que funcionaria bem para potência

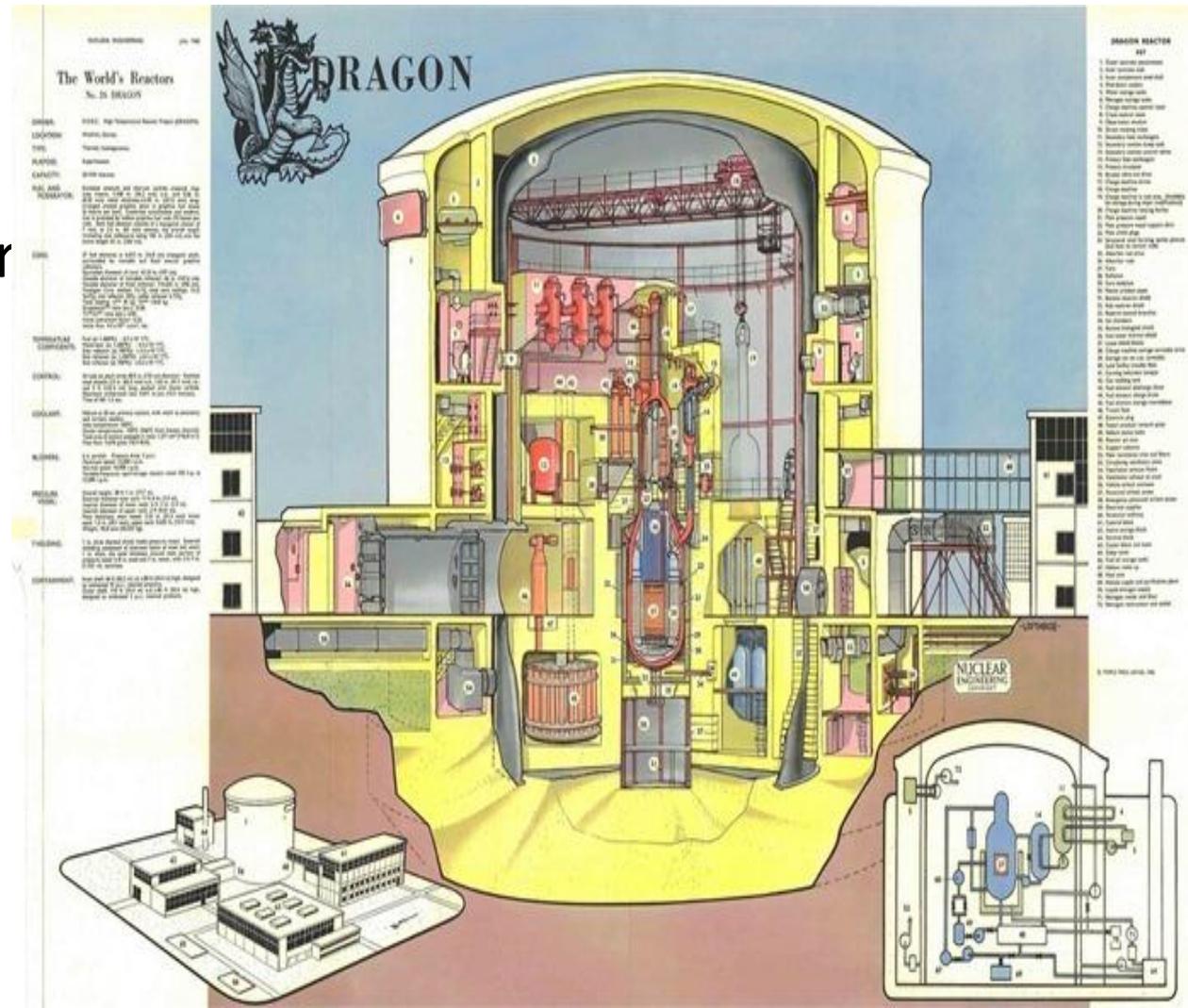


TIPOS DE REACTORES

Tipos de reatores?

- Qual tipo?

- Fast Breed
- Thermo Reactor
- Heavy Water
- Light Water
- Graphite
- PWR
- MSR
- LFTR
- ...

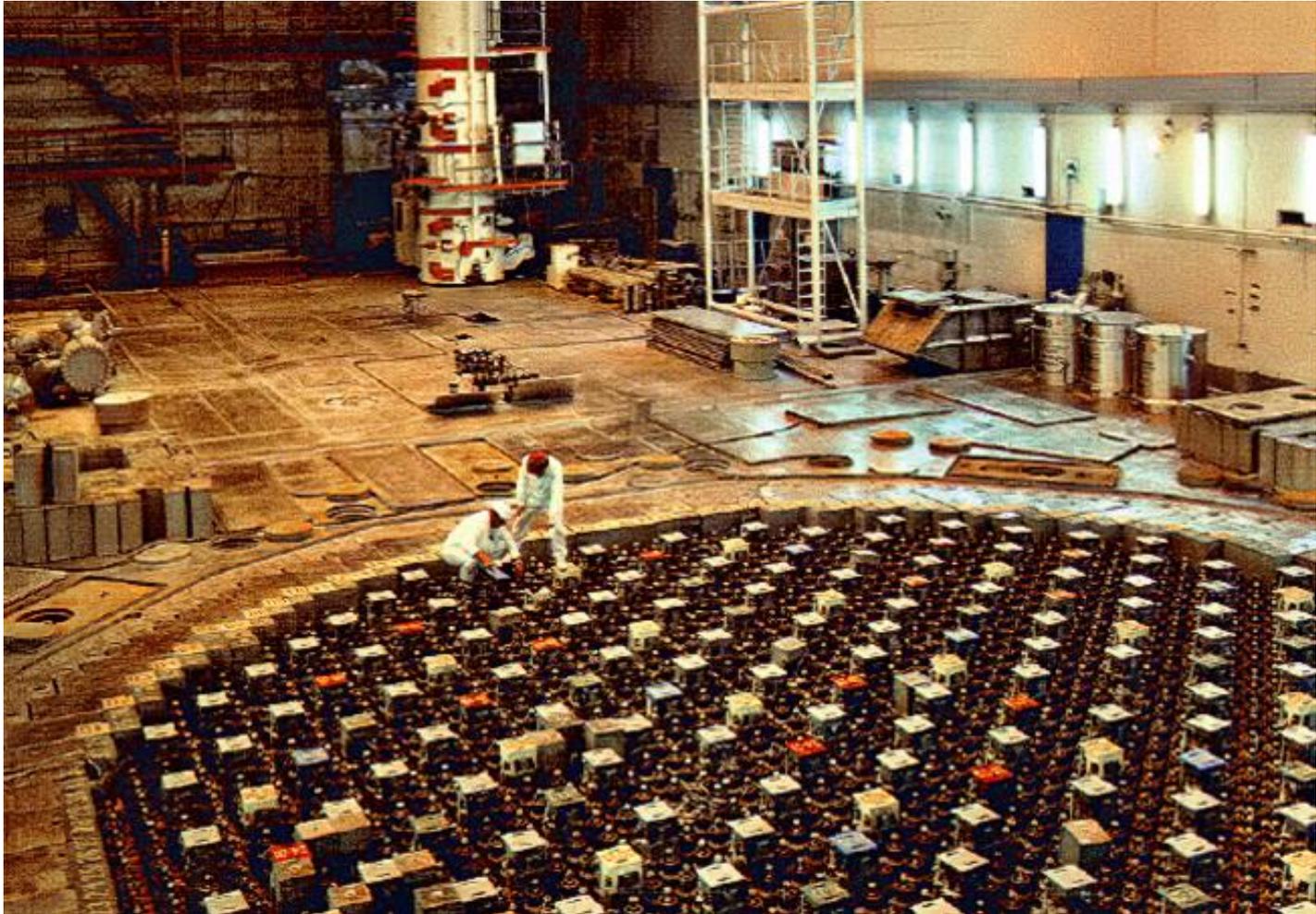


Graphite Reactor

- Primeiro reator- Chicago Pile 1
- Permite o uso de U^{238} natural, assim como reatores de D_2O
- Gas-cooled reactors
 - [Magnox](#)
 - [UNGG reactor](#)
 - [Advanced gas-cooled reactor](#) (AGR)
- Water-cooled reactors
 - [RBMK](#)
 - [EGP-6](#)
- High-temperature gas-cooled reactors
 - [Dragon reactor](#)
 - [AVR](#)
 - [Peach Bottom Nuclear Generating Station](#), Unit 1
 - [THTR-300](#)
 - [Fort St. Vrain Generating Station](#)

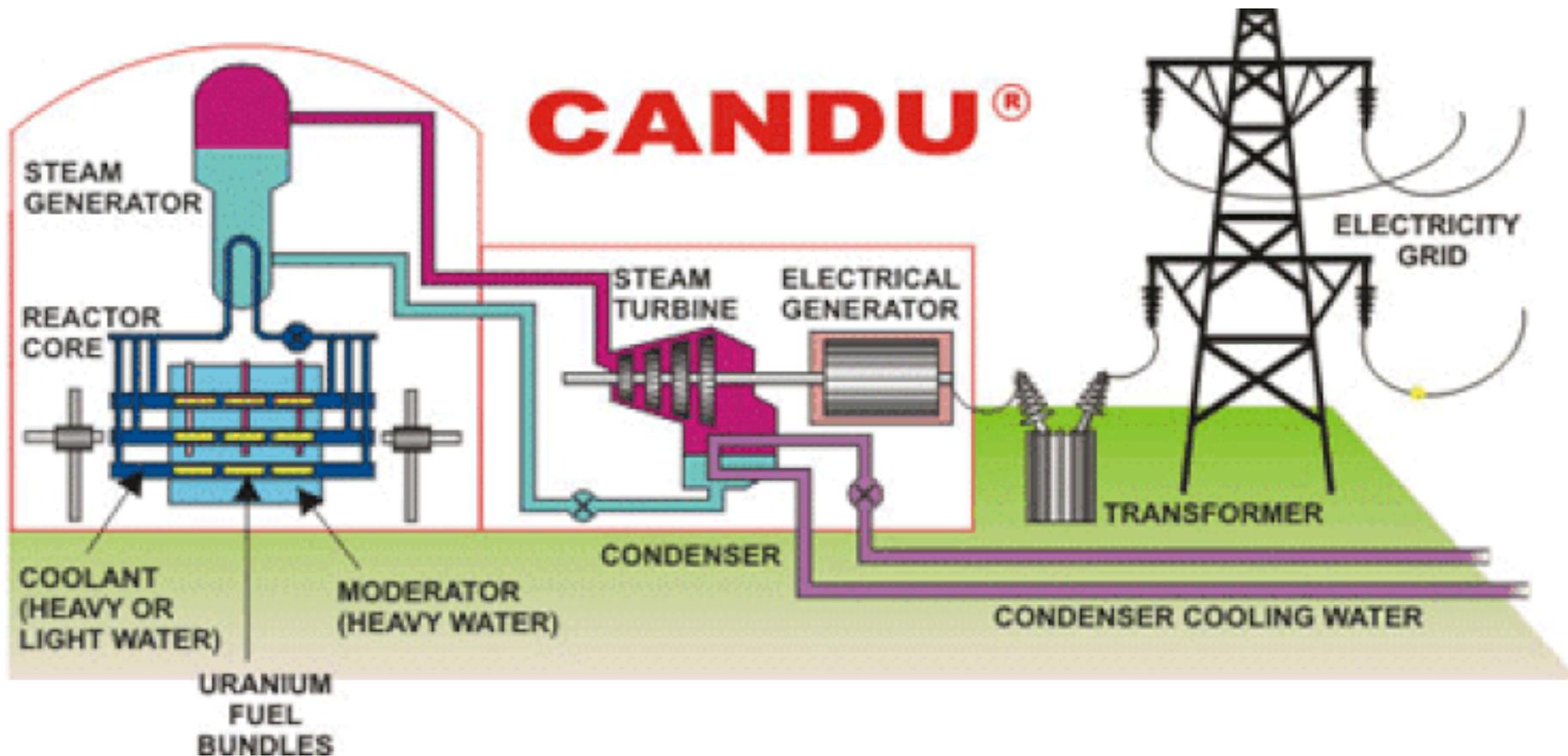
Chernobyl - RBMK

- *Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy*

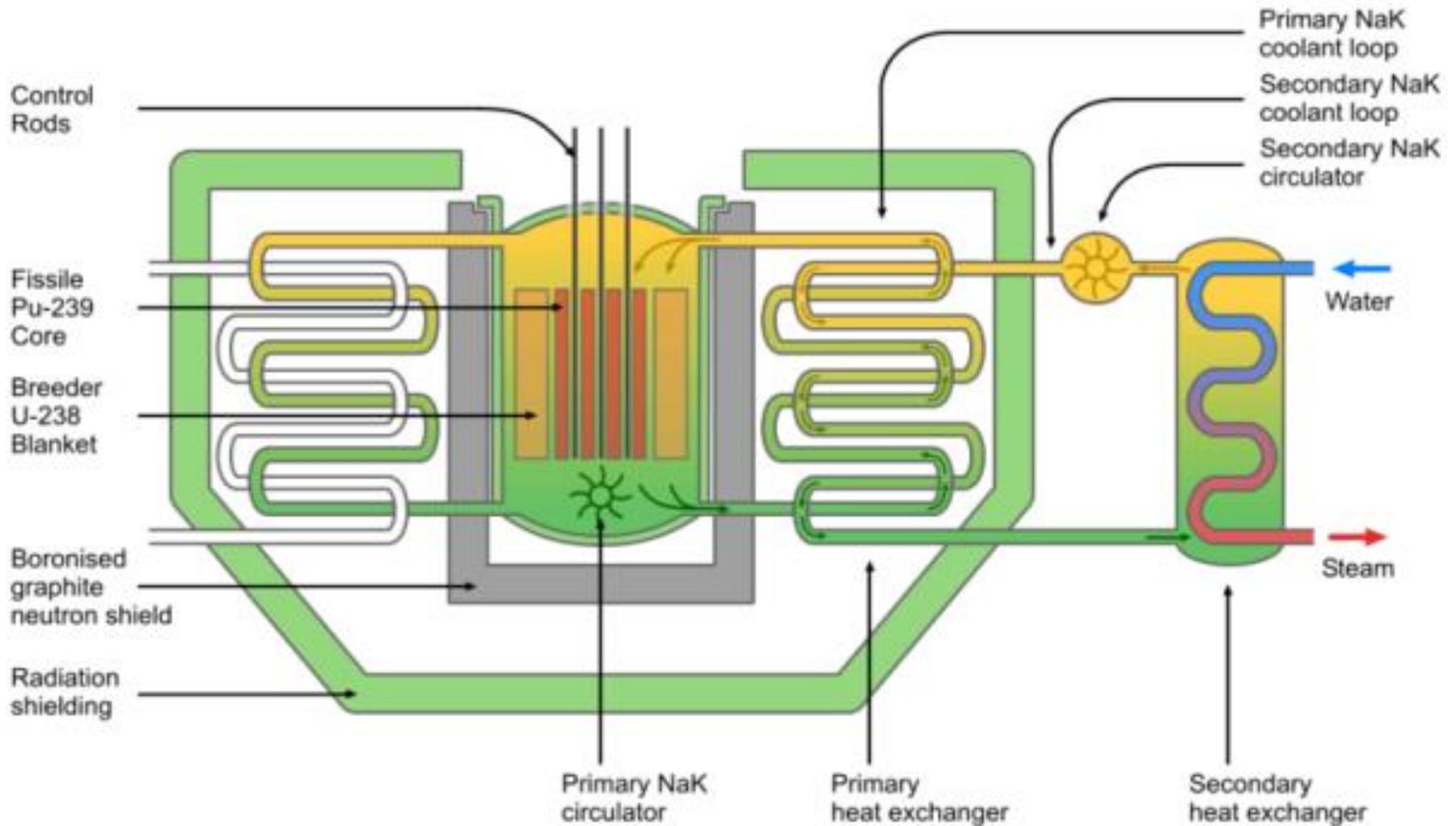


Heavy Water Reactor

Similar ao PWR, mas com o benefício de não necessitar Urânio enriquecido

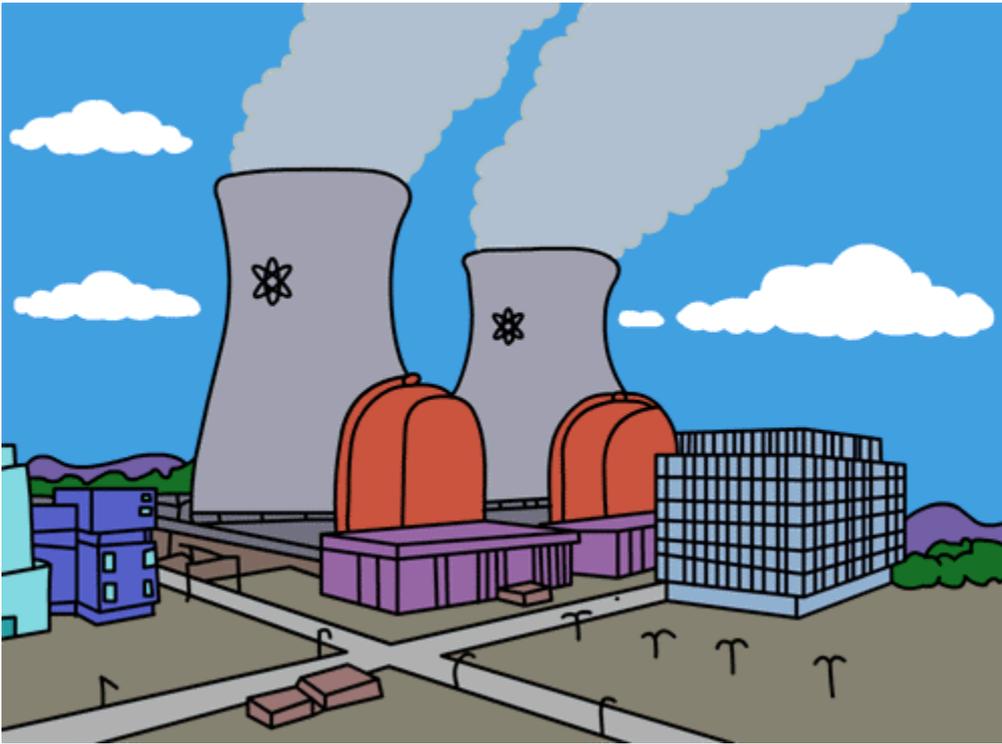


Fast Breeder Reactor - FBR



FBR



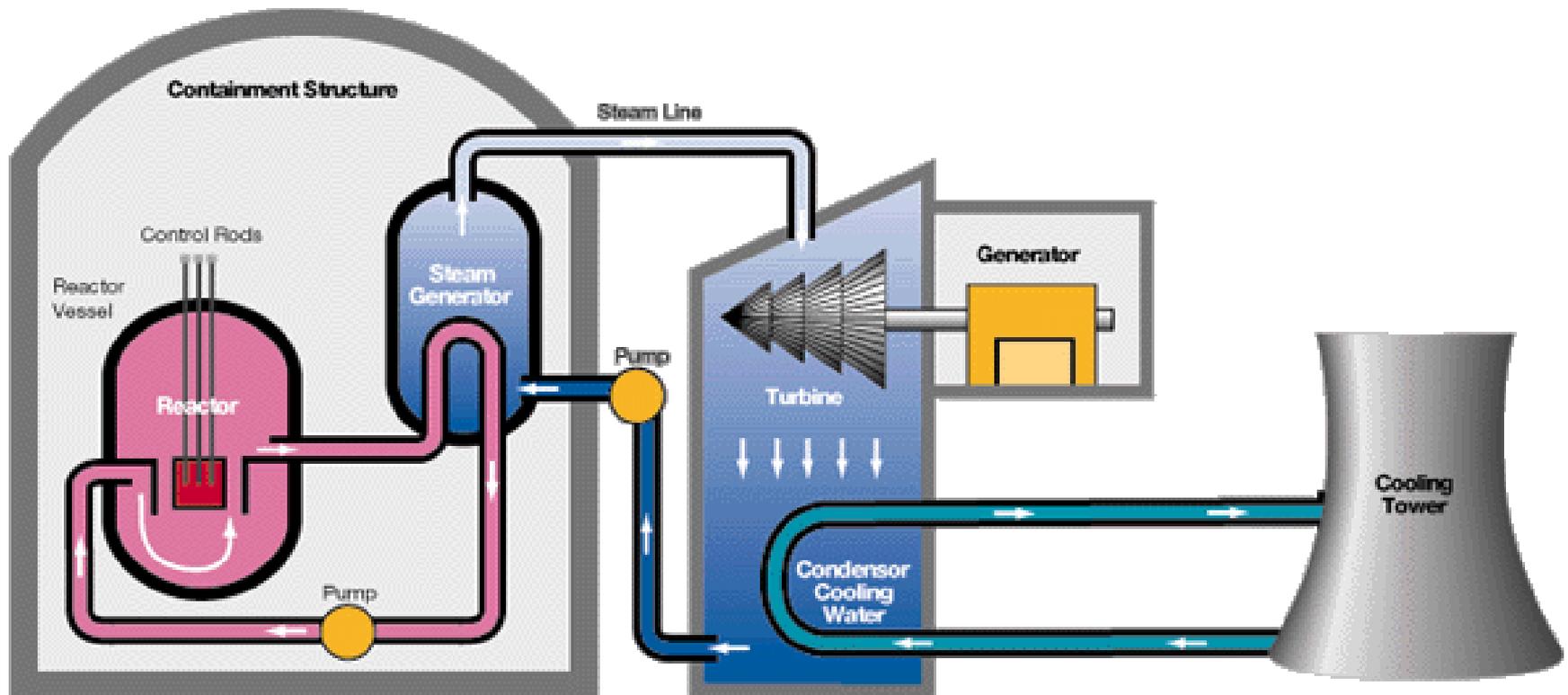


Pressurized Water Reactor – Light Water Reactor

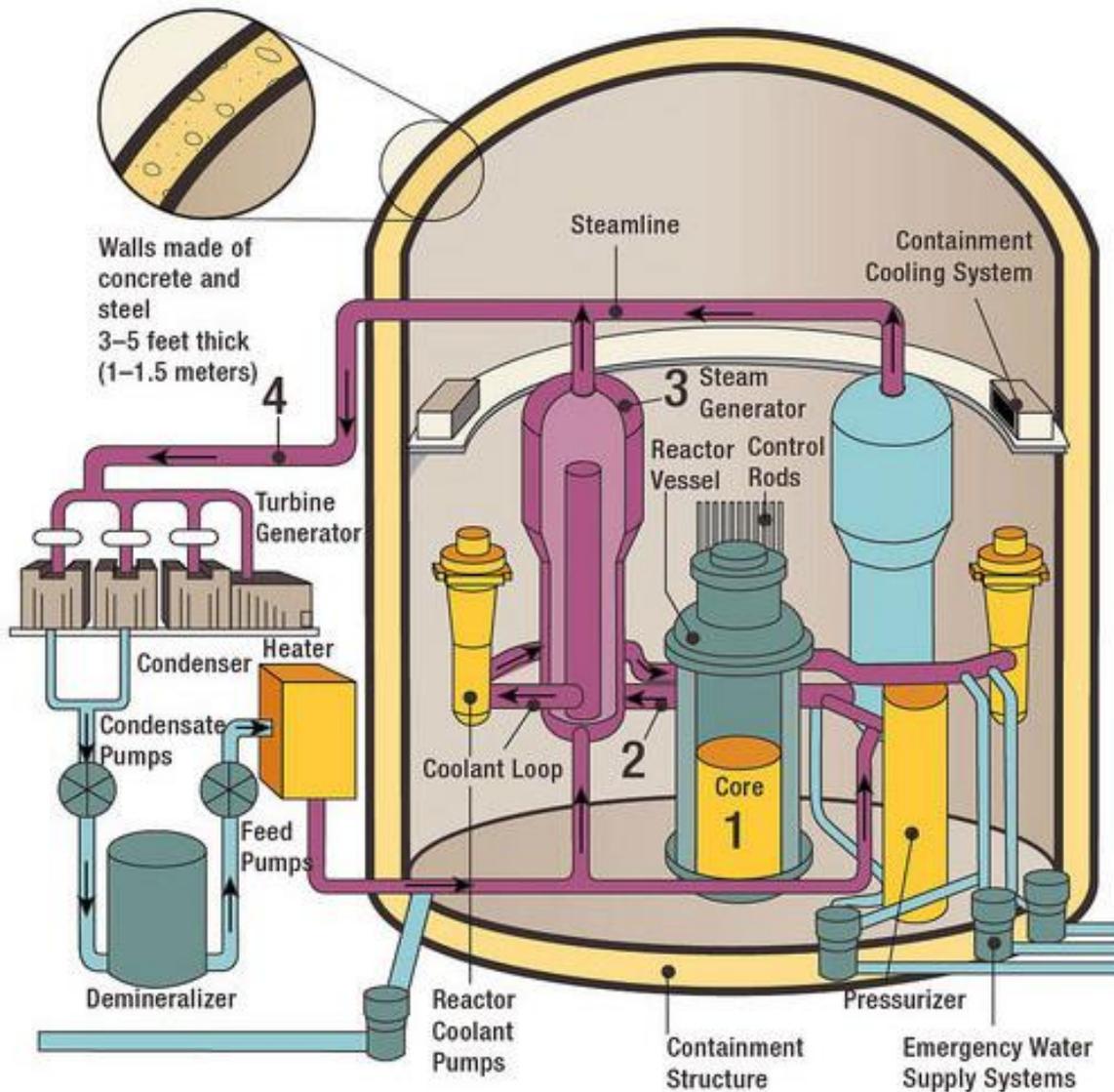
POR DENTRO DO PWR

Pressurized Water Reactor - PWR

- Gera vapor refrigerando o núcleo com água líquida pressurizada



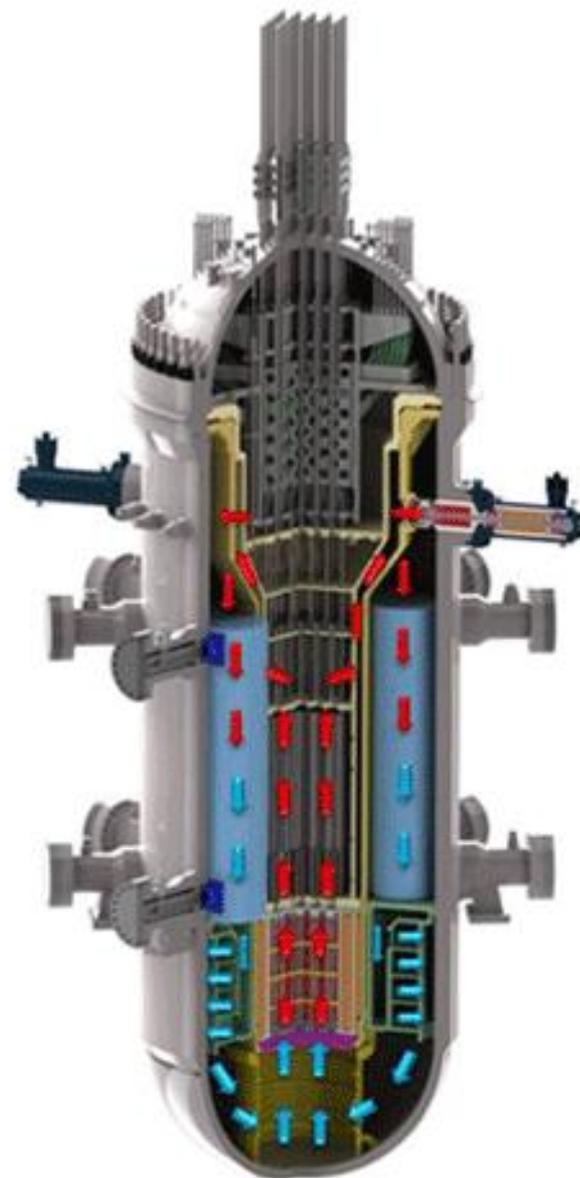
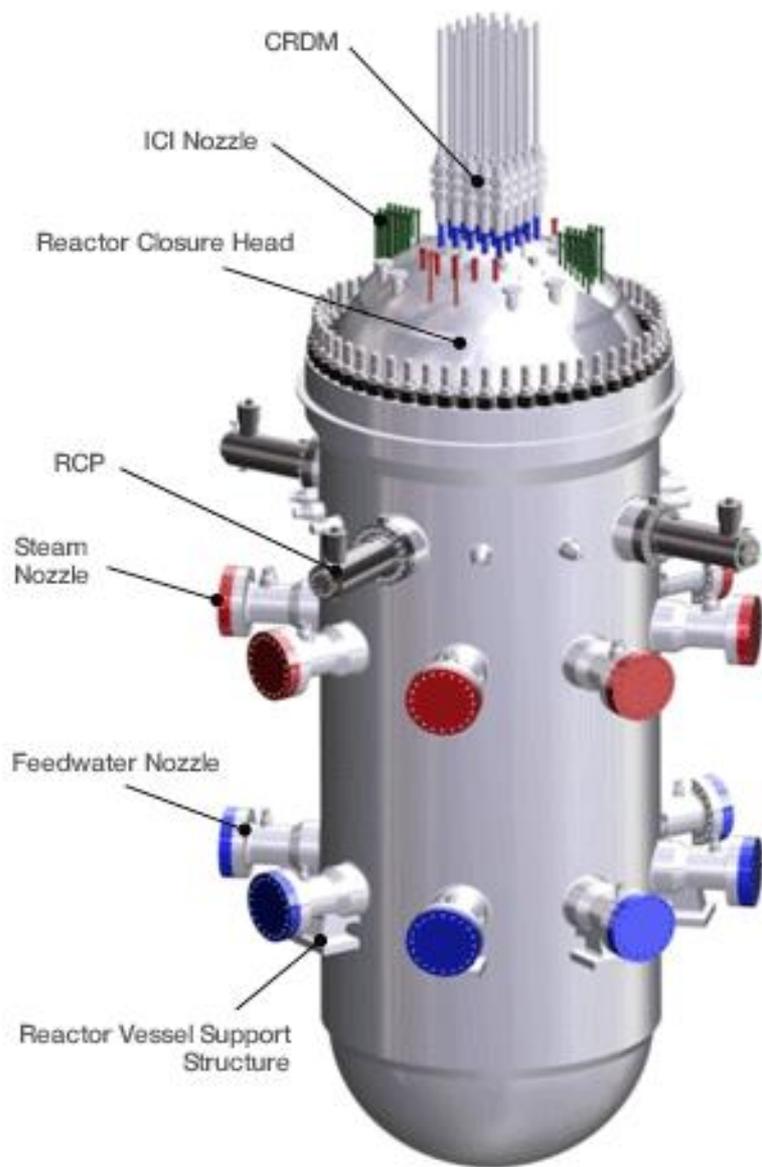
Por dentro do PWR



- Condições de operação e segurança

– 150 bar

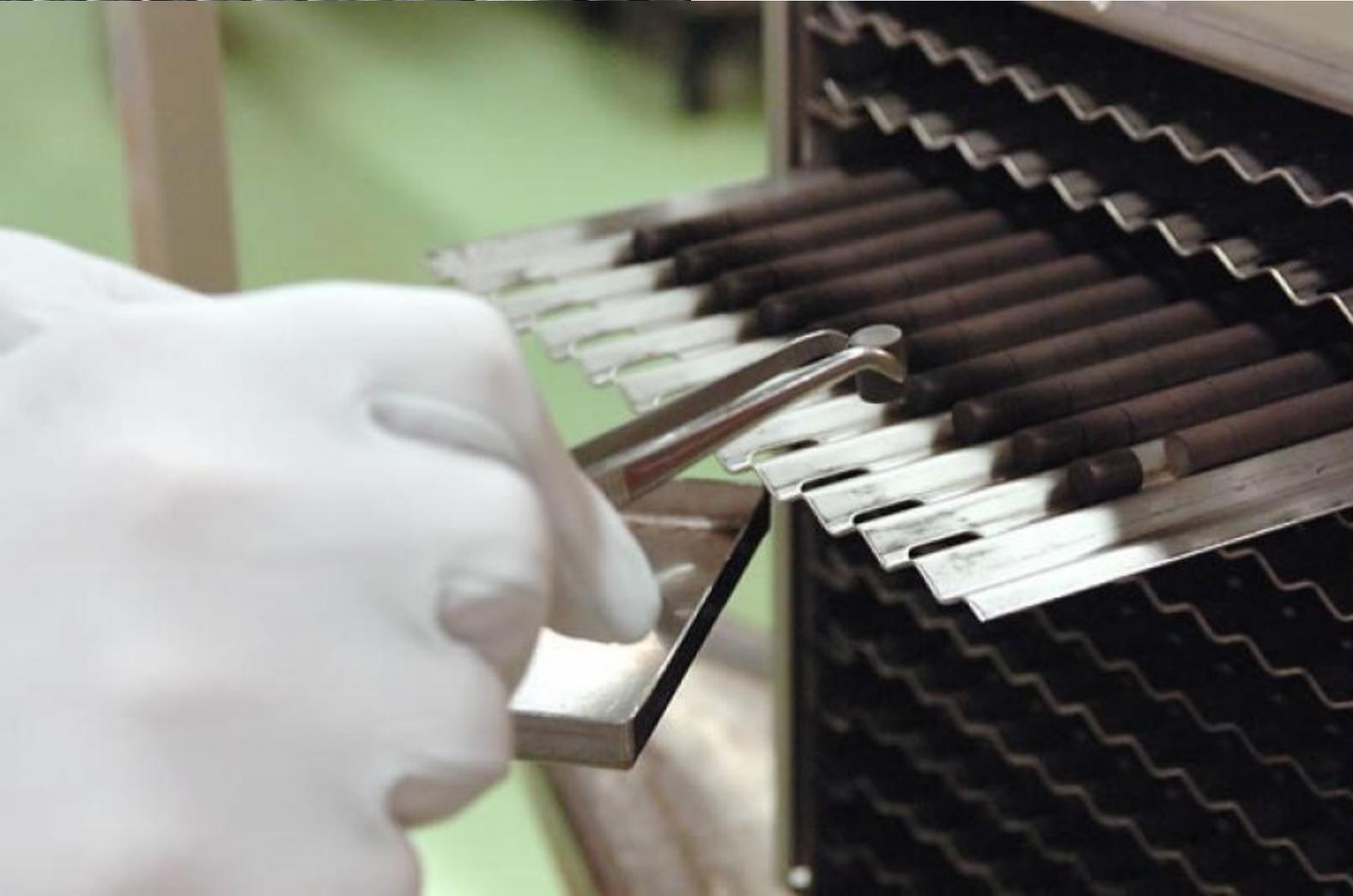
– Necessita
Proteção ativa





Pellets de UO₂

- Quimicamente estáveis
- Baixa condutividade térmica
- Quebradiço

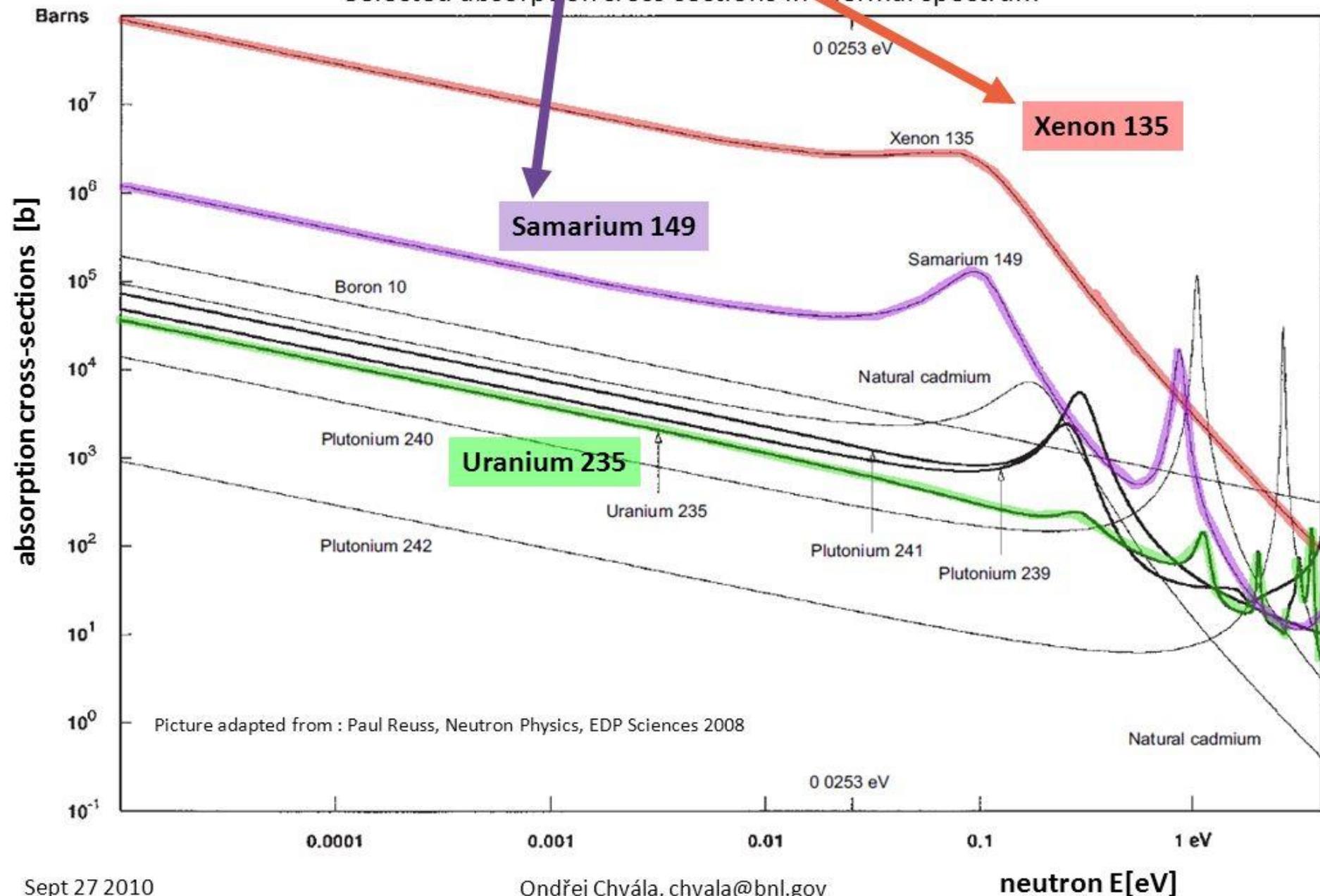


Por dentro do PWR

- Após o início da operação com UO_2
 - Acúmulo de produtos de fissão que ficam aprisionados no interior das pastilhas cerâmicas
 - Alguns destes produtos de fissão possuem altas seções de choque para captura de nêutrons térmicos
 - O acúmulo destes produtos de fissão envenenam a pastilha de UO_2 e cessa a reação em cadeia

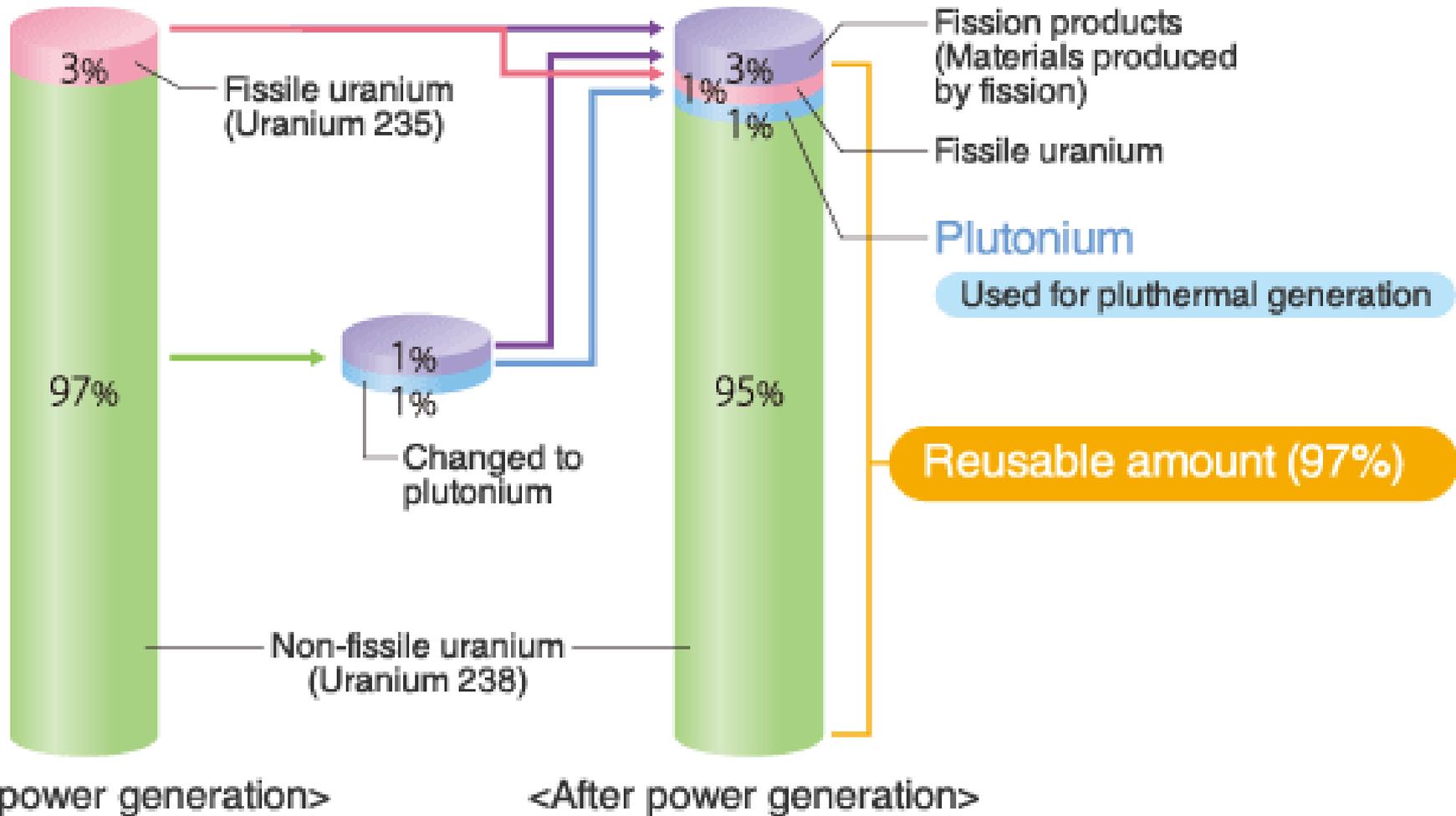
Fission products **poisons** in thermal spectrum

Selected absorption cross-sections in thermal spectrum



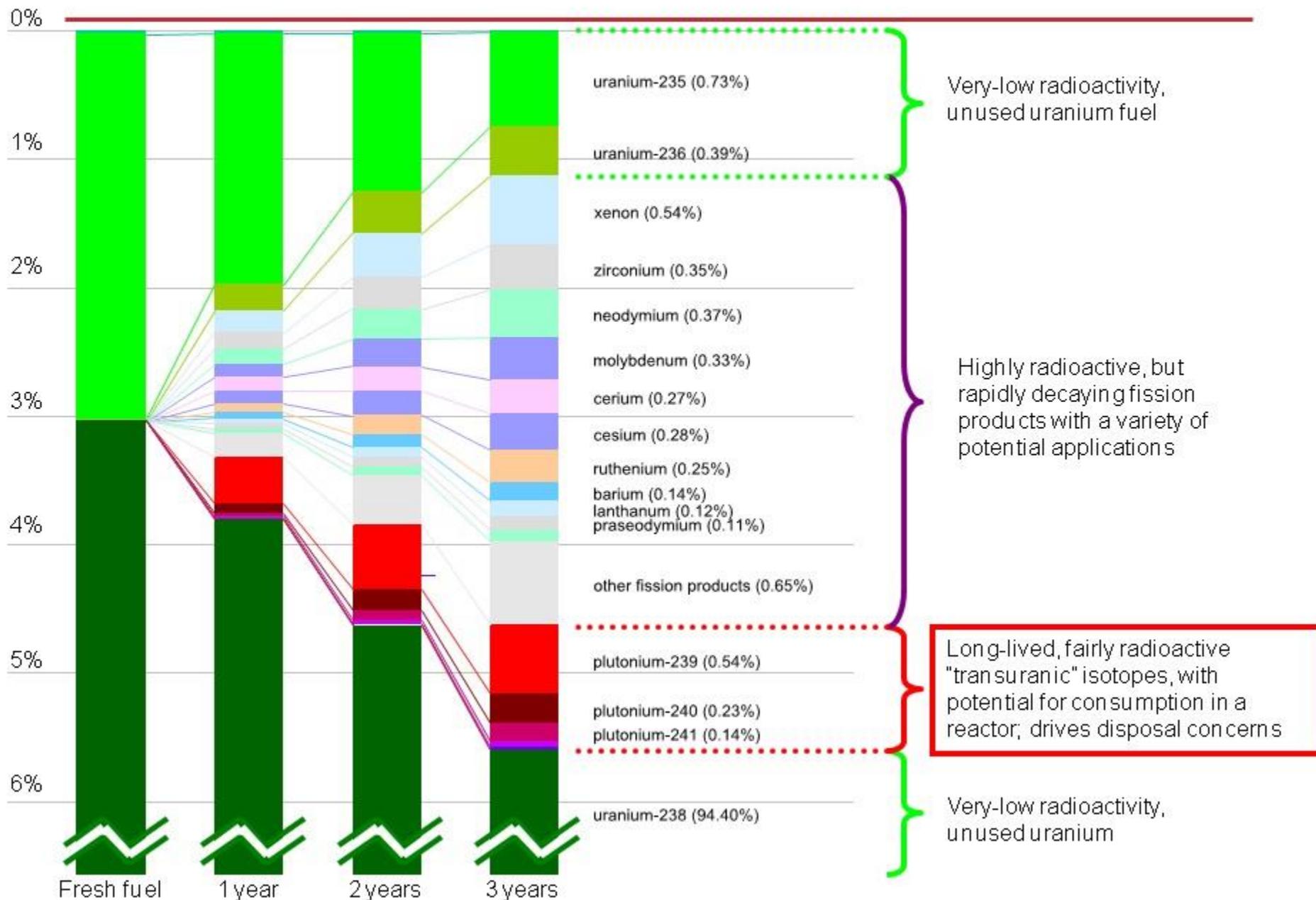
O que ocorre com o combustível nuclear?

Changes in the composition of uranium (Example)

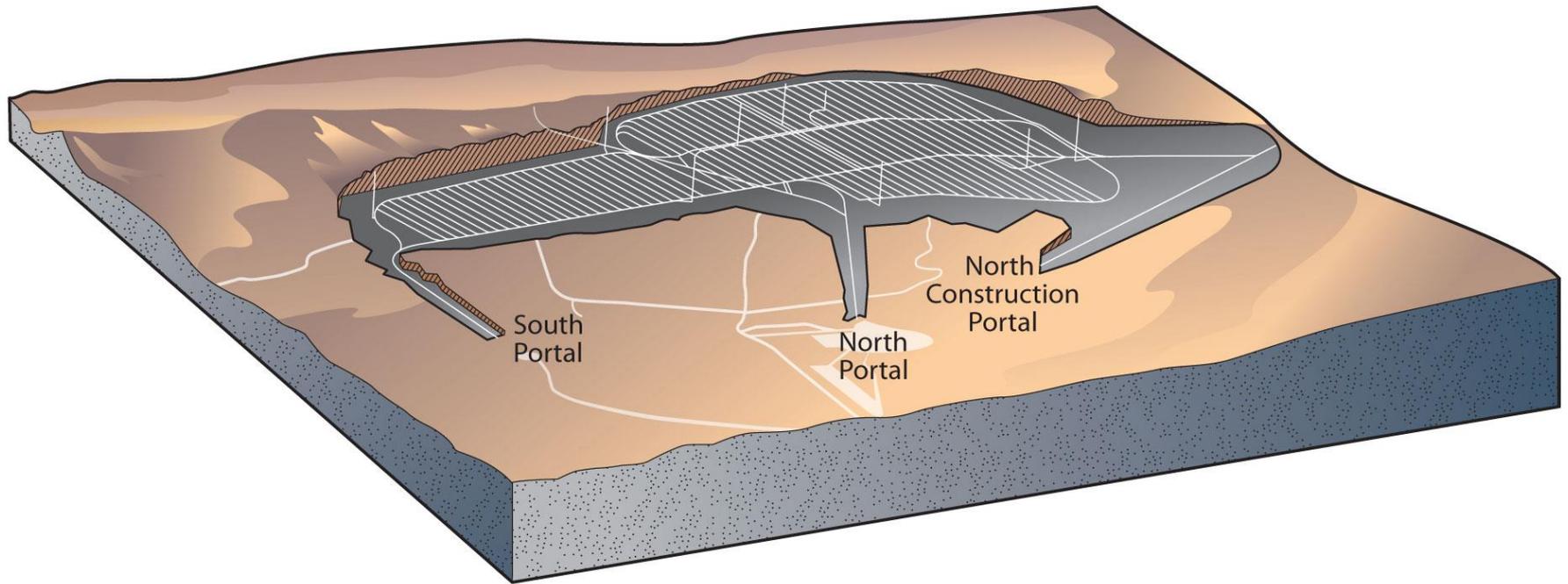


Composition of Conventional Nuclear Fuel

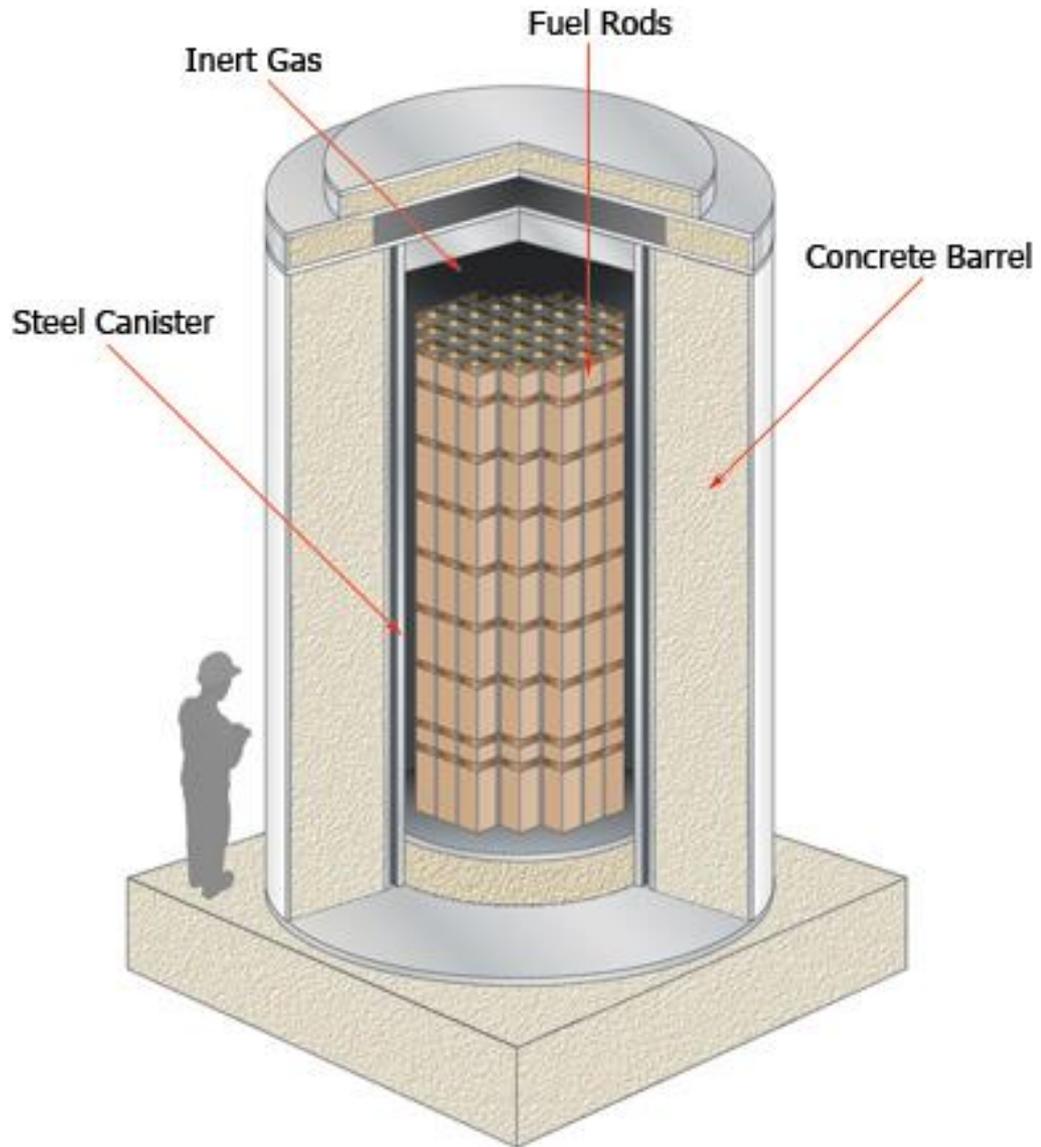
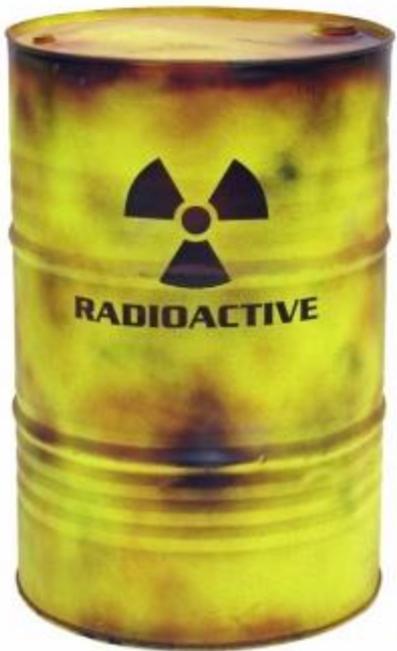
(17x17 Westinghouse, 3% enr., 1100 day irradi, 33000 MWD/MTU, discharge composition, Origen Arp analysis)



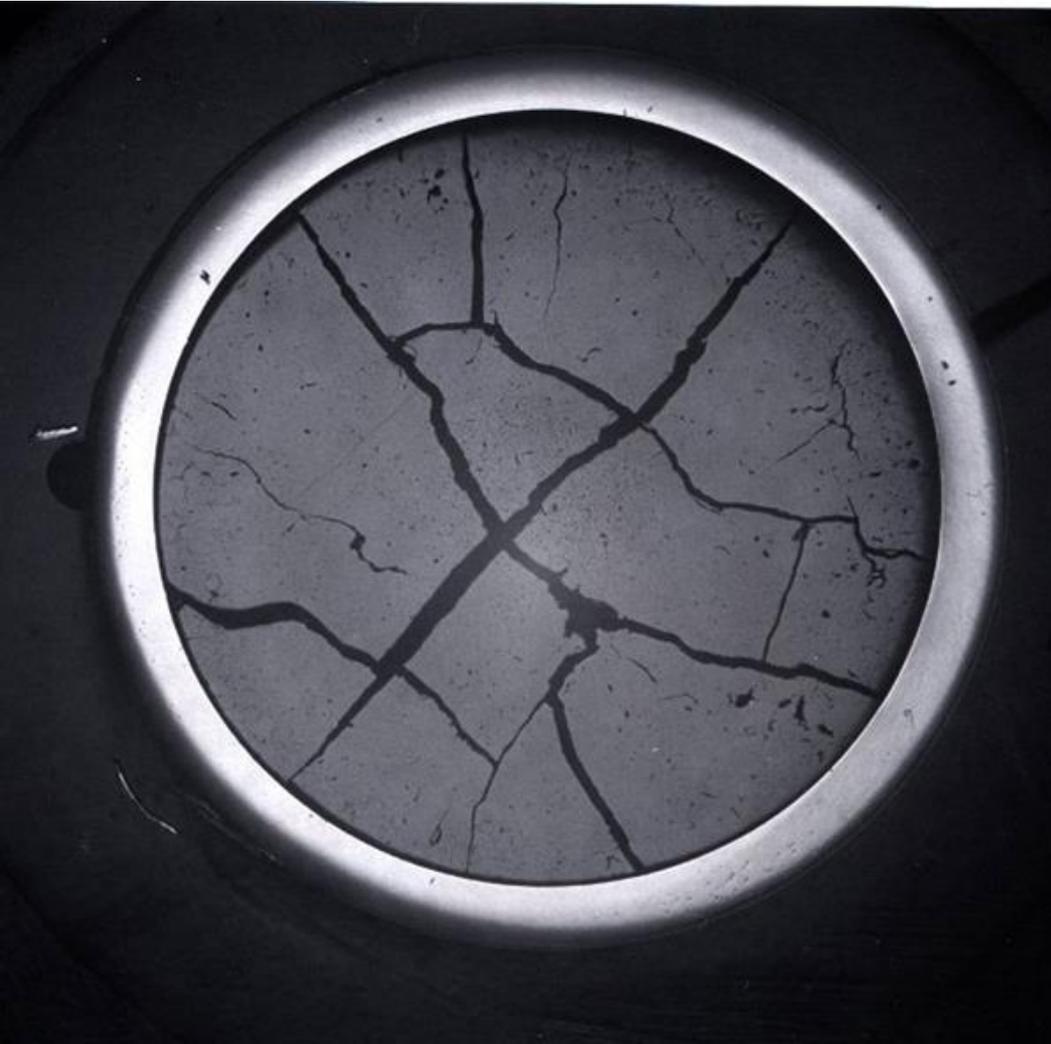
Lixo Radioativo - Depósito



-Yucca Mountain waste repository



Por dentro do PWR – UO₂ “gasto”

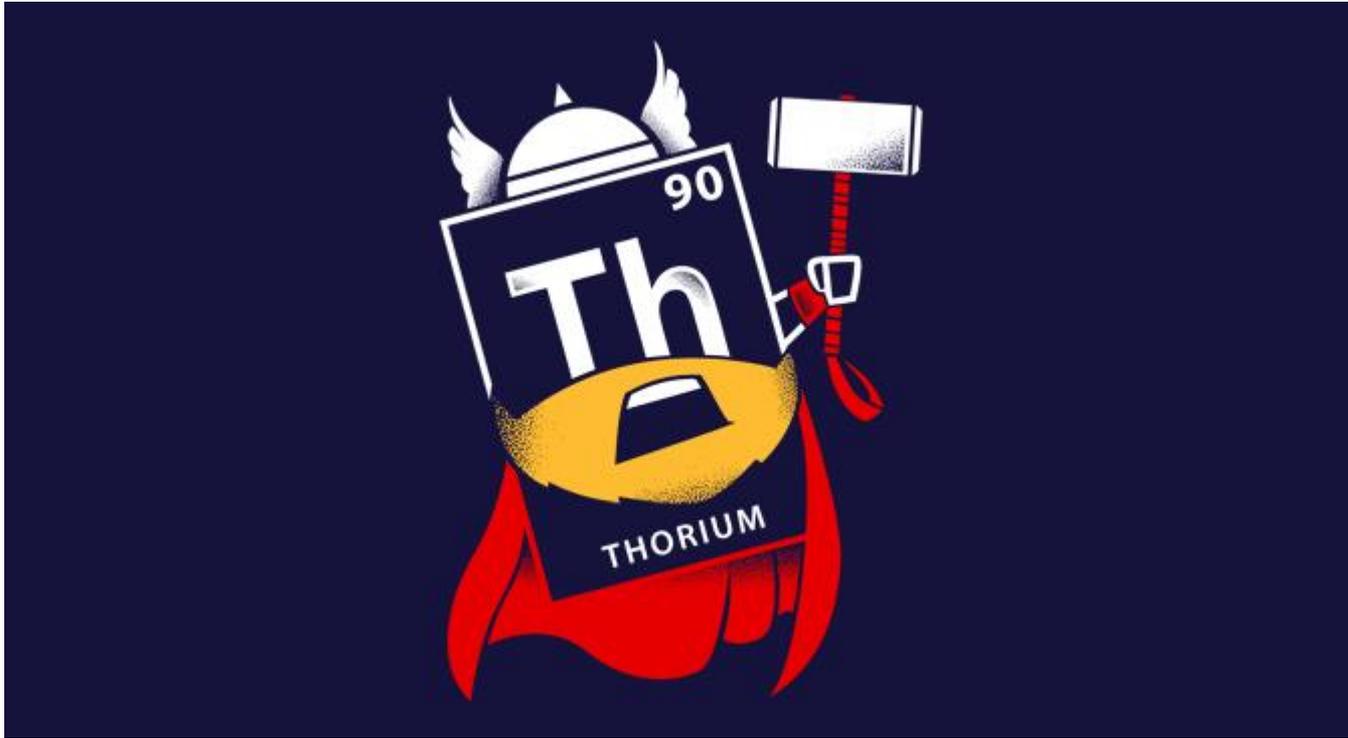


- Mudando quimicamente os elementos dentro de um matriz sólida!
- Produtos gasosos

Por dentro do PWR - Acidentes

- Principal causa de acidentes em PWR

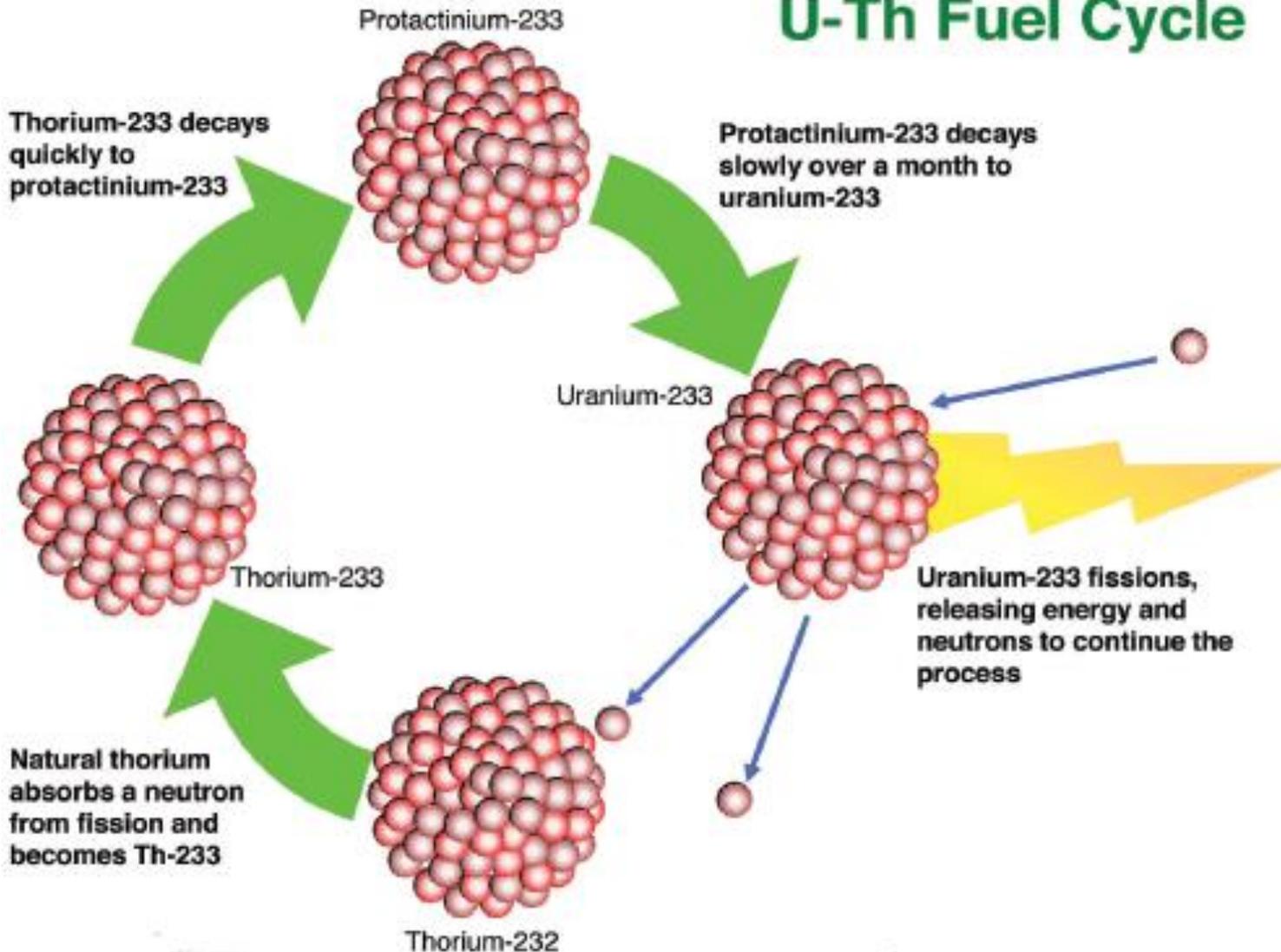




TECNOLOGIAS ESQUECIDAS - LFTR

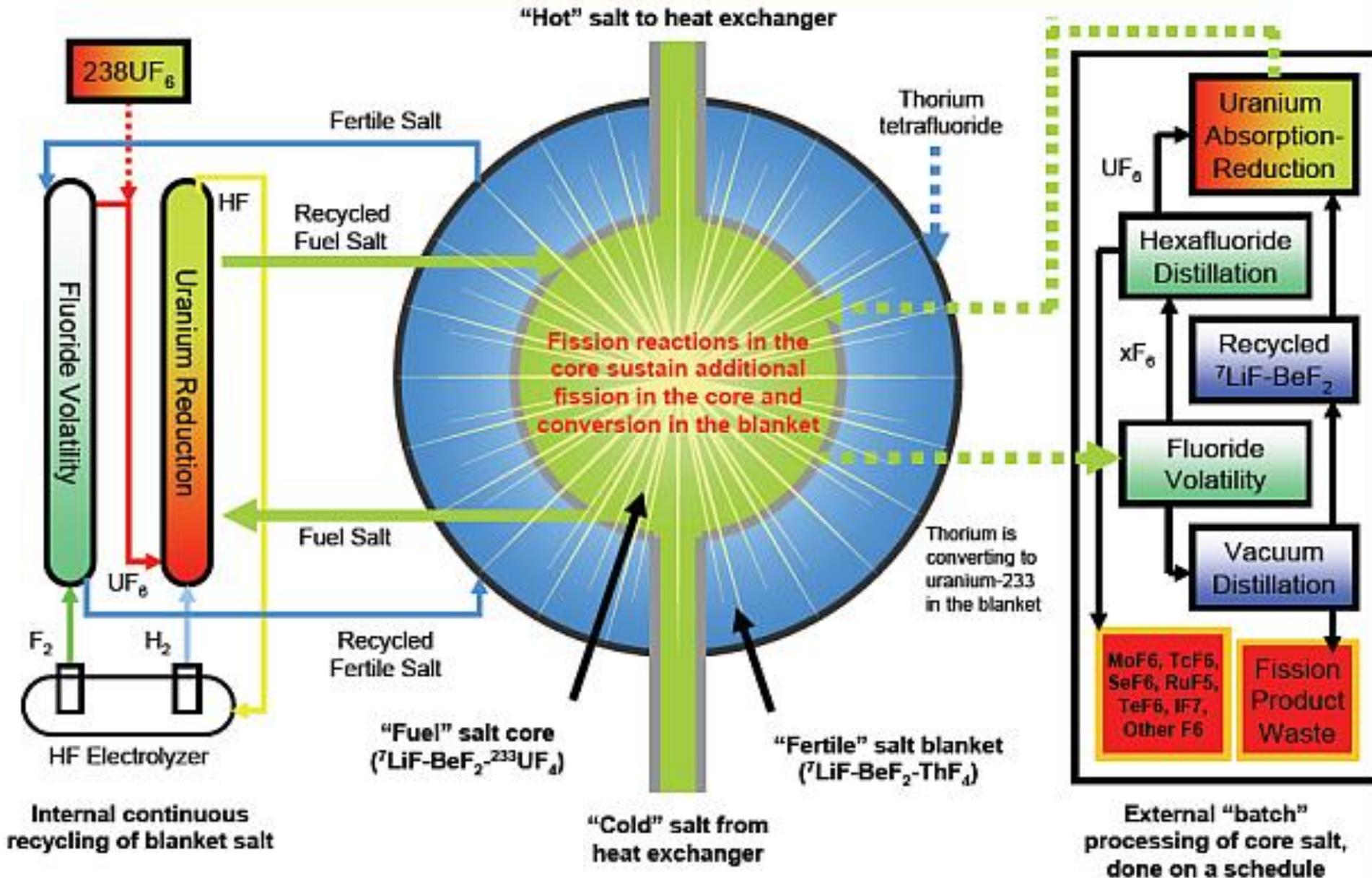
LFTR

U-Th Fuel Cycle

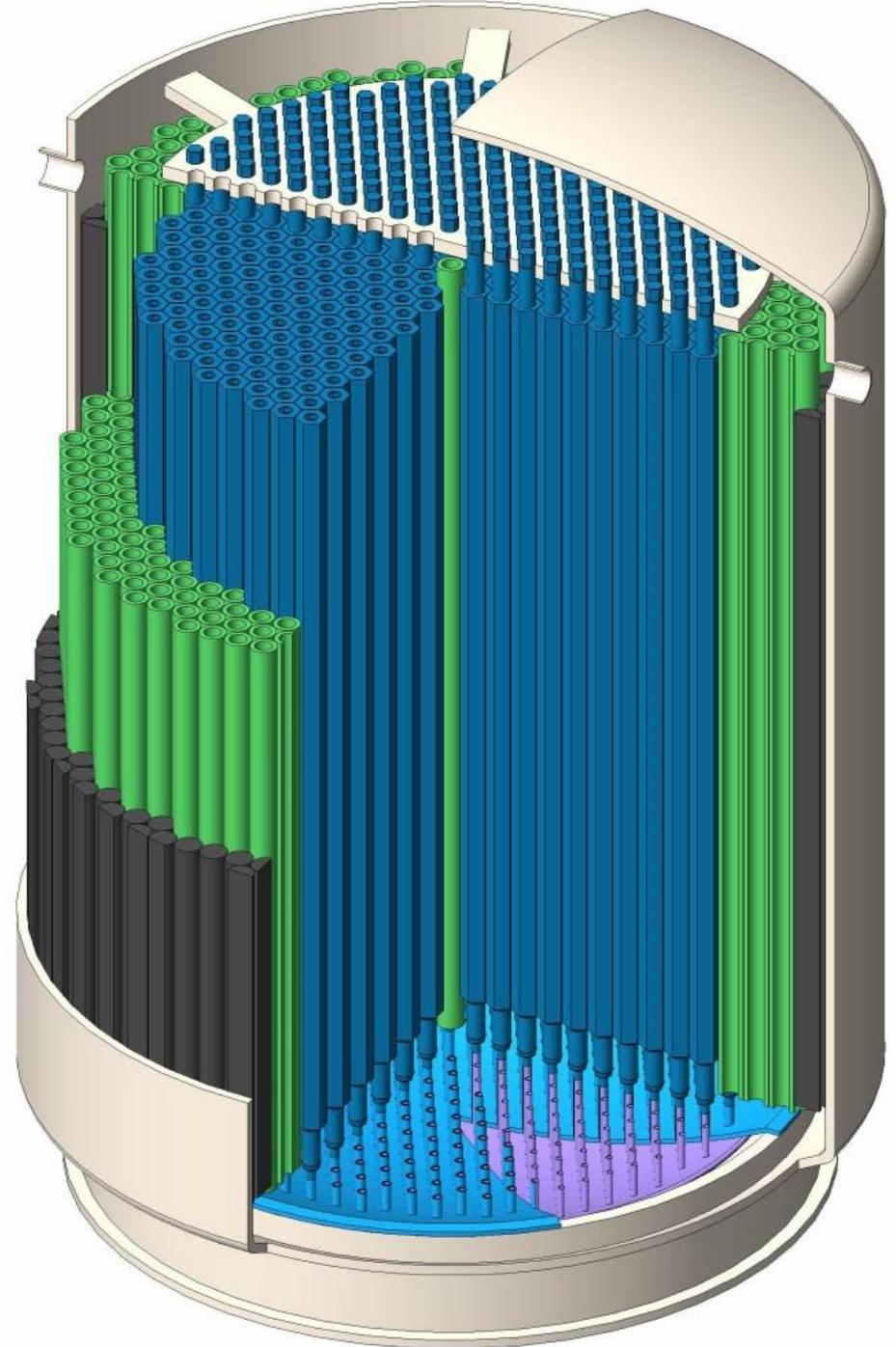


**Combustível
Líquido!!!
ThF₄; UF₄**

How does a fluoride reactor use thorium?

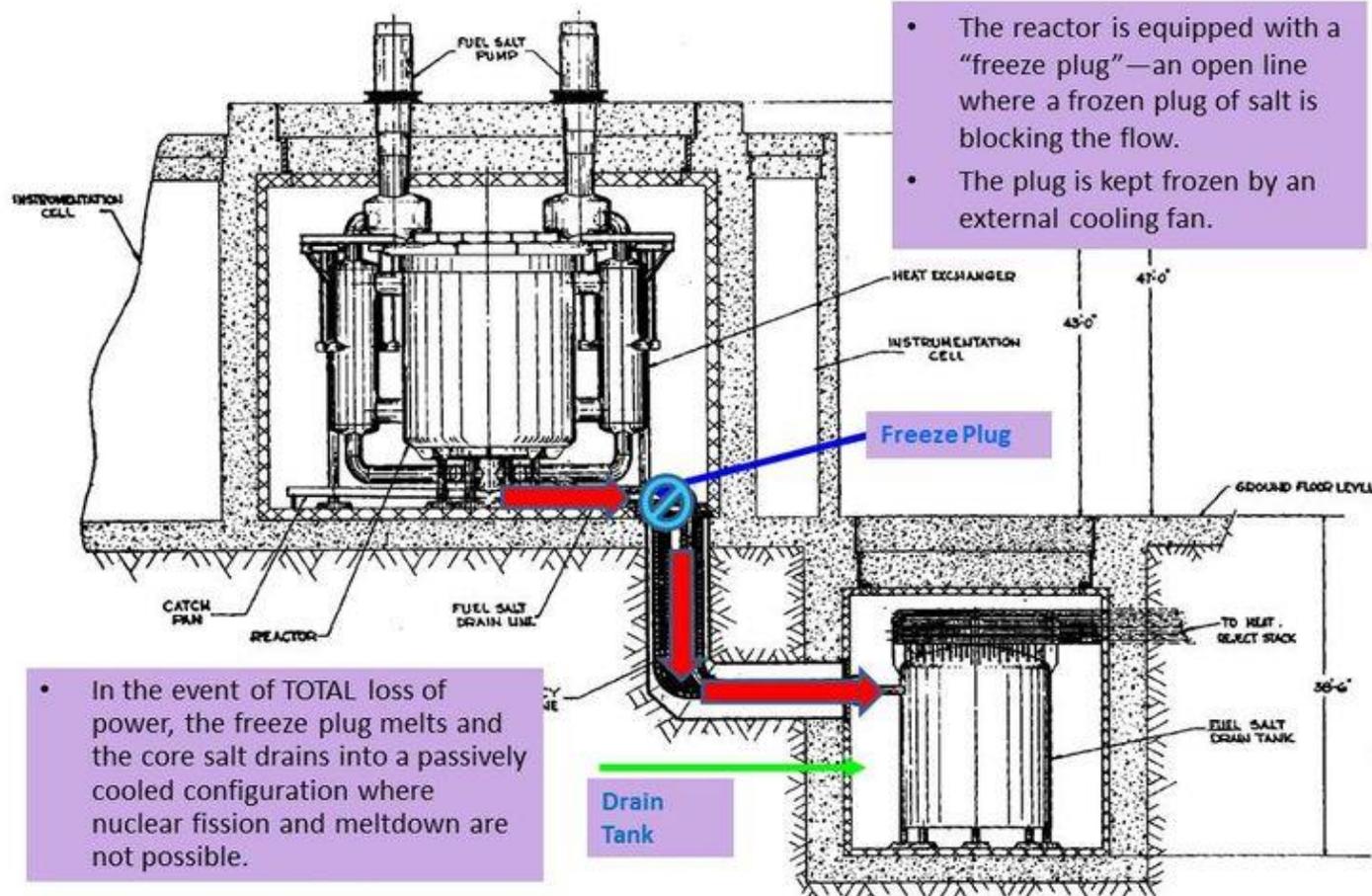


Núcleo do reator LFTR

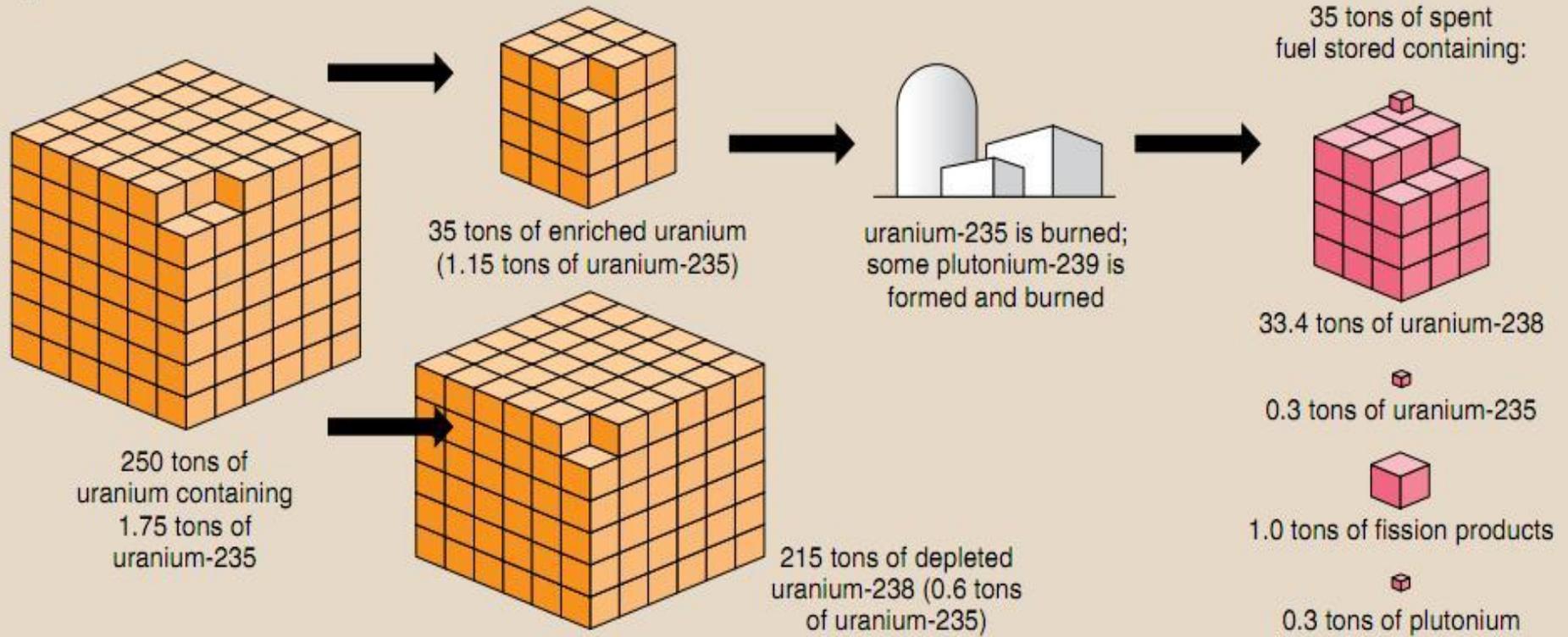


Proteção Passiva

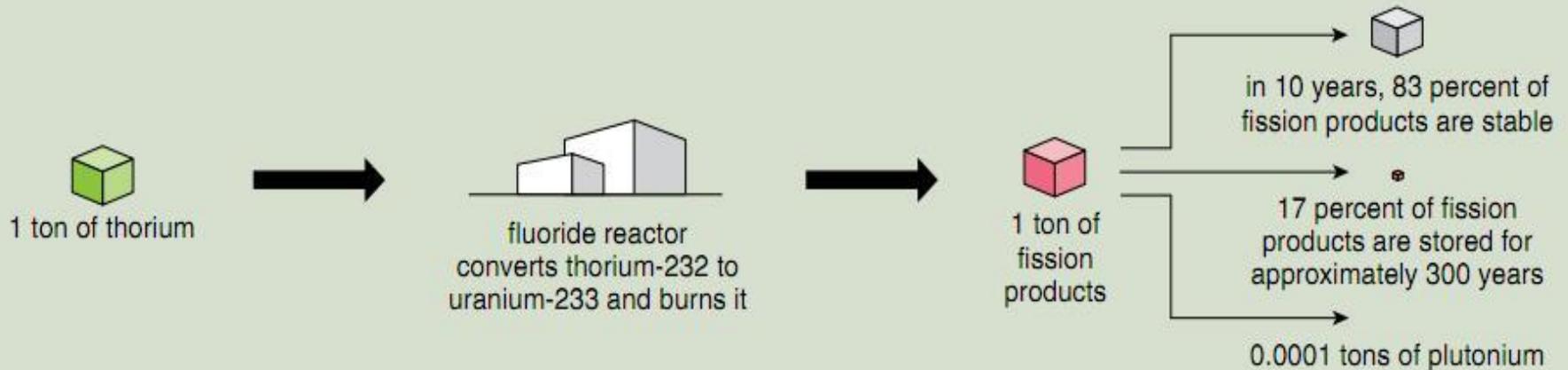
LFTR is Walk Away Safe



light water reactor

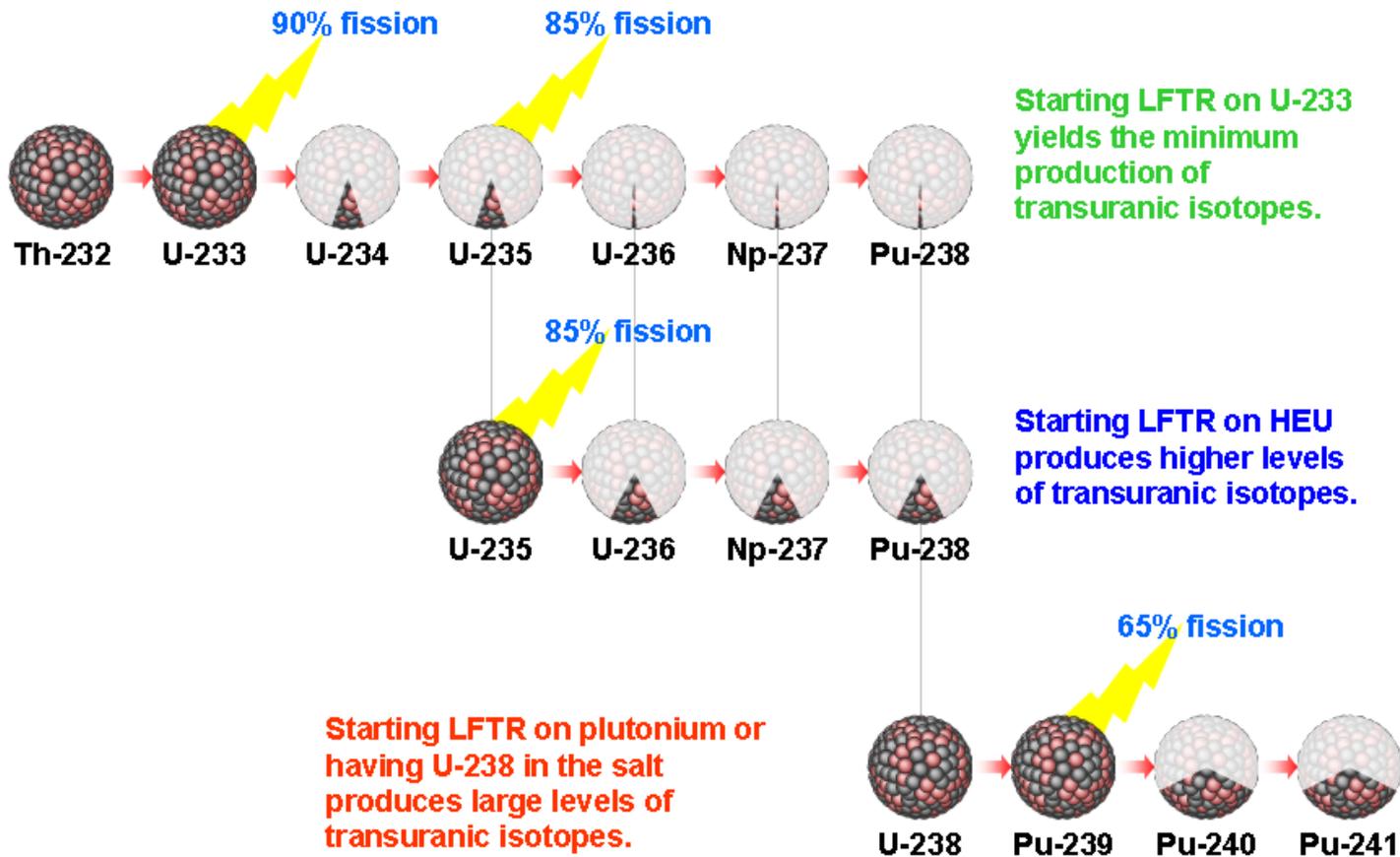


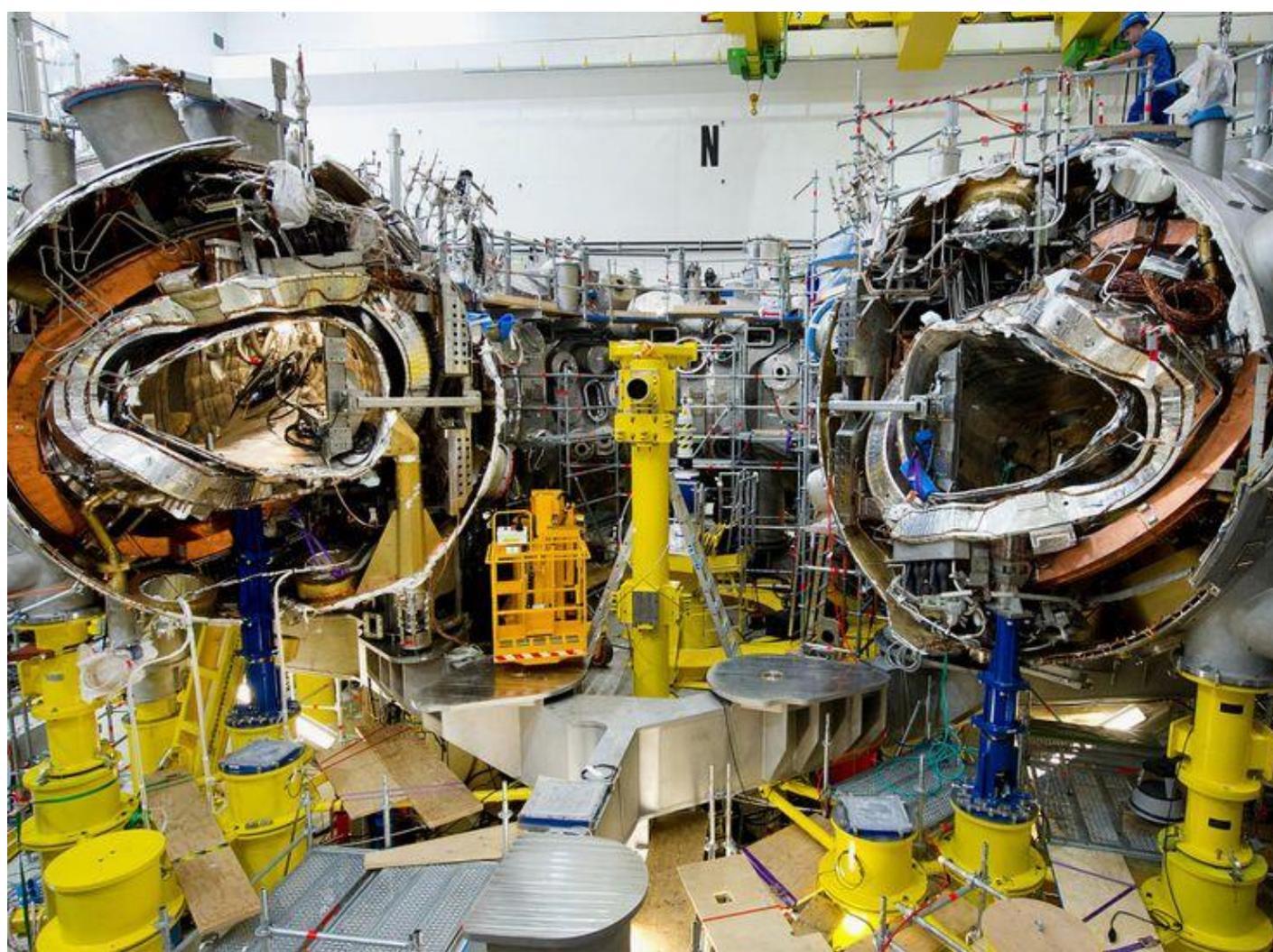
liquid fluoride thorium reactor



Resíduo - LFTR

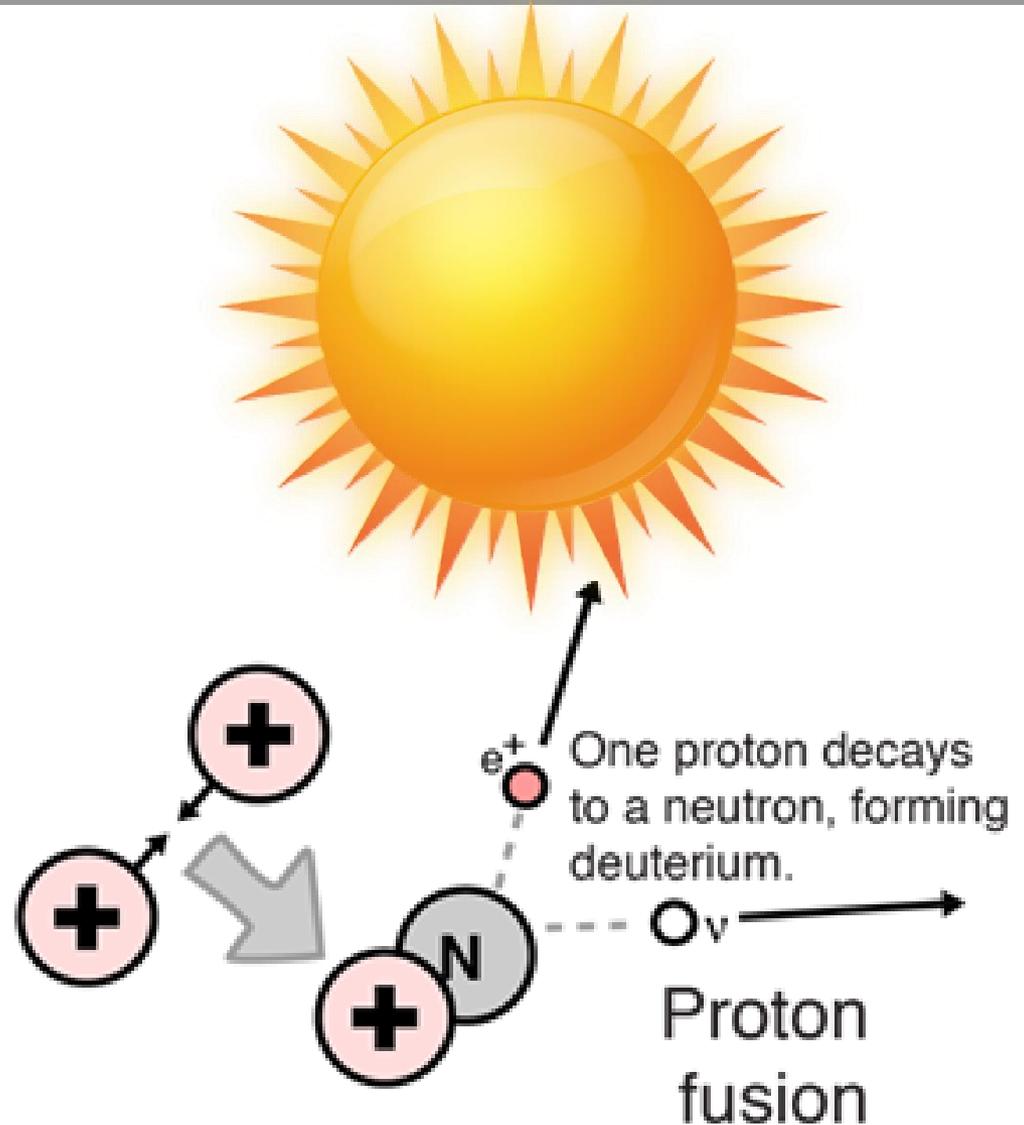
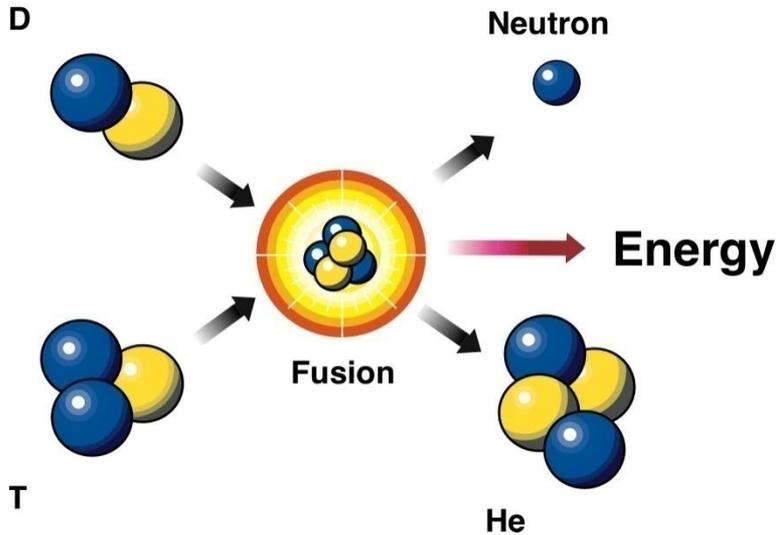
Starting up LFTR on Different Fuels

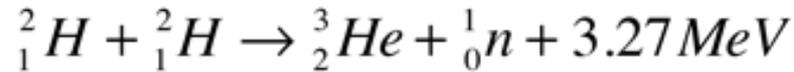




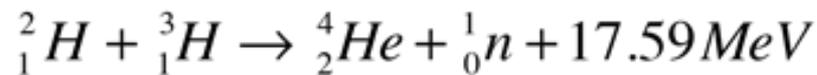
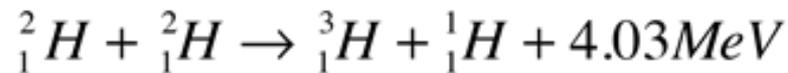
REATORES DE FUSÃO

Porquê D-T e não H-H?

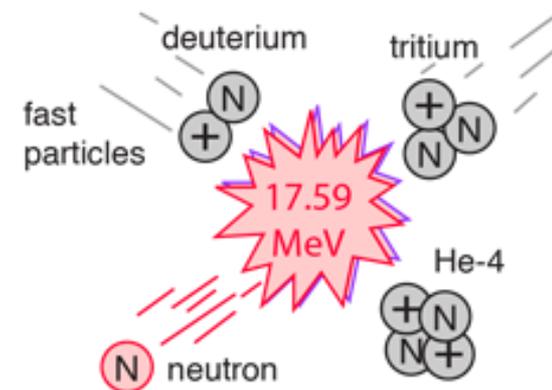
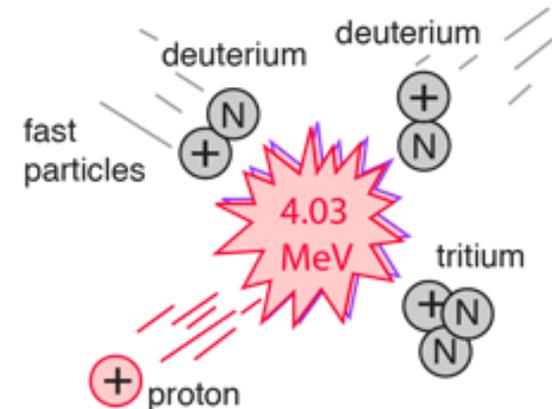
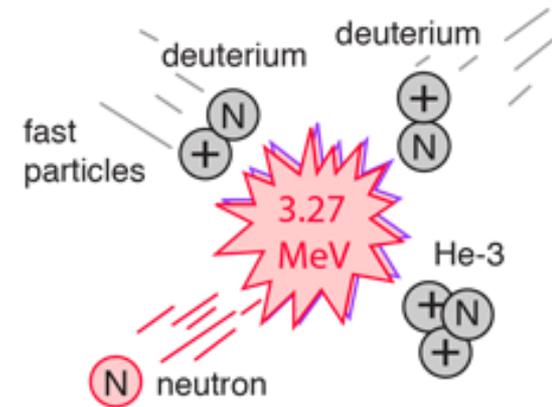


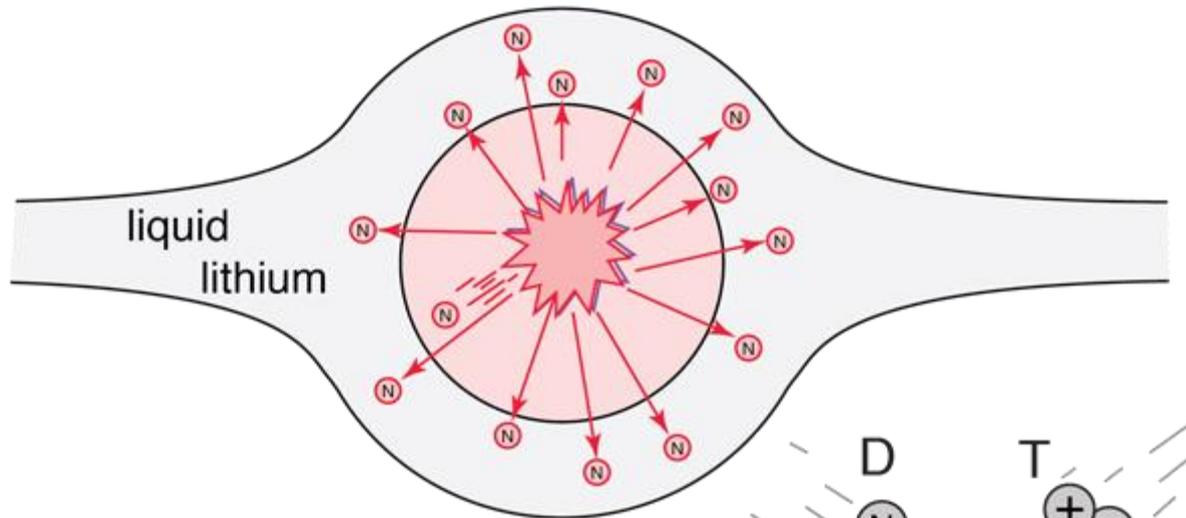
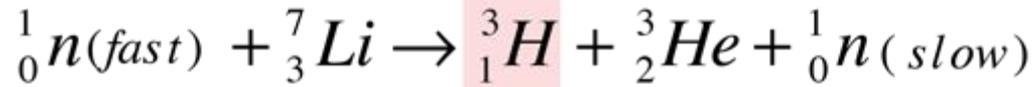


Deuterium-deuterium Fusion

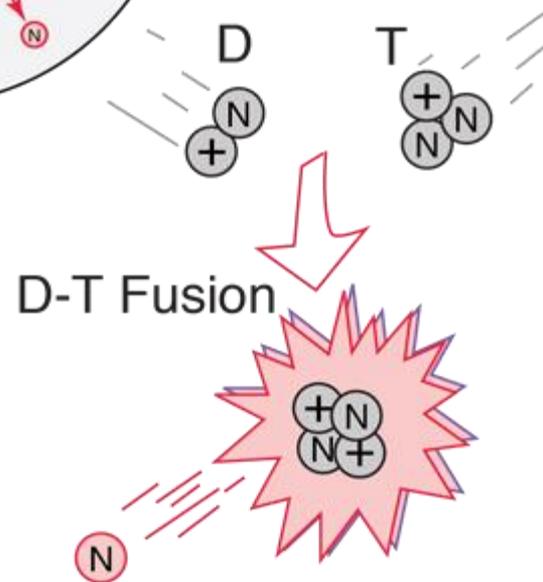


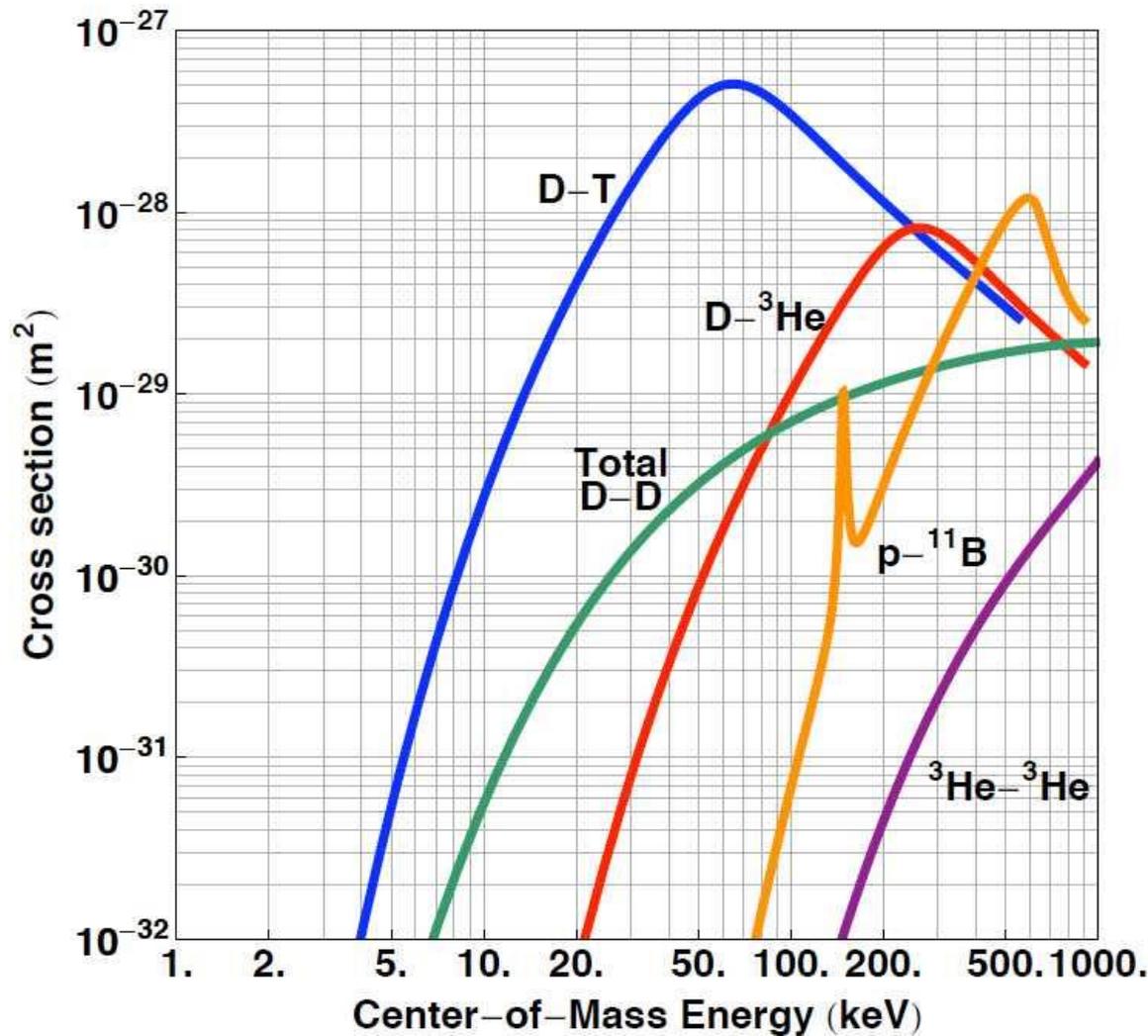
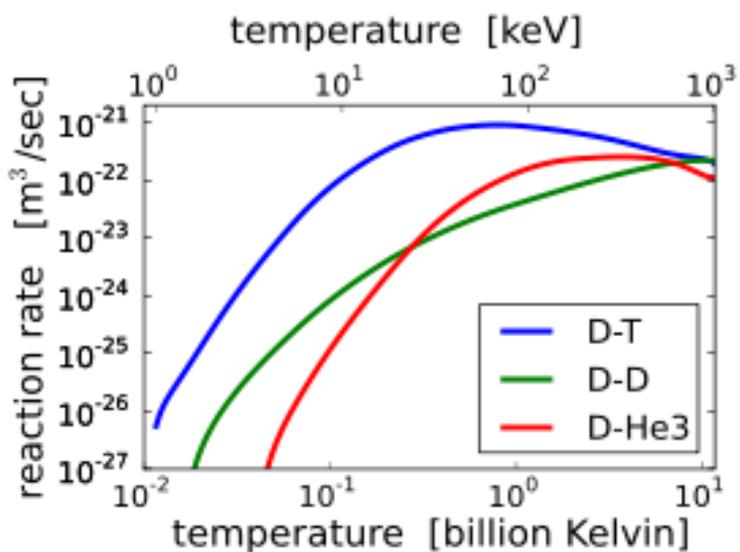
Deuterium-tritium Fusion

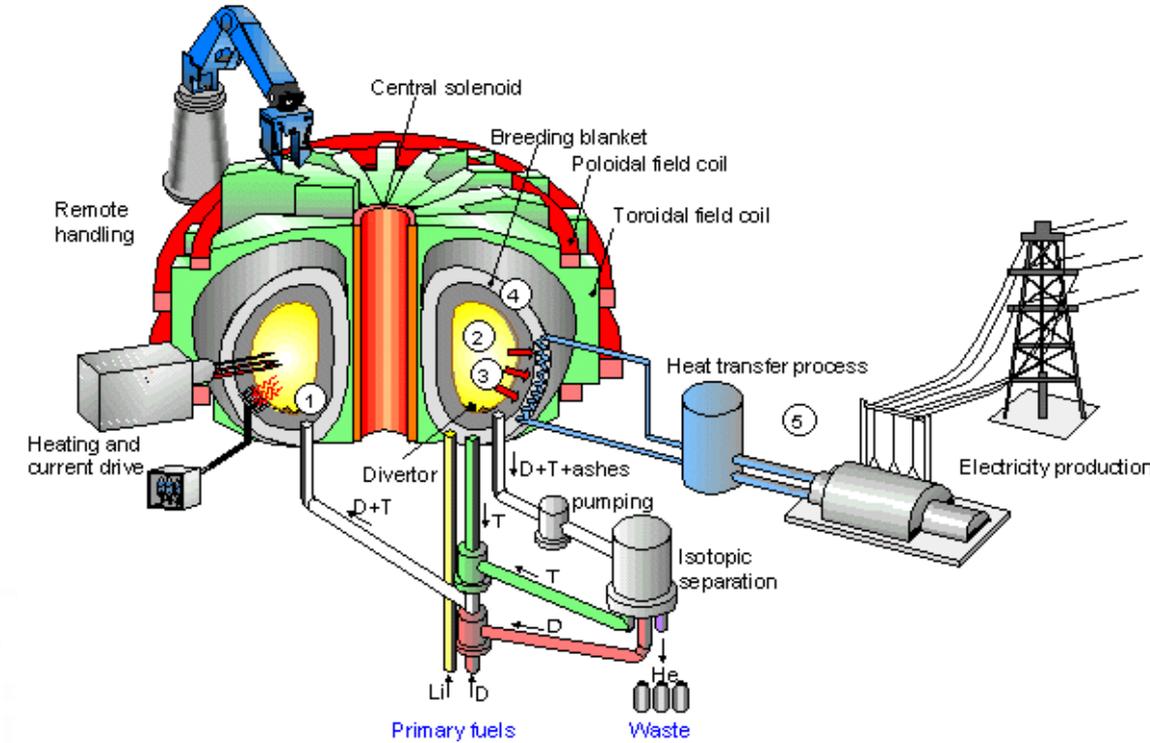
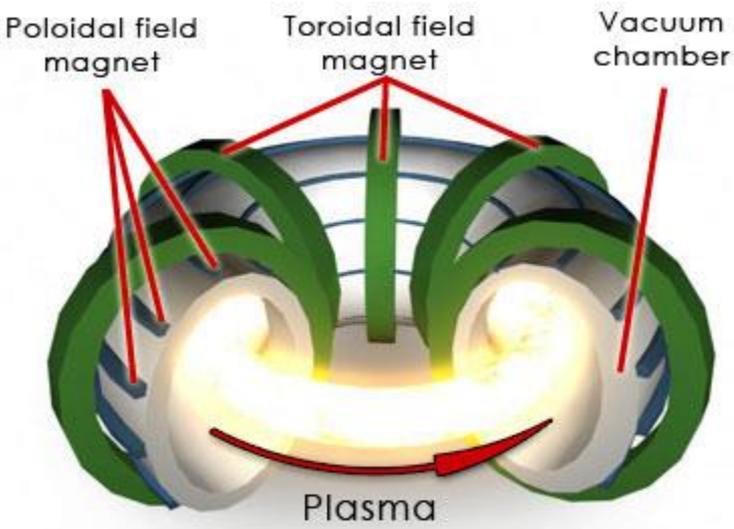


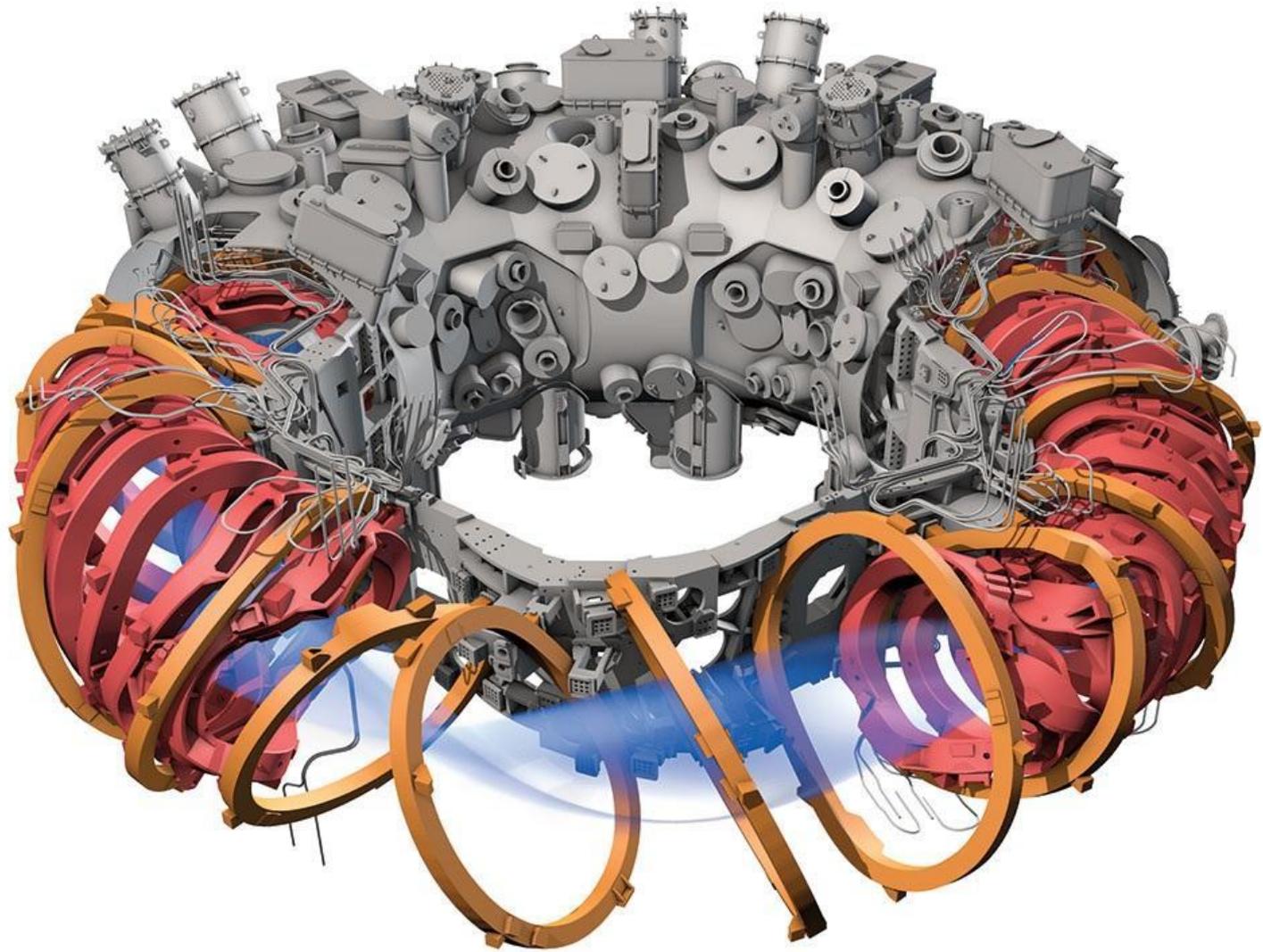


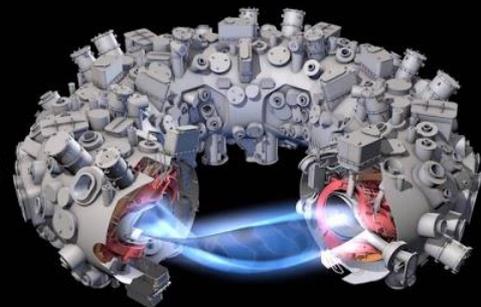
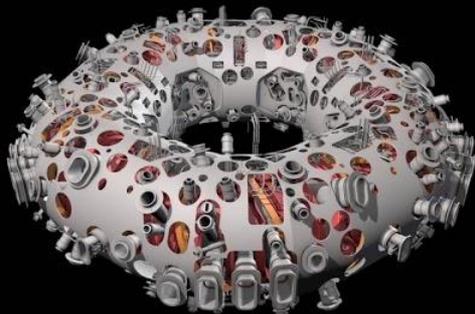
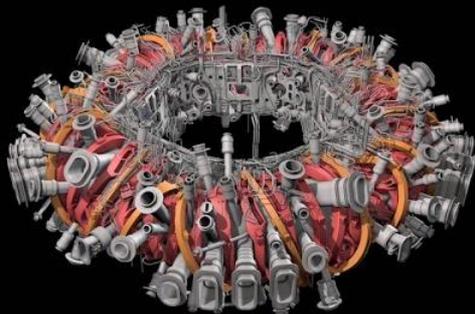
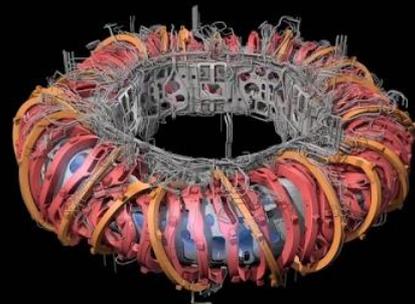
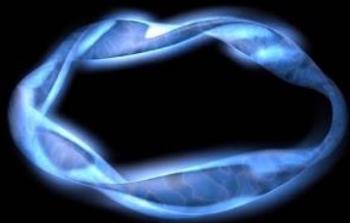
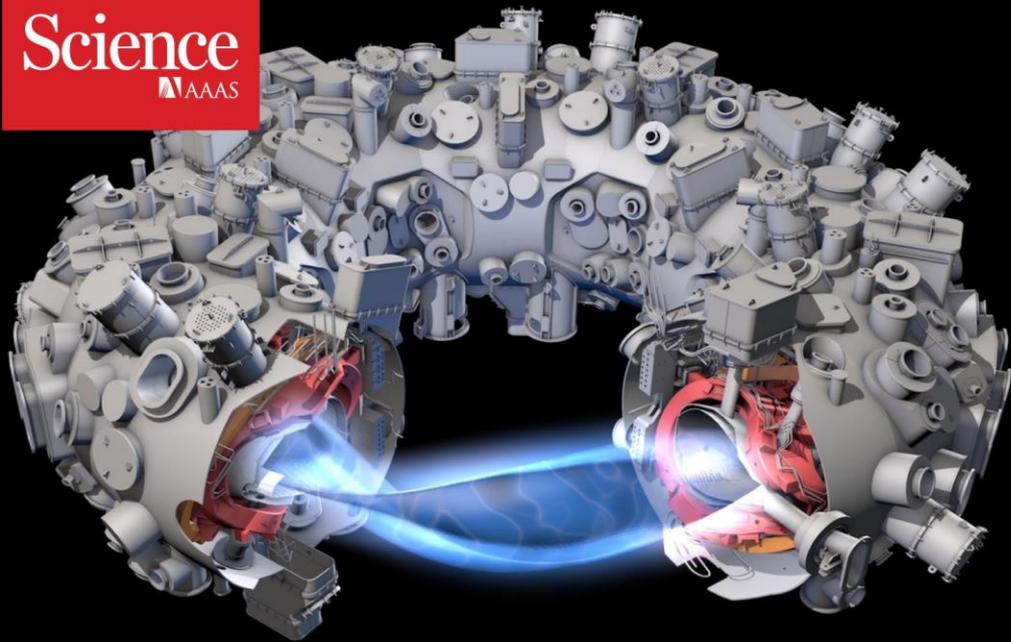
Liquid lithium provides the coolant for the nuclear fusion reaction and a way to extract useful energy from the fusion reaction. Though chemically active on contact with air or water, contained lithium is stable over a wide range of temperature.



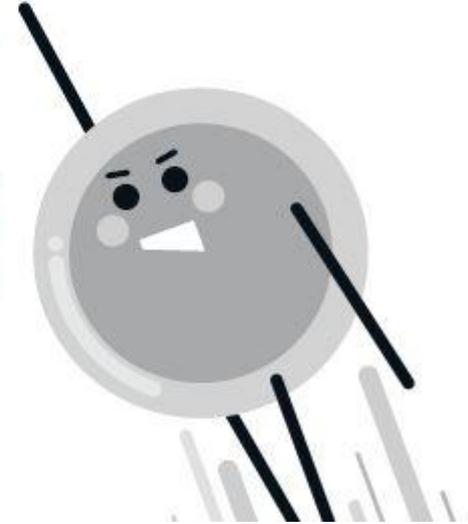








PLAY WITH NEUTRON AND FRIENDS



That's all folks!

FIM!