

Física IV

2020

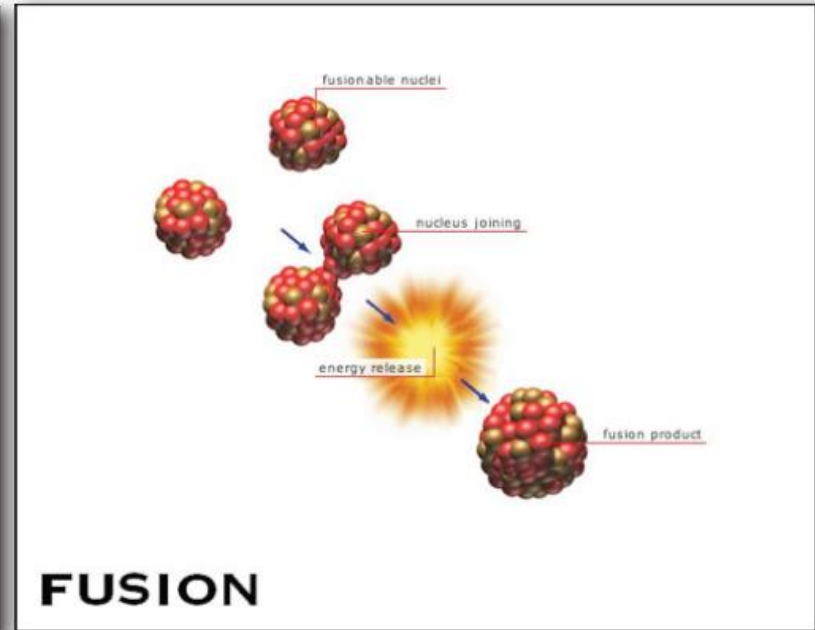
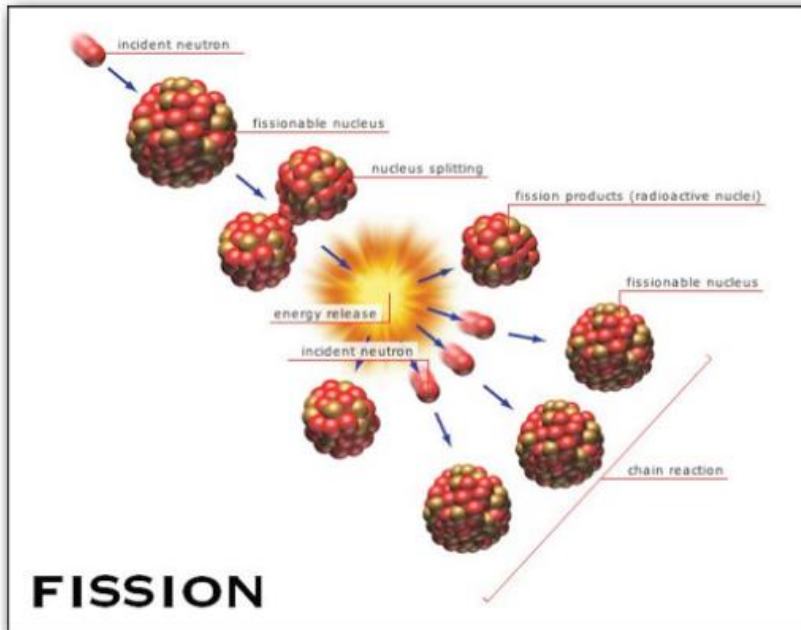
Professor: Valdir Guimarães

E-mail: valdir.guimaraes@usp.br

Aula-9: Efeito doppler relativístico - reatores

Fissão e fusão

- ❑ Podemos gerar energia por fissão ou fusão
- ❑ Energia gerada por fissão é gerada numa reação em cadeia que pode ser controlada ou não.
- ❑ Energia gerada por fusão de dois núcleos ocorre no Sol e nas estrelas.
- ❑ Tokamaks são equipamentos que simulam reações que ocorrem no Sol.

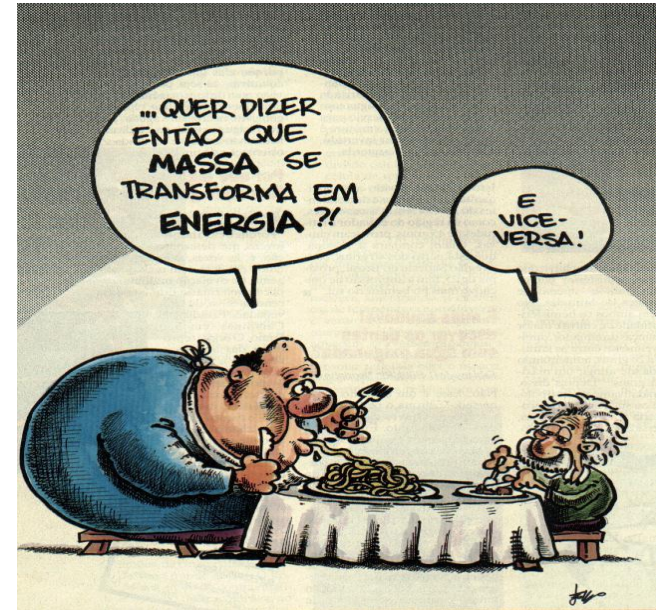


Massa -> energia

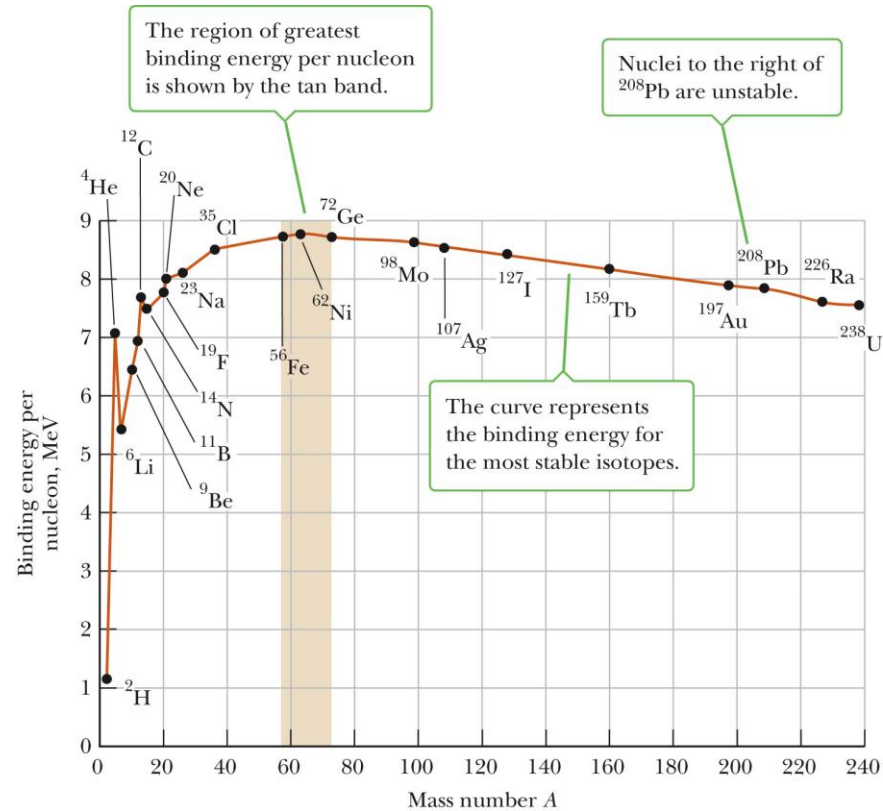
- ❑ Massa=Energia.
- ❑ A energia total de um núcleo é menor que a soma das energias individuais dos núcleos
- ❑ A diferença é chamada de energia de ligação ou defeito de massa.
- ❑ Energia de ligação é a energia necessária para separar o núcleo nos seus constituintes.

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

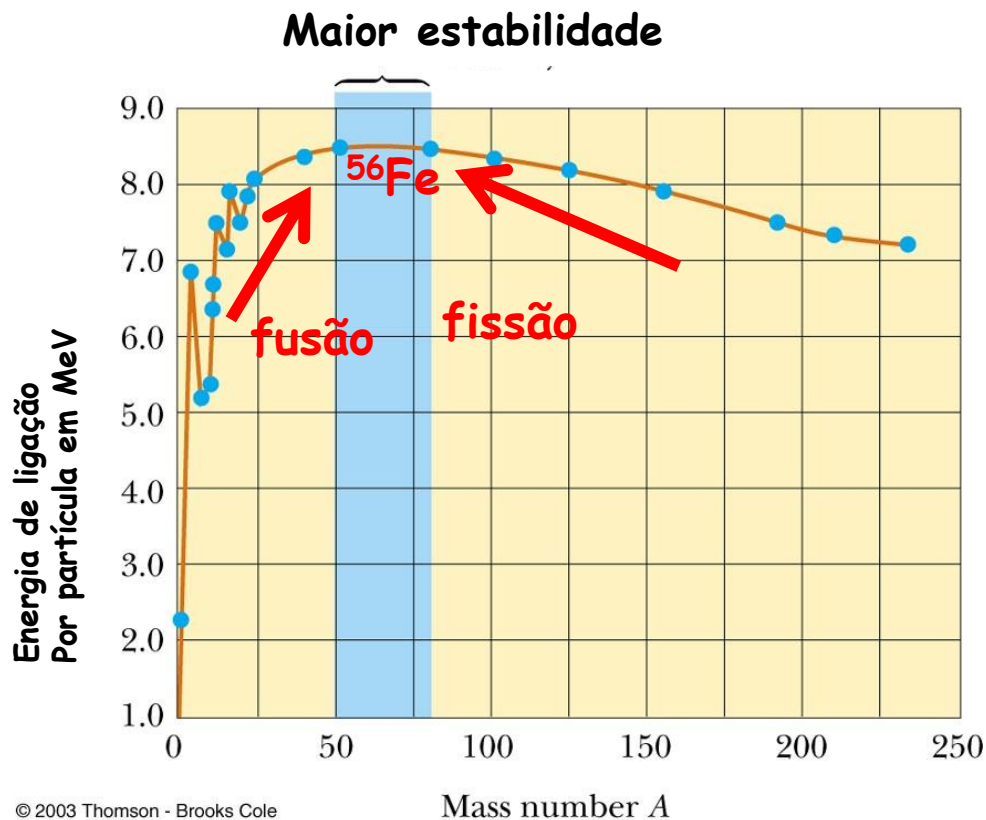
$$E = \Delta m \times c^2 \quad \text{com} \quad c^2 = 931.5 \text{ MeV/u}$$



Fissão e fusão



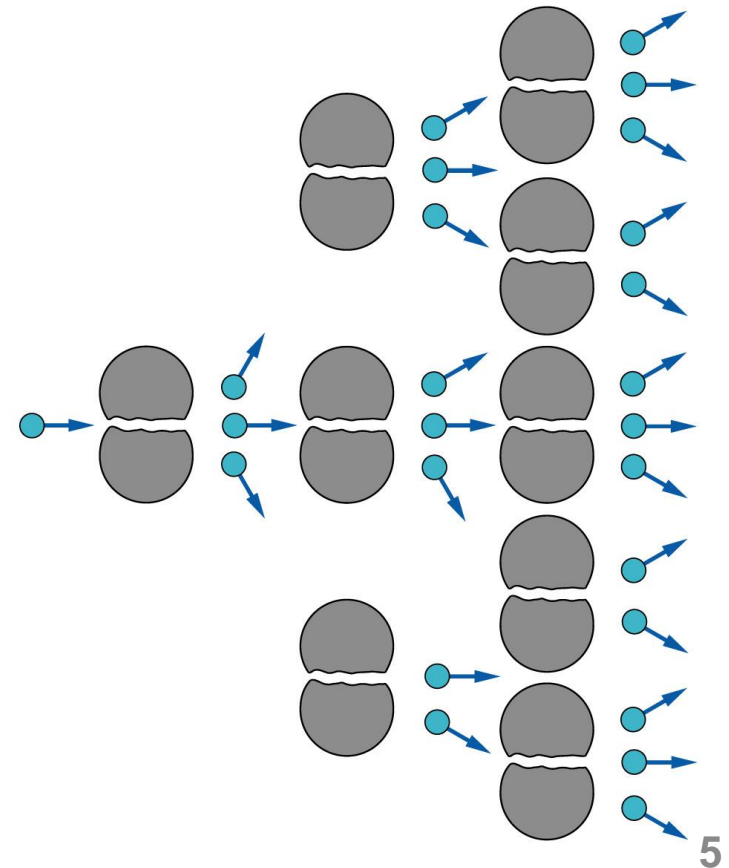
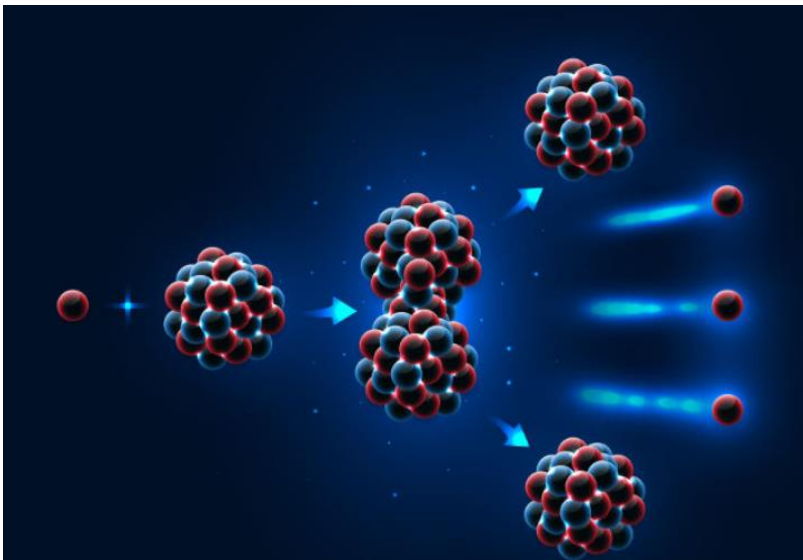
- Máximo próximo da massa $A=56$
- Se um núcleo situado a direita desse máximo for dividido por dois, os núcleos resultantes terão uma energia de ligação B/A maior, serão mais estáveis.
- Se dois núcleos a esquerda se juntarem o núcleo resultante terá B/A maior, será mais estável.



© 2003 Thomson - Brooks Cole

Geração de energia por fissão nuclear - reação em cadeia

- ❑ Reação em cadeia envolvendo fissão nuclear.
- ❑ Neutrons são produzidos em cada fissão de um element pesado , que por sua vez iniciam novas reações de fissão.



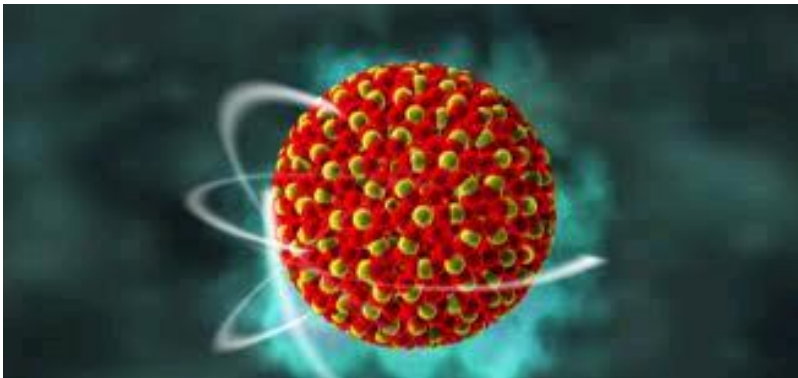
Combustível nuclear

Isótopo físsil: Aquele que pode ser fissionado por ativação neutrônica.

Exemplos: Urânio-235, Plutônio-239, Tório-232, ou misturas destes. O combustível típico atualmente é o óxido de urânio ou de plutônio.

Natureza: 99,3% de U-238 e 0,7% de ^{235}U

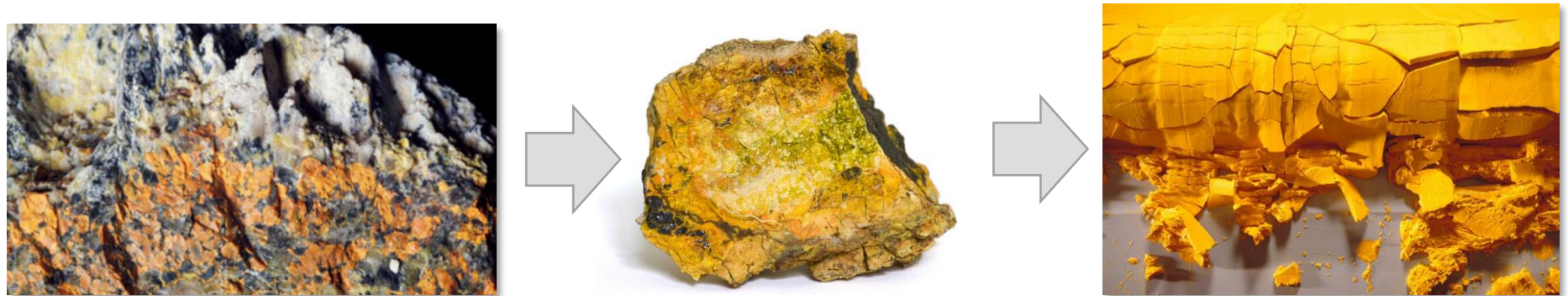
Enriquecimento do U-235 - na proporção de 3% a 4% para ser utilizado como combustível



Núcleo ^{235}U (Z=92 N=143)

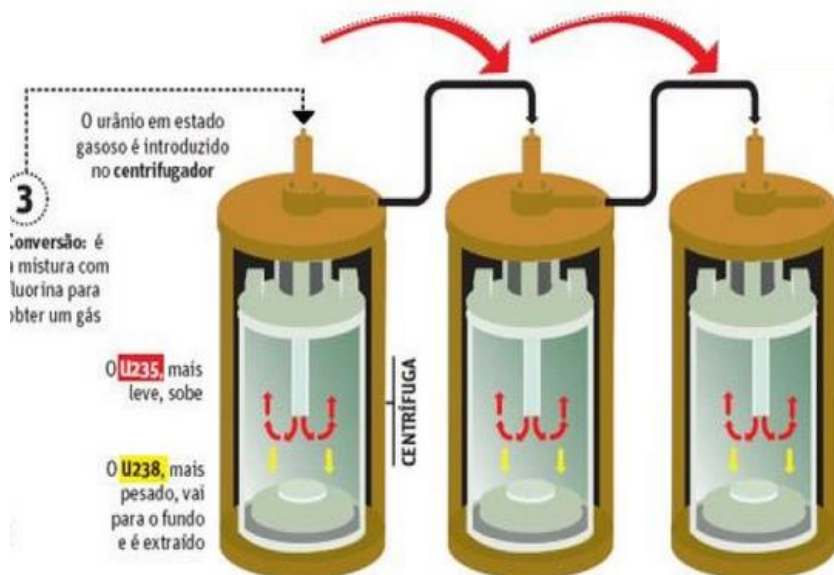
Yellow cake

- ❑ **Mineração e beneficiamento** - Yellowcake. Depois de retirada da terra, a rocha contendo urânio é triturada; em seguida, ela é submetida a um processo químico que separa o urânio de outros materiais a ele associados na natureza. O resultado desta primeira etapa do ciclo do combustível é o concentrado de urânio, ou *yellowcake*.
- ❑ **Conversão** - o concentrado de urânio é dissolvido e purificado, e então convertido para o estado gasoso, o hexafluoreto de urânio (UF_6), e é somente em forma de gás que ele pode ser enriquecido, passando para a próxima etapa do ciclo do combustível nuclear.



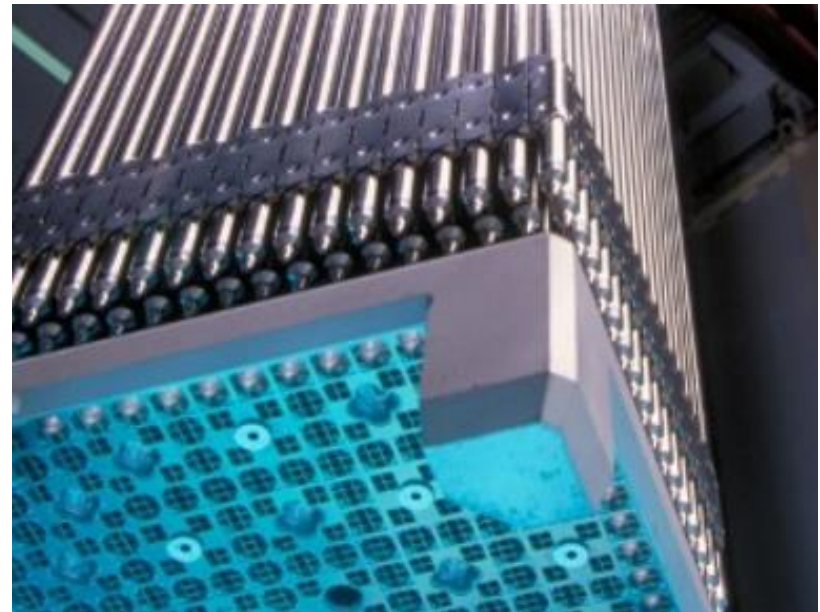
Enriquecimento

- ❑ **Enriquecimento** - é o aumento da concentração do urânio o que torna possível a sua utilização como combustível. Essa concentração passa de 0,7%, como ele se encontra na natureza até 4% (suficiente para que ele gere energia).



Pastilhas

- ❑ **Reconversão** - o gás enriquecido é reconvertido em pó de dióxido de urânio (UO_2).
- ❑ **Fabricação de pastilhas** - é com o urânio enriquecido sob a forma de pó que são fabricadas pastilhas com cerca de um centímetro de diâmetro.
- ❑ **Fabricação do combustível nuclear** - as pequenas pastilhas de urânio enriquecido são colocadas dentro de varetas de uma liga de aço especial - o zircaloy. Em seguida, as varetas são organizadas em feixes, formando uma estrutura firme de até 5 metros de altura - o combustível nuclear.

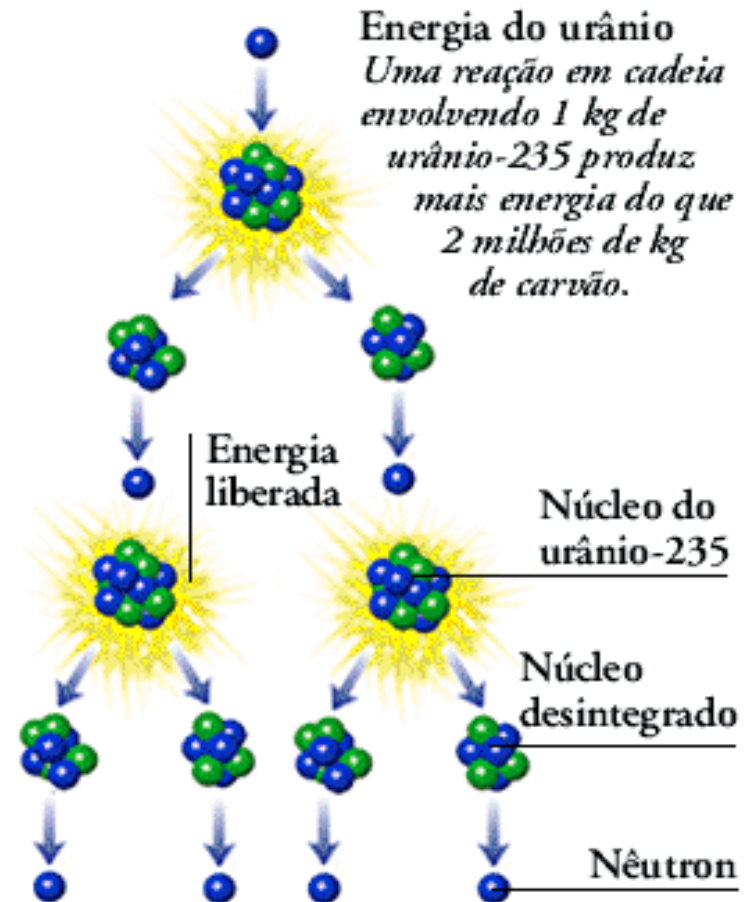
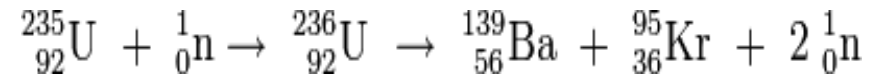


Ciclo completo

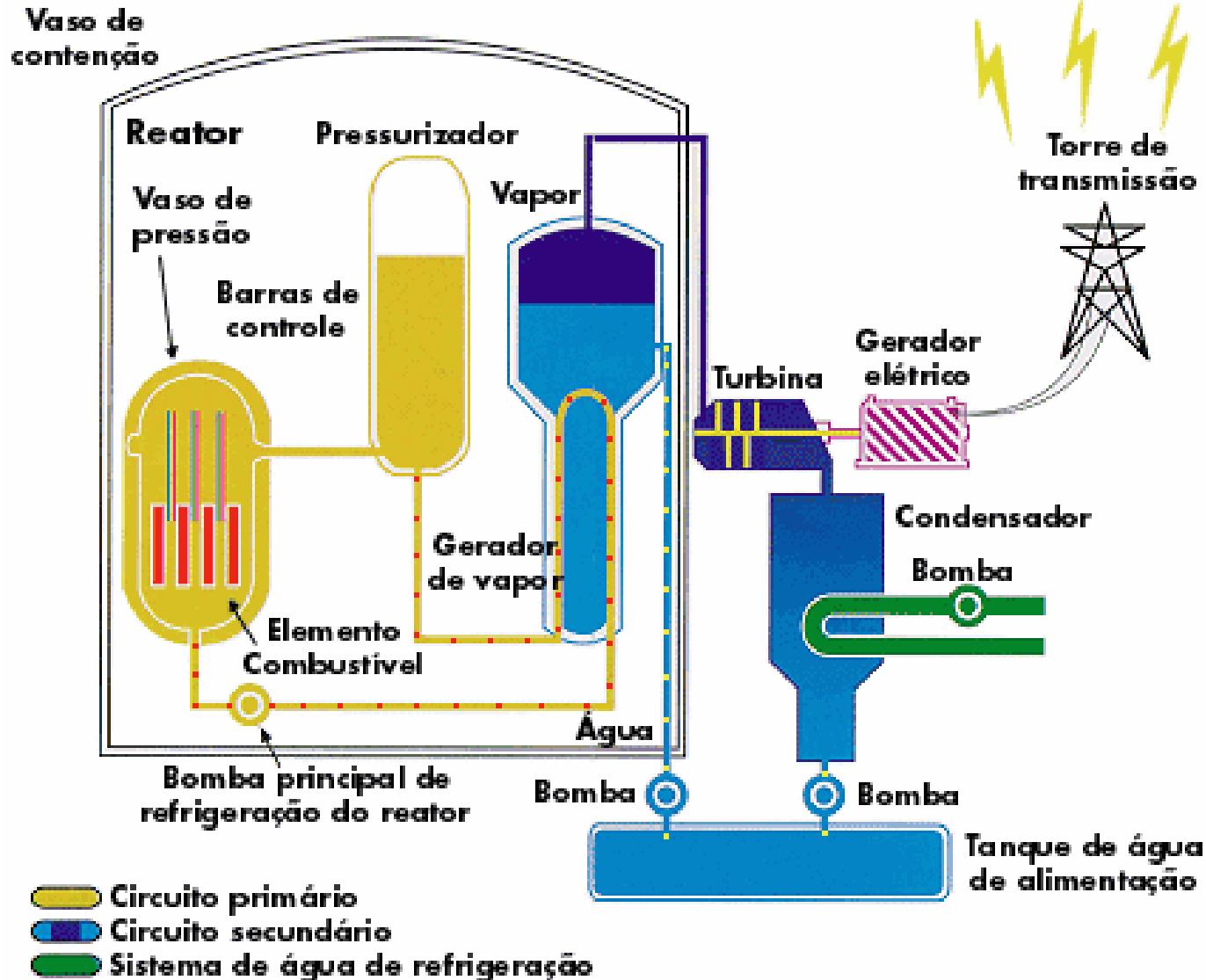


Fissão Nuclear

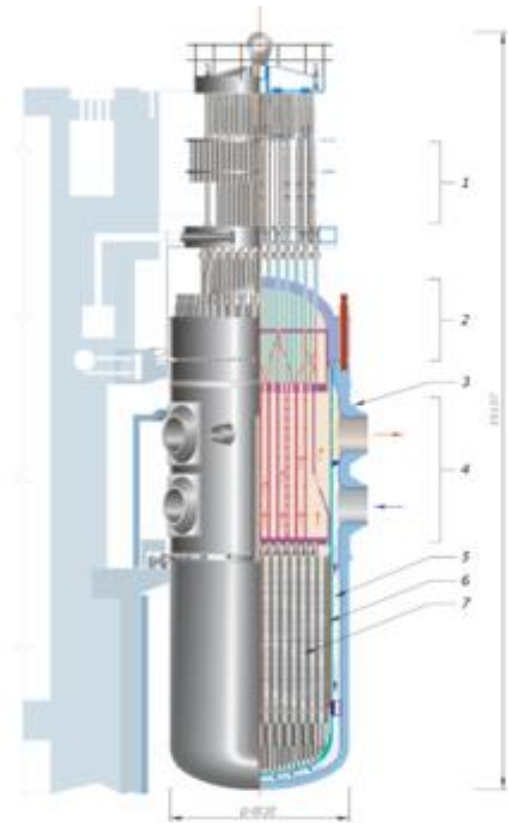
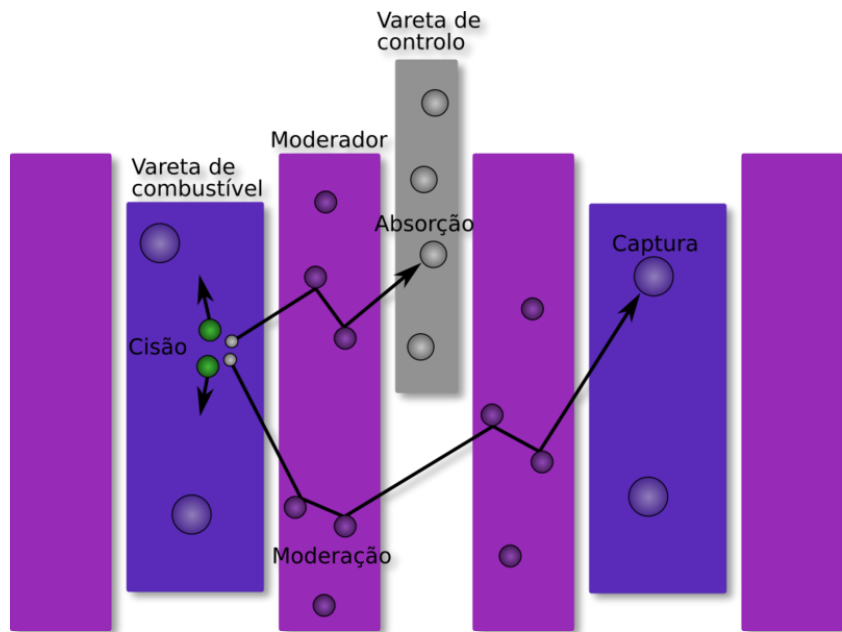
Reação em Cadeia



Como funciona uma usina nuclear?

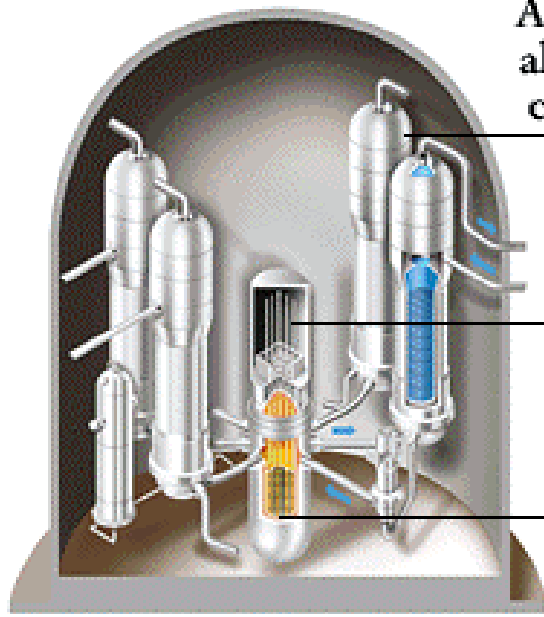


Controle do reator nuclear



- ❑ Varetas de controle no núcleo **Boro** ou **Cádmio**, de materiais absorventes de nêutrons, permitem regular o ritmo da fissão. Estas varetas de controle serão abaixadas ou retiradas conforme a necessidade de estabilização da energia.

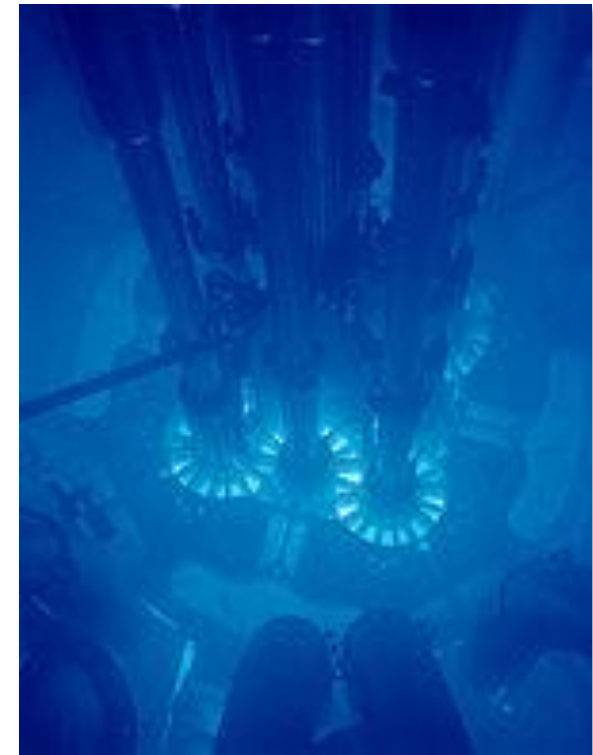
Núcleo de um reator



A turbina é alimentada com vapor

Barras de boro ou cádmio

Barras de urânio



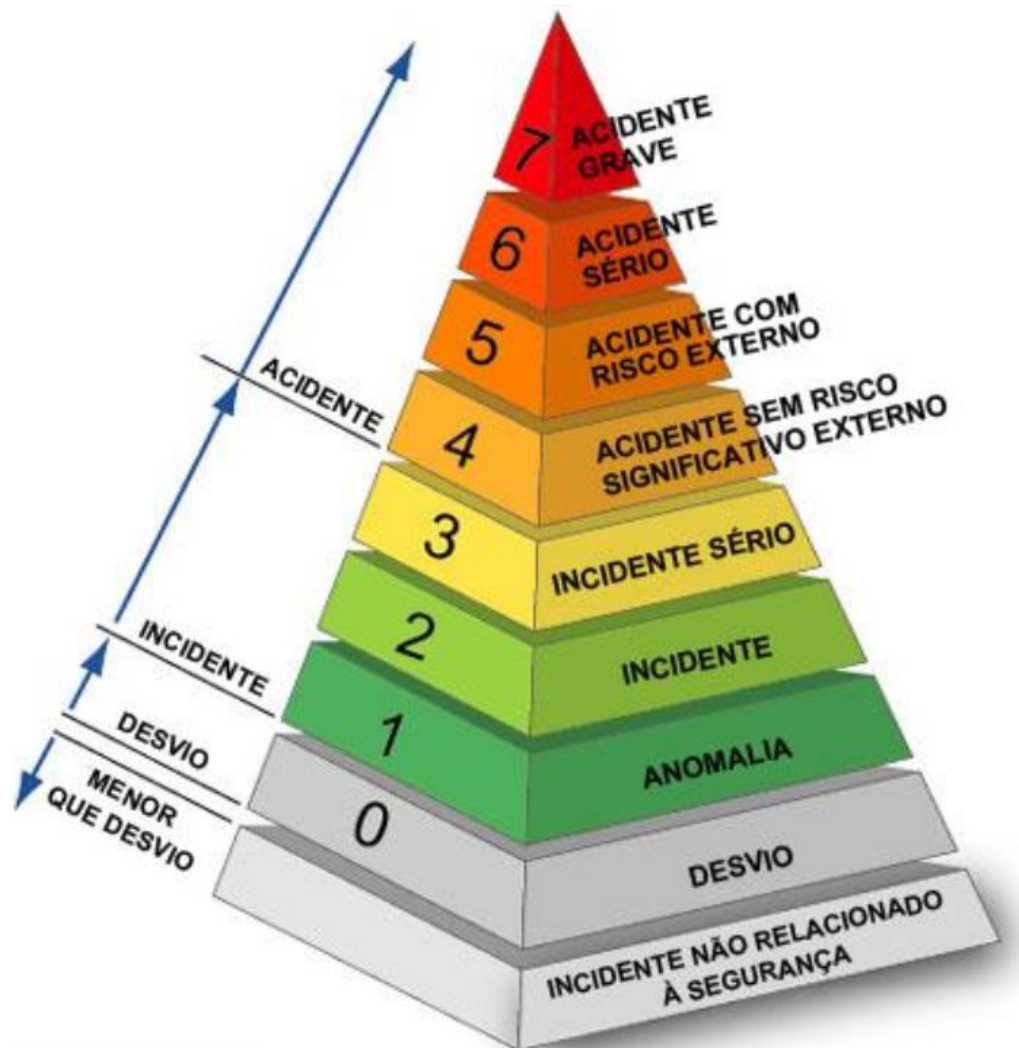
- ❑ Esse processo gera muito calor e é esse calor que é aproveitado para ferver a água, convertendo-a em vapor.
- ❑ É esse vapor que sai sob pressão do reator nuclear e movimenta turbinas que por sua vez fazem movimentar um gerador que produz energia elétrica.

Principais acidentes nucleares



Figura 2. Símbolo internacional da radiação ionizante

Escala internacional de eventos nucleares (INES).



Acidentes

❑ **28 de março de 1979 - EUA** - Em Three Mile Island (Pensilvânia), uma série de erros humanos e de falhas materiais impediram o resfriamento normal de um reator, cujo centro começou a derreter. Os dejetos radioativos provocaram uma enorme contaminação no interior do recinto de confinamento, mas não afetaram a população nem o meio ambiente. Cerca de 140 mil pessoas foram temporariamente deslocadas. O acidente foi classificado no **nível 5** da escala internacional de eventos nucleares (INES).

❑ **C.N. de Saint-Laurent - 1980 - França - nível 4**

❑ **C.Atóm. Constituyentes - 1983 - Argentina - nível 4**



Chernobyl

- ❑ **26 de abril de 1986 - URSS** - O reator número 4 da usina soviética de **Chernobyl**, na Ucrânia, explodiu durante um teste de segurança, causando a maior catástrofe nuclear civil da história e deixando mais de 25 mil mortos (estimativas oficiais).
- ❑ Durante dez dias, o combustível nuclear queimou, jogando na atmosfera radionuclídeos de uma intensidade equivalente a mais de 200 bombas atômicas iguais à que caiu em Hiroshima e contaminando três quartos da Europa. Moscou tentou encobrir o desastre e, depois, minimizar o acidente, classificado em **nível 7**.



Acidentes menores

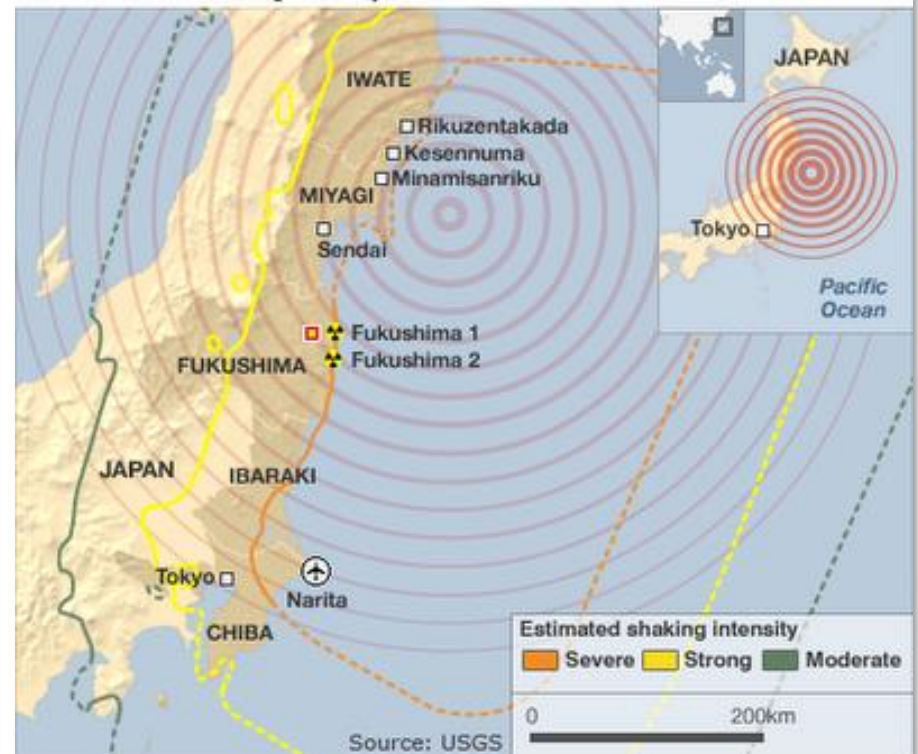
- ❑ **30 de setembro de 1999 - Japão** - Um novo acidente no centro de Tokaimura, devido a erro humano, levou a morte dois técnicos. Mais de 600 pessoas, funcionários e habitantes do entorno, foram expostas à radiação e cerca de 320 mil pessoas foram retiradas da área. Os dois técnicos haviam provocado involuntariamente um acidente de criticidade (reação nuclear descontrolada) ao utilizar uma quantidade de urânio muito superior à prevista.
- ❑ **9 de agosto de 2004 - Japão** - Na usina nuclear de Mihama (centro), vapor não radioativo vazou por um encanamento que se rompeu em seguida, ao que parece, por uma grande corrosão, provocando a morte de cinco funcionários por queimaduras.
- ❑ **23 de julho de 2008 - França** - Durante uma operação de manutenção realizada em um dos reatores da usina nuclear de Tricastin (sul), substâncias radioativas vazaram, contaminando muito levemente uma centena de empregados.

Fukushima

- **11 de março de 2011 - Japão** - No dia seguinte a um terremoto muito forte seguido de tsunami, uma explosão ocorreu no reator da usina nuclear de Fukushima Nº1 (250 km ao norte de Tóquio). **Nível 7.**

Áreas afetadas pelo terremoto 8.9 - Japão

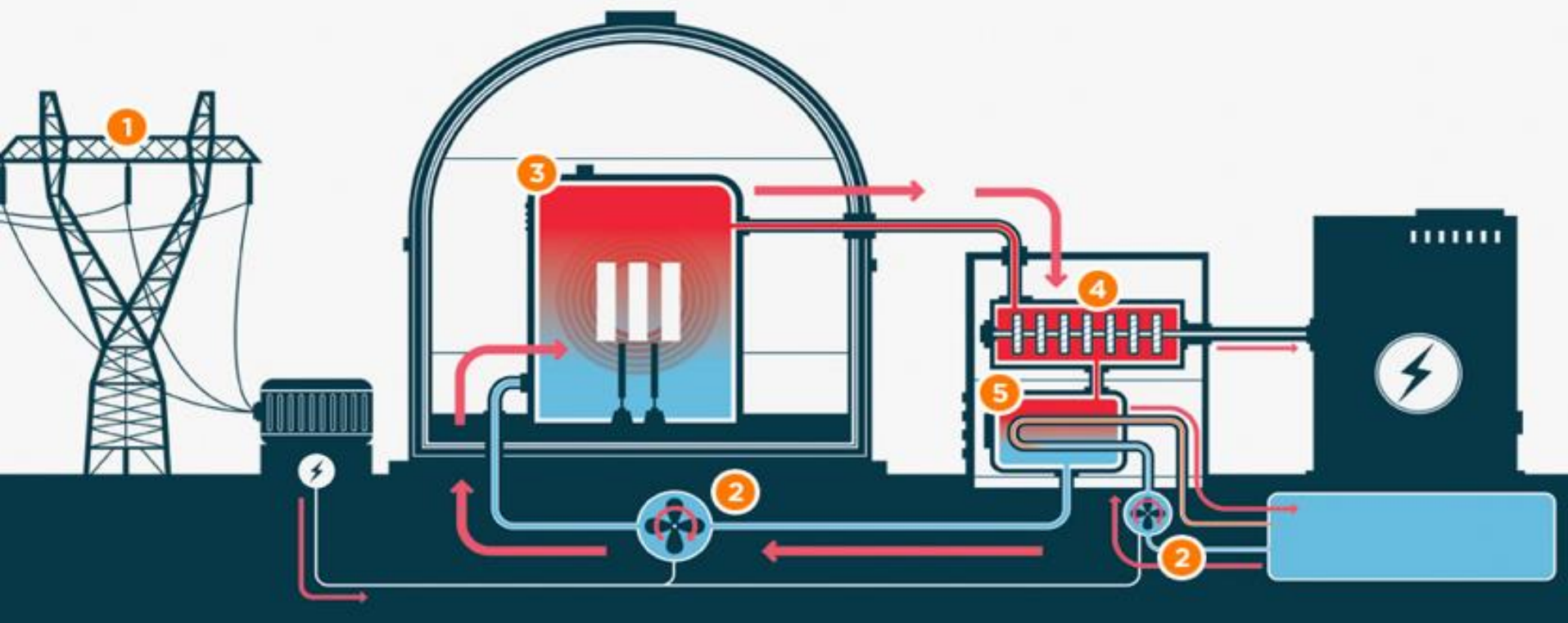
Areas affected by the quake



Fissão e fusão

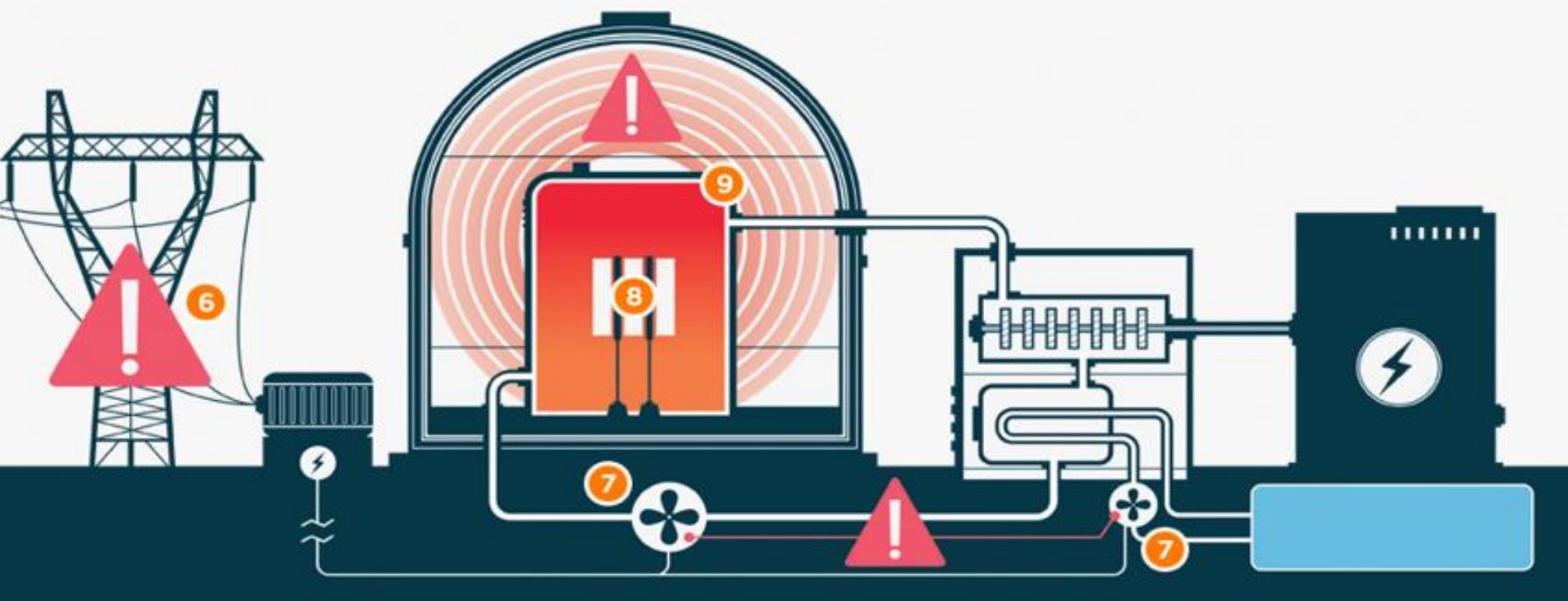
COMO FUNCIONA UM REATOR NUCLEAR

- 1 Rede externa de energia alimenta o sistema de bombeamento de água da usina nuclear.
- 2 Sistema de bombeamento injeta água no reator e no sistema de resfriamento.
- 3 Núcleo do reator aquece a água a altas temperaturas e gera vapor que é enviado à turbina.
- 4 Vapor move a turbina e seu movimento gera eletricidade.
- 5 Após movimentar a turbina, o vapor é direcionado ao sistema de resfriamento onde volta ao estado líquido, reiniciando o processo.



O QUE ACONTECEU EM ALGUMAS USINAS NUCLEARES NO JAPÃO

- 6 Em consequência do terremoto seguido do tsunami, o fornecimento externo de energia foi interrompido.
- 7 Sem energia, os sistemas de bombeamento de água e de resfriamento pararam de funcionar.
- 8 A usina desligou o reator, mas seu núcleo continua em atividade até ser totalmente resfriado.
- 9 Sem resfriamento, a pressão do vapor e os níveis de radioatividade continuam a aumentar, gerando risco de explosões.



15 RESPOSTAS SOBRE O ACIDENTE

REATOR 4

No momento do terremoto, estava desligado para manutenção. Dois incêndios danificaram o prédio que o abriga. A piscina de combustível está exposta, liberando radiação

REATOR 3

Houve uma explosão na segunda-feira (14), causando o segundo escape radioativo da usina

REATOR 2

O sistema de refrigeração parou na segunda-feira (14), e no dia seguinte houve uma explosão no prédio que abriga o reator

REATOR 1

Houve uma explosão no prédio que abriga o reator na madrugada de sábado (12), liberando radiação



Fotos Fukushima

Momento da Explosão na Usina Nuclear - Japão



Imagem mostra danos nos reatores 3 (esquerda) e 4 (centro) da usina de Fukushima (15/03)



Trabalhadores na Usina de Fukushima - Japão



Mais fotos



Agentes procuram por sinais de radiação em crianças que foram retiradas de área próxima à usina de Fukushima (12/03)



Homem verifica nível de radiação em criança na região de Fukushima (13/03)

Criança passa por exame de radiação em centro de testes em Fukushima, Japão (15/03)

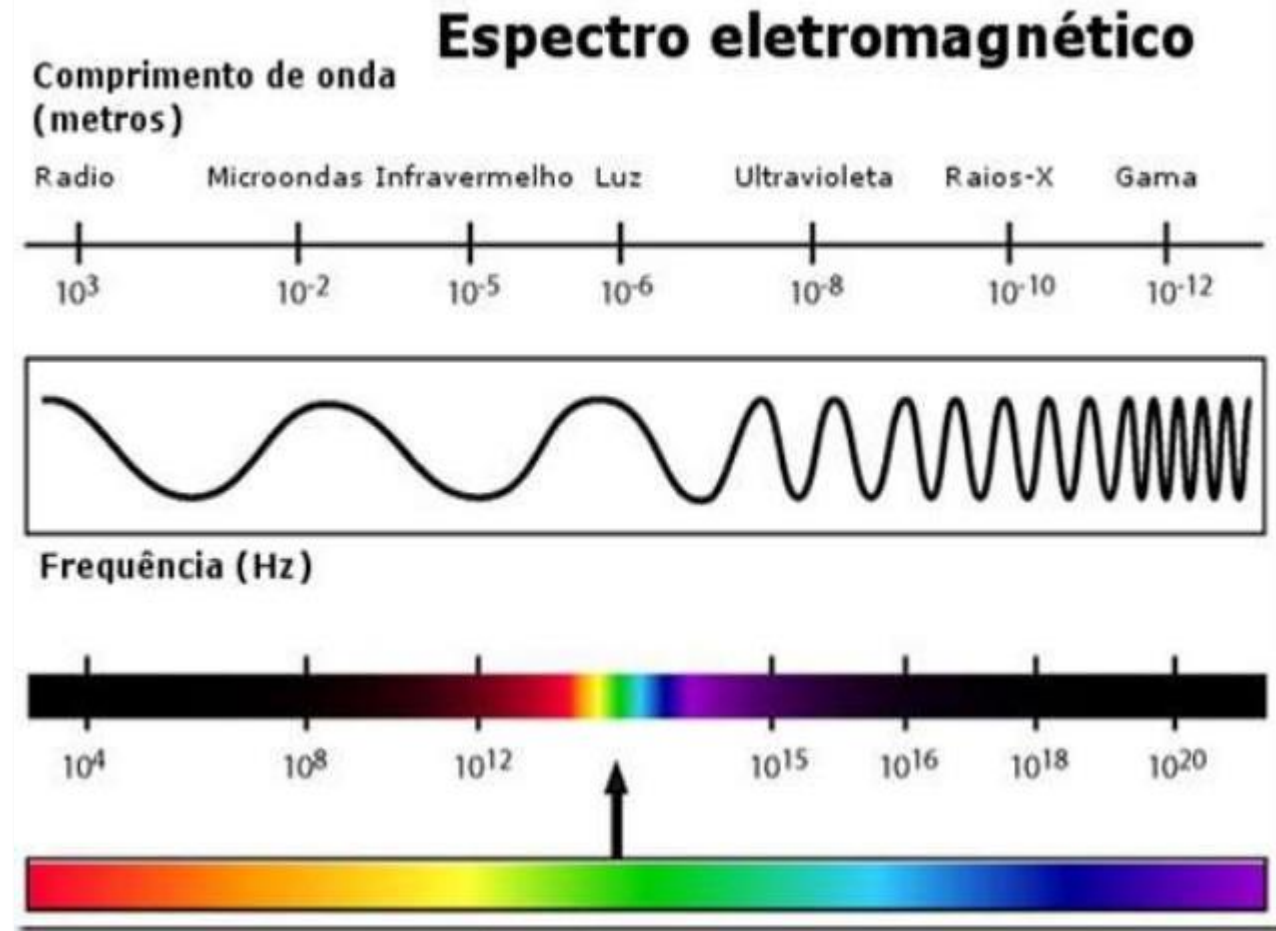


Radiações

São ondas eletromagnéticas ou partículas que se propagam com alta velocidade e portando energia, eventualmente carga elétrica e campo magnético, e que, ao interagir podem produzir variados efeitos sobre a matéria.

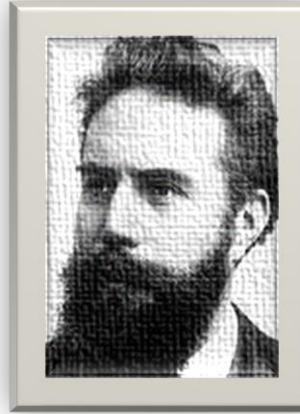
As radiações eletromagnéticas mais conhecidas são:

- Luz
- Microondas
- ondas de rádio
AM e FM
- Laser
- raios X
- radiação gama

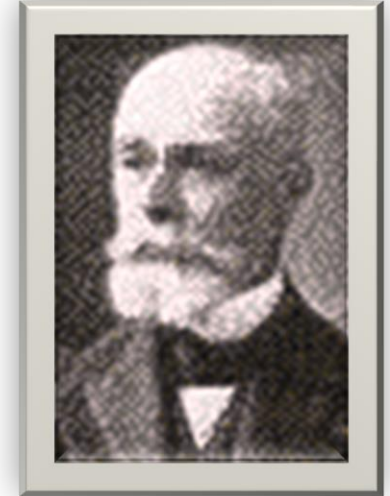


Descobertas e prêmios Nobel

➤ 1895- Roentgen descobriu os raios X.



➤ 1896 - Bequerel foi encarregado de verificar a descoberta por Roentgen e acabou descobrindo a radioatividade pela observação da fluorescência de alguns minerais.



➤ 1897- Thomson descobriu o elétron (radiação beta).



➤ 1898- Marie Curie descobriu o polônio e o rádio devida sua intensa atividade.



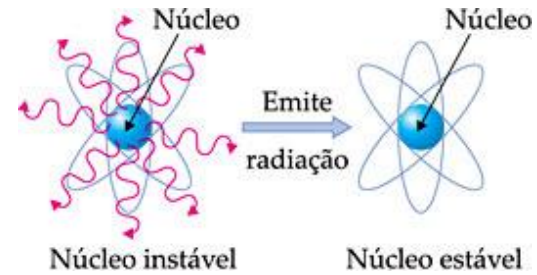
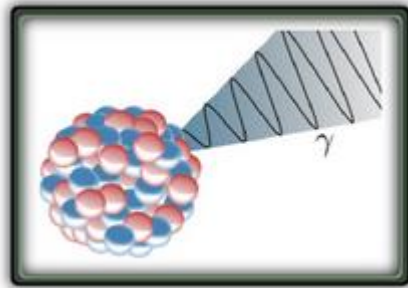
Radiação alfa e beta

- ❑ 1889, Rutherford identificou a natureza de dois tipos distintos de radiação: alfa e beta. Foi chamado de Sr. Radioatividade
- ❑ E Villard, a radiação gama
- ❑ 1906- Rutherford descobriu os núcleos atômicos e as transmutações; que significa o átomo de um elemento perder corpúsculos para tornar-se átomo de um outro elemento.



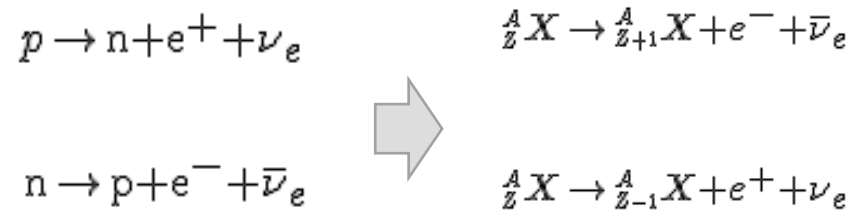
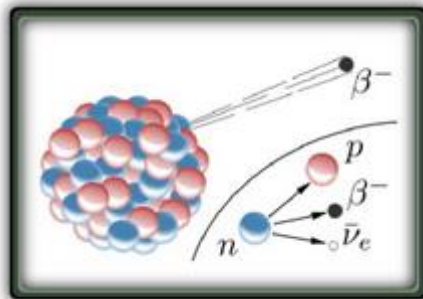
Decaimento radioativo

Decaimento γ

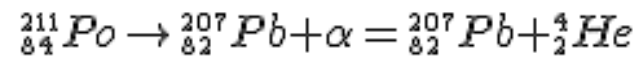
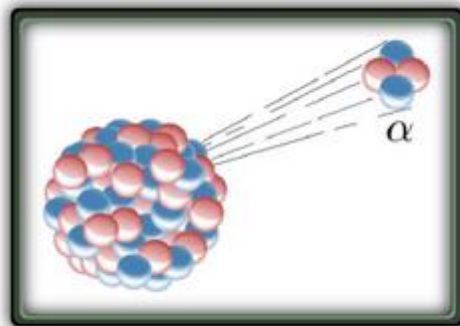


Decaimento β^+ e β^-

β^+ e β^-

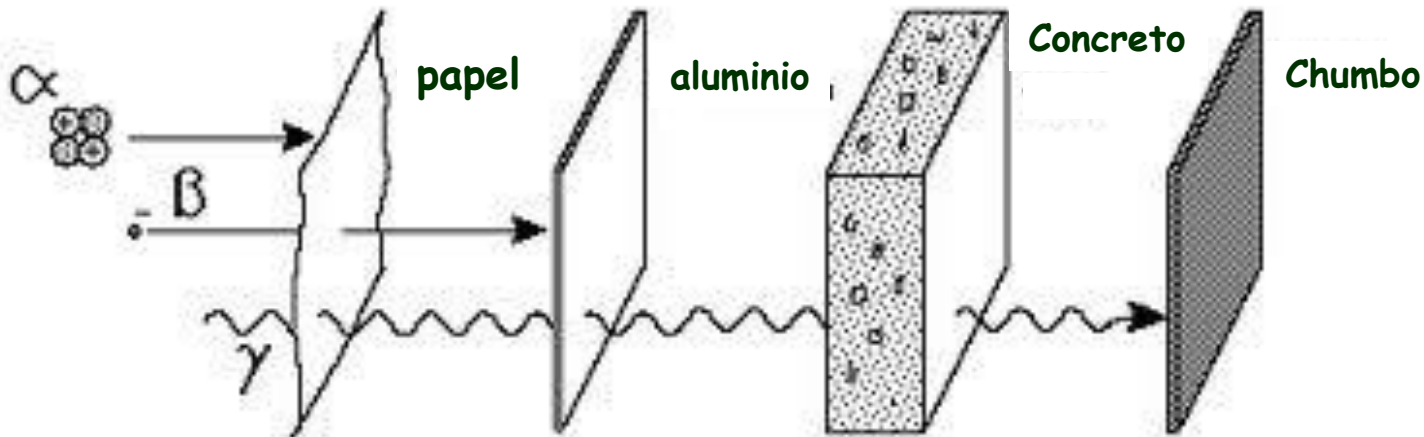


Decaimento α



Fissão e fusão

- ❑ As radiações Alfa, Beta e Gama possuem diferentes poderes de penetração, isto é, diferentes capacidades para atravessar os materiais.
- ❑ Assim como os raios-X os **raios gama** são extremamente penetrantes, sendo detido somente por uma parede de concreto ou metal. Têm altíssima velocidade aproximadamente 300 000 km/s.



Atividade é o número de desintegrações nucleares por unidade de tempo em uma quantidade de substância radioativa.

Curie (Ci) = $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo. Atualmente é pouco utilizada.

(1Bq = $2,7 \times 10^{-11}$ Ci). Bequerel (Bq) Sistema Internacional de Unidades.

Exposição: capacidade de um feixe de radiação eletromagnética (raios-X, raio gama, ultravioleta, etc.) causar ionização (retirada de elétrons do átomo) do material atravessado por ele.

A unidade é C/kg (coulombs, por 1 kg de ar seco e puro).

Antigamente se usava o roentgen (R), correspondente a $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg.

Ao se mencionar uma determinada quantidade de roentgen em um feixe de raios-X, por exemplo, isto não significa que toda essa energia atingirá o corpo alvo; trata-se apenas da energia transportada pela radiação

dose

Dose absorvida: *significa a energia (dose) realmente absorvida por um corpo específico.*
Atualmente usa-se o Sievert (Sv) para expressar dose absorvida no SI
1 Sv = 1 joule de energia para 1 kg de massa).

Dose Equivalente - (Joule/Kg).Q - Leva em conta os efeitos químicos e biológicos -
Dependo do tipo de Radiação

Dose Equivalente Efetiva - Depende de cada órgão do corpo

Tipos diferentes de radiação podem produzir diferentes efeitos biológicos para uma mesma dose absorvida.

LIMITES MÁXIMOS - mSv/Ano

	Trabalhadores	População
Dose Efetiva (corpo inteiro)	20	1
Cristalino	150	15
Pele	500	150
Extremidades	500	50

Radiação	Q
Raios X	1
Raios gama	1
Raios beta	1
Nêutrons lentos	5
Prótons	10
Nêutrons rápidos	10
Partículas alfa	20



Exibido em Milisieverts

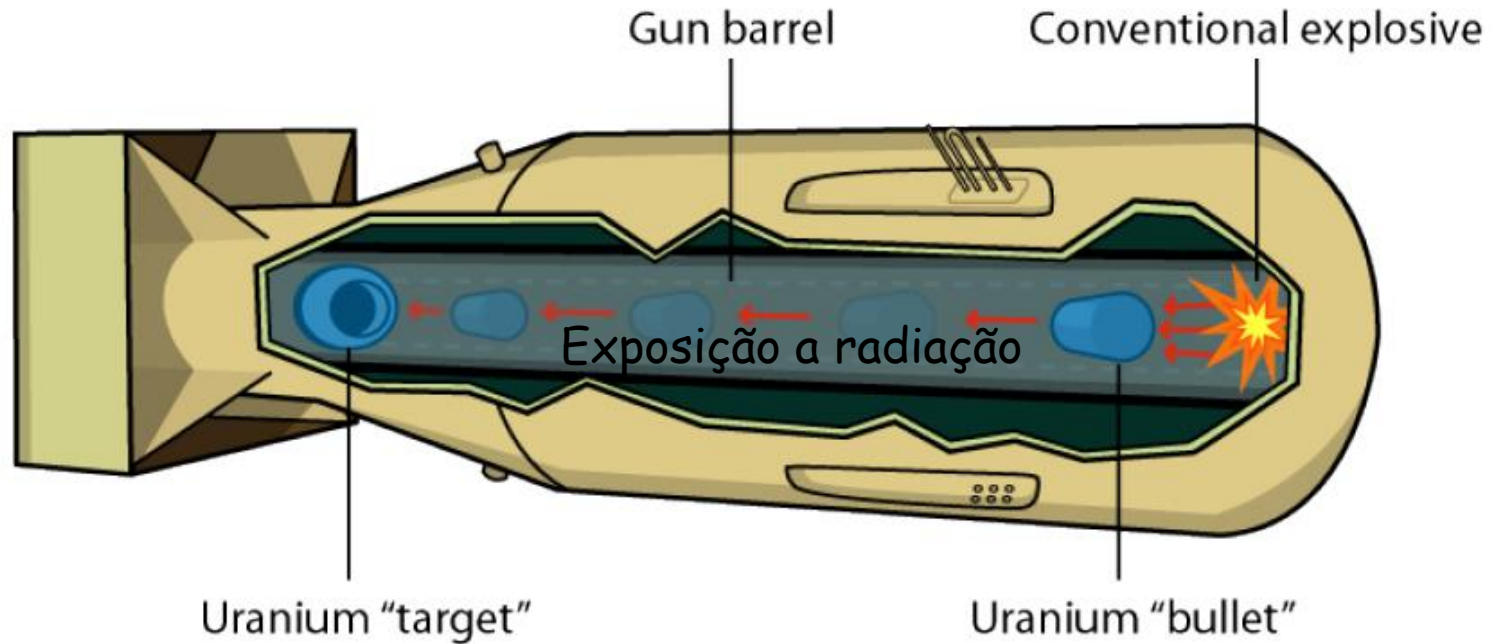


Exposição a radiação

- ❑ 50 e 100 milisieverts: mudanças na composição do sangue.
- ❑ 500: náusea que se manifesta em questão de horas.
- ❑ 700: vômitos.
- ❑ 750: queda de cabelos que se manifesta entre 2 a 3 semanas.
- ❑ 900: diarreia.
- ❑ 1.000: hemorragia.
- ❑ 4.000: possível morte no prazo de dois meses, se a vítima não receber tratamento.
- ❑ 10.000: destruição da parede intestinal interna, hemorragia interna e morte em entre 1 e 2 semanas.
- ❑ 20.000: danos ao sistema nervoso central, perda de consciência em questão de minutos e morte no prazo de horas ou dias

Bomba atômica

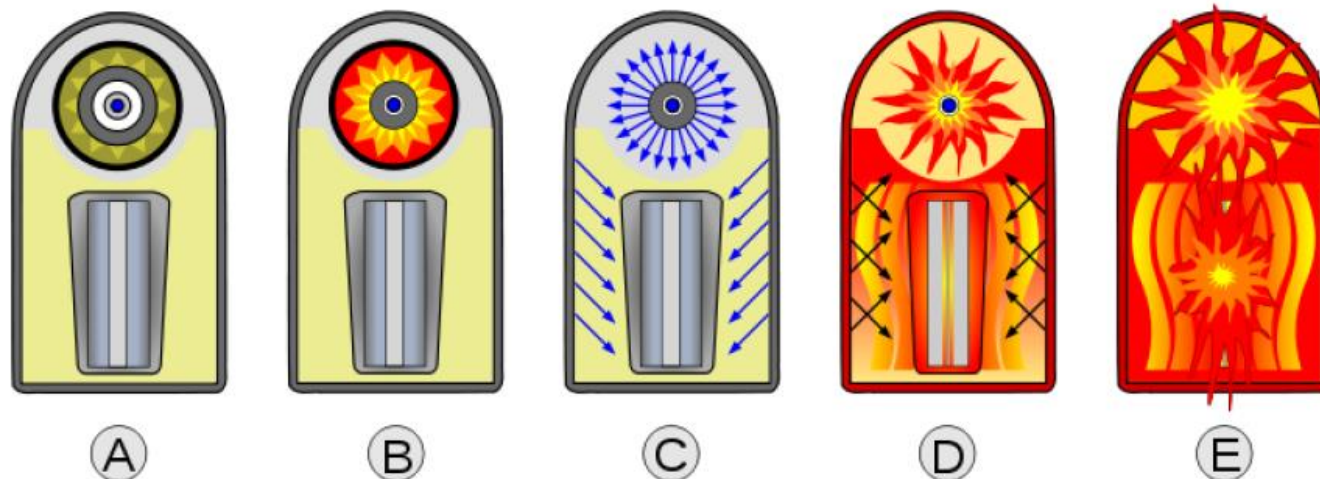
Bomba de fissão (bomba atômica)



Ao atingir massa crítica ocorre a fissão.

Bomba nuclear

Bomba de fusão (bomba nuclear)



A - Material explosivo (plutonio) na cabeça da bomba, envolto por espuma (poliestireno)

B - Início da explosão por fissão do plutonio

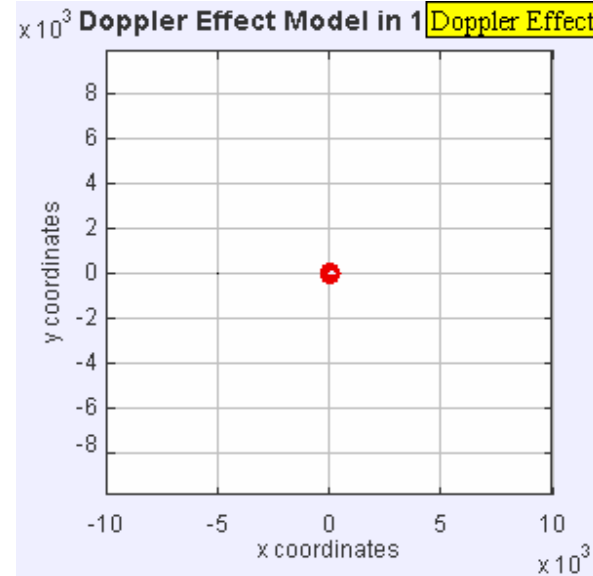
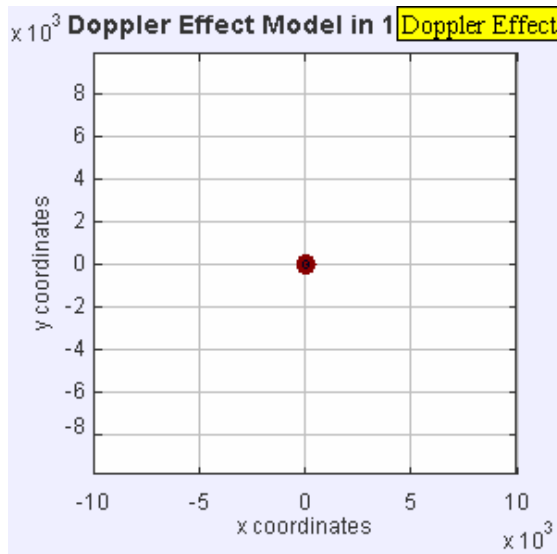
C - Fissão primária emite raio-X, que irradia a espuma de poliestireno

D - Poliestireno se torna plasma e o aquecimento inicia a fusão

E - Reação de fusão com quebra do 6Lid e início da reação de fusão d+t

Efeito doppler clássico

O Efeito Doppler corresponde a uma percepção de uma frequência relativa, que é diferente da frequência de emissão da onda.



Fontes de som estáticas produzem ondas de som com frequência f_f . Um observador parado em relação a essa fonte vai perceber a mesma frequência $f_{obs} = f_f$.

Se a fonte ou observador se movem a frequência percebida pelo observador será diferente.

$$f_{obs} = f_f \times \left(\frac{v \pm v_{obs}}{v \pm v_f} \right)$$

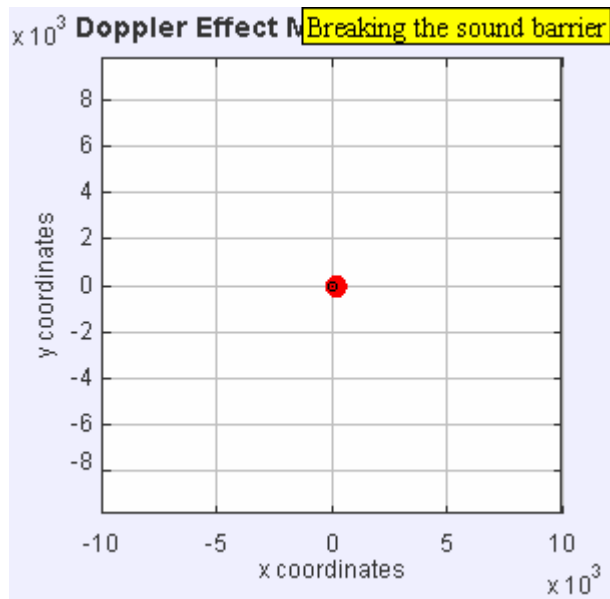
v = velocidade da onda sonora

$+v_{ob}$ = observador se afastando

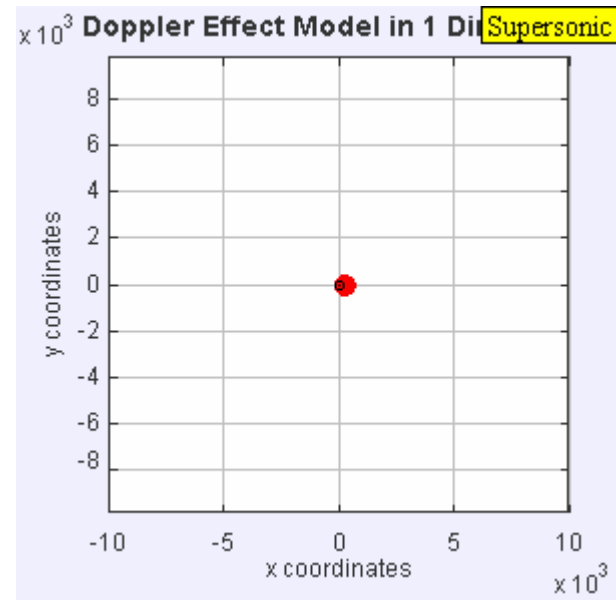
$-v_{ob}$ = observador se aproximando

$+v_f$ = fonte se aproximando

$-v_f$ = fonte se afastando

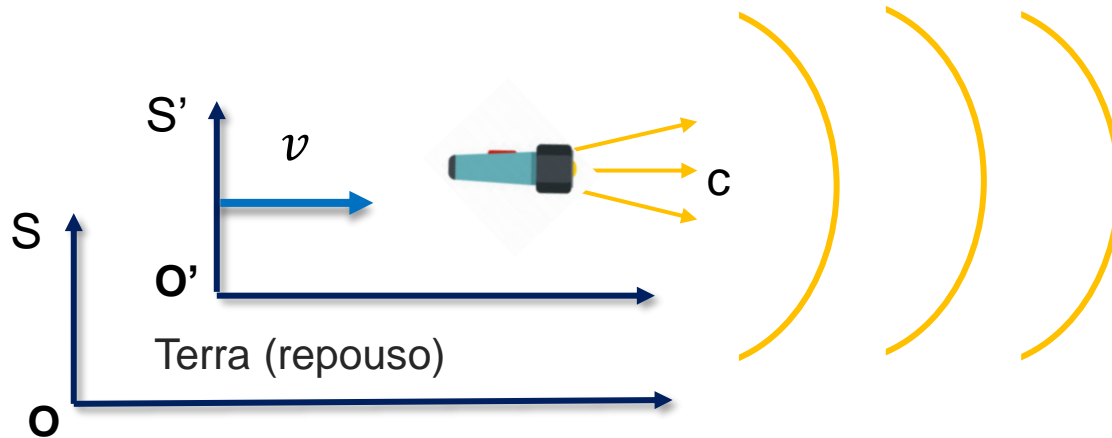


Quando a fonte se move na mesma velocidade do som no meio ($v_f = c$, ou Mach 1), as ondas à frente da fonte ficam todas "empilhadas" no mesmo ponto.



Quando a fonte tem velocidade maior que a do som ela vai à frente das ondas mais avançadas. A fonte passa por um observador estático antes que o observador escute o som.

Efeito doppler relativístico



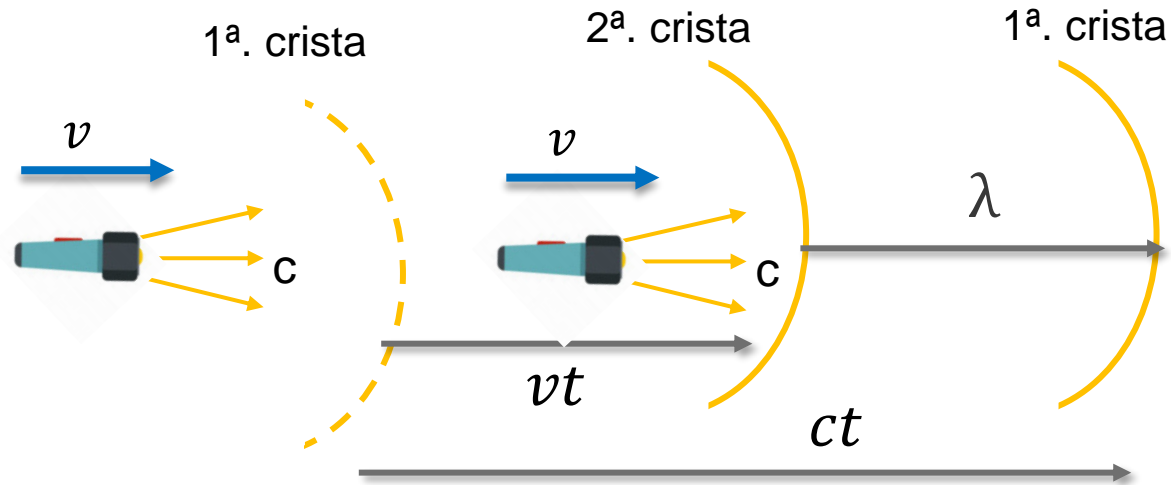
Observador em S' A fonte de luz está parada em relação ao referencial S'.

λ_0 Comprimento de onda próprio. f_0 frequência própria

$$t_0 = \frac{1}{f_0}$$

Observador em S

A fonte de luz está se movendo com velocidade v



Após um intervalo de tempo t as cristas são observadas pelo observador em S em pontos diferentes.

λ Distância entre duas cristas.

$$\lambda = ct - vt = (c - v)t$$



$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{(c - v)t}$$

Na relatividade o intervalo de tempo em movimento observado por um observador em repouso sofre dilatação:

$$\Delta t = \Delta t_0 \gamma$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Tempo próprio medido em repouso em S'

Período de oscilação também sofre dilatação

$$t = t_0 \gamma = t_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \times \frac{c}{c} = \frac{ct_0}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Substituindo na equação da frequência:

$$f = \frac{c}{(c - v)t} \quad \text{com} \quad t_0 = \frac{1}{f_0}$$

$$f = \frac{c}{(c - v)t} = \frac{c}{(c - v)} \times \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{ct_0} = f_0 \frac{\sqrt{(c - v)(c + v)}}{(c - v)} =$$

Fonte se aproximando

$$f = f_0 \sqrt{\frac{(c + v)}{(c - v)}}$$

Fonte se afastando

$$f = f_0 \sqrt{\frac{(c - v)}{(c + v)}}$$

$$f = f_0 \sqrt{\frac{(c + v)}{(c - v)}}$$

Fonte se aproximando

Frequência aumenta

Vermelho -> azul

Blue shift

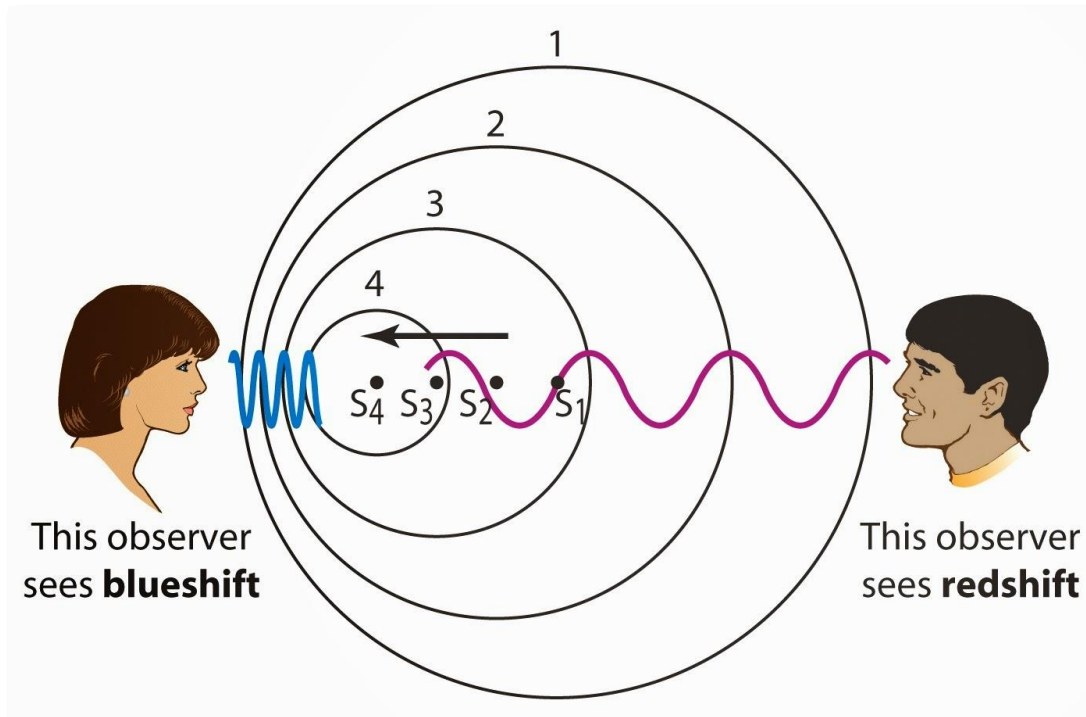
$$f = f_0 \sqrt{\frac{(c - v)}{(c + v)}}$$

Fonte se afastando

Frequência diminui

Azul -> Vermelho

red shift

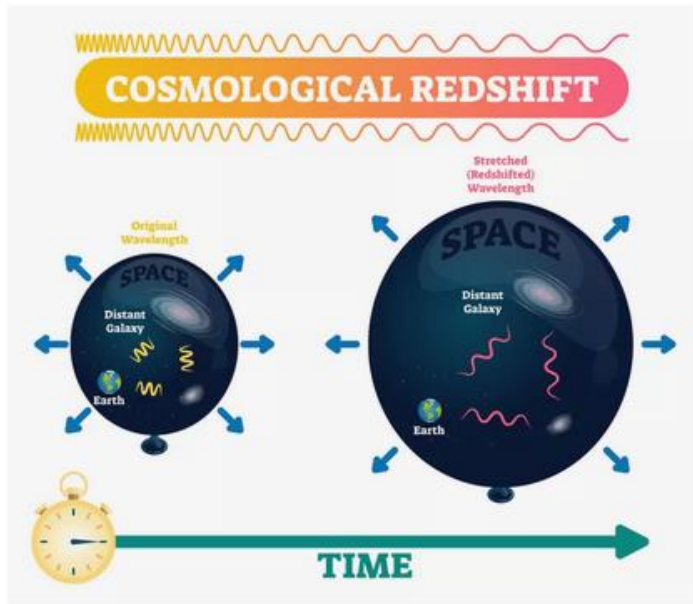


Uma supernova é a explosão de uma estrela em fase final de evolução. Existem alguns tipos distintos de supernovas, classificadas de acordo com as características do espectro da luz que emitem. As supernovas do tipo Ia (SNE Ia) emitem sempre a mesma luminosidade e espectro. São chamadas de "vela padrão" ou "régua cósmica".



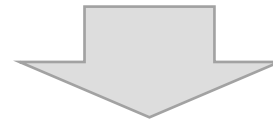
SN 1987A Tarantula Nebula in LMC (constellation Dorado, southern hemisphere)
size: ~2000ly (1ly ~ 6 trillion miles), distance: ~180000 ly

- Luminosidade de uma supernova entre L_0^9 a L_0^{10}
- Frequência de 1 a 10 por século por Galaxia

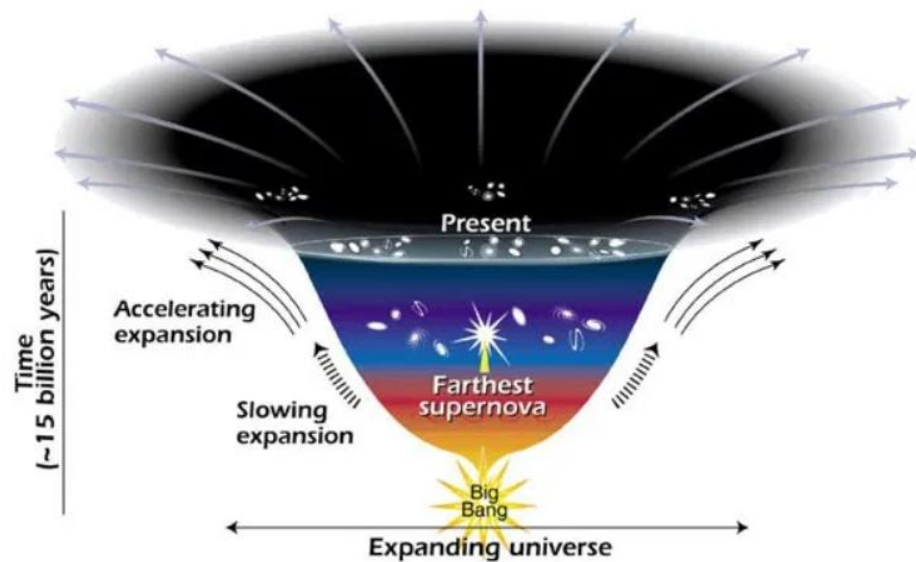
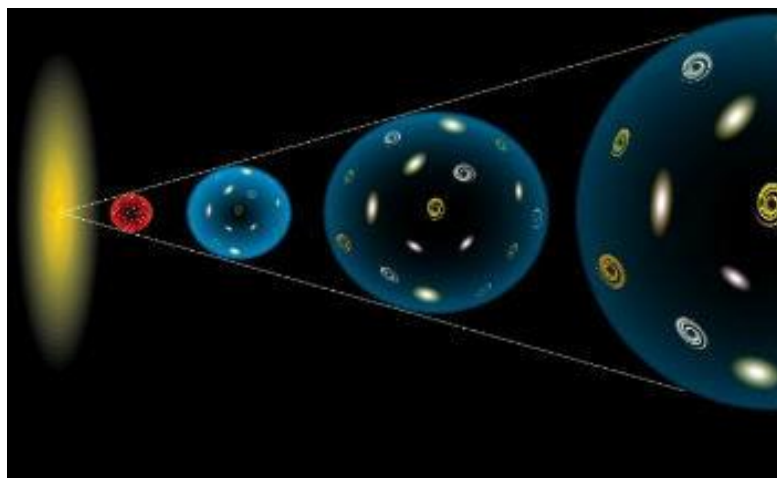


Getty Images / Vector Mine

Usando o fato de que a supernova emite sempre o mesmo espectro podemos usar o redshift para determinar a velocidade de afastamento das galáxias e a expansão do universo.



Foi descoberto que o universo está se expandindo de forma acelerada. Explicação: **Energia Escura.**



- ❑ Estrelas (supernovas) emitem radiação com linhas de absorção do hidrogênio.
- ❑ Se elas estão se afastando, as linhas são deslocadas para o vermelho (redshift).
- ❑ Considerando que a linha principal da série Balmer tem $\lambda_0 = 656\text{nm}$.
- ❑ Observamos de uma Galaxia distante que se afasta essa linha tem $\lambda = 1.458\text{ nm}$.
- ❑ Determine a velocidade de afastamento dessa Galaxia.

$$f = f_0 \sqrt{\frac{(c - v)}{(c + v)}}$$

$$v = \left[\frac{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1} \right] c$$

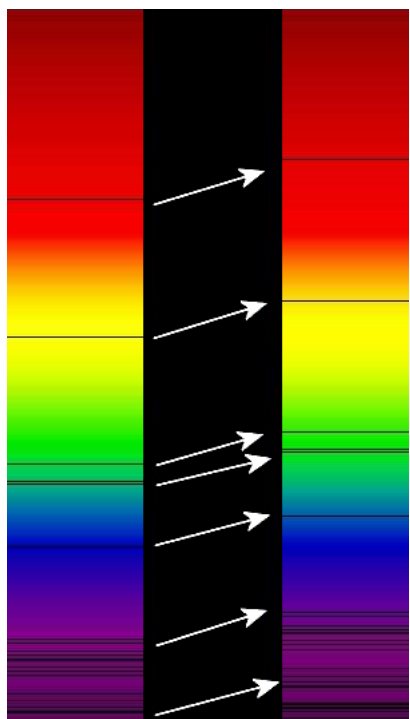
Fonte se afastando
 Frequência diminui
 Azul -> Vermelho
 red shift

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \frac{f}{f_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

$$v = \left[\frac{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2 + 1}{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2 - 1} \right] c$$

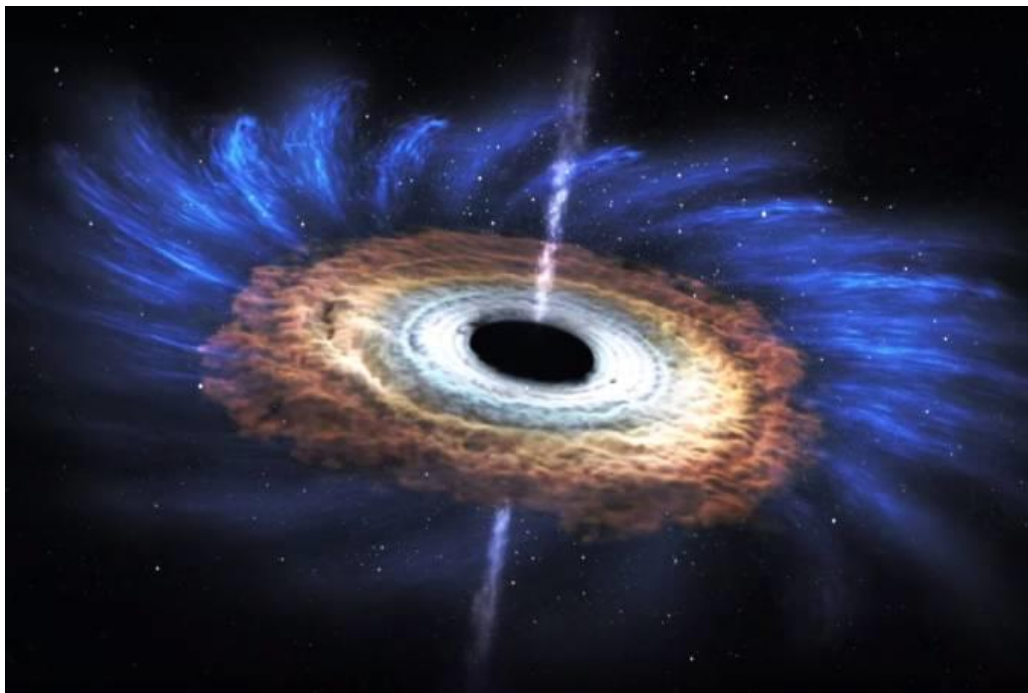
$$\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{656}{1458}\right)^2 = 0,202$$

$$v = 0,664c$$



Redshift

- ❑ Recentemente cientistas descobriram que buracos negros podem também “cuspir” luz
- ❑ A matéria fica girando em torno do buraco numa velocidade muito alta.
- ❑ Matéria ionizada emite radiação da frequência da luz visível.
- ❑ Frequência de emissão da matéria ionizada é da ordem de $5,55 \times 10^{13}$ Hz (vermelho)
- ❑ Frequência observada saindo do buraco negro $6,66 \times 10^{14}$ Hz (azul)
- ❑ Qual a velocidade com que a matéria gira em torno do buraco negro?



$$f = f_0 \sqrt{\frac{(c + v)}{(c - v)}}$$

Fonte se aproximando

Frequência aumenta

Vermelho -> azul

Blue shift



$$v = \left[\frac{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1} \right] c$$

$$\frac{f}{f_0} = \frac{6,66 \times 10^{13}}{5,5 \times 10^{13}} = 12$$

$$v = \left[\frac{12^2 - 1}{12^2 + 1} \right] c$$



$$\frac{v}{c} = 0,986c$$

Materia se deslocando em velocidade próxima a da luz

A vida média de meson- μ (muon) em em repouso é $T_0=2.2 \times 10^{-6}$ s.

Meson é um hadron formado por quarks e anti-quarks.

Tem vários tipos: meson- π (pion), meson- μ (muon), meson-K (kaon), ρ , D, B, T, ξ , ψ , ϕ

Esses mésons decaem em si.

meson- π (pion) decai em meson- μ (muon)

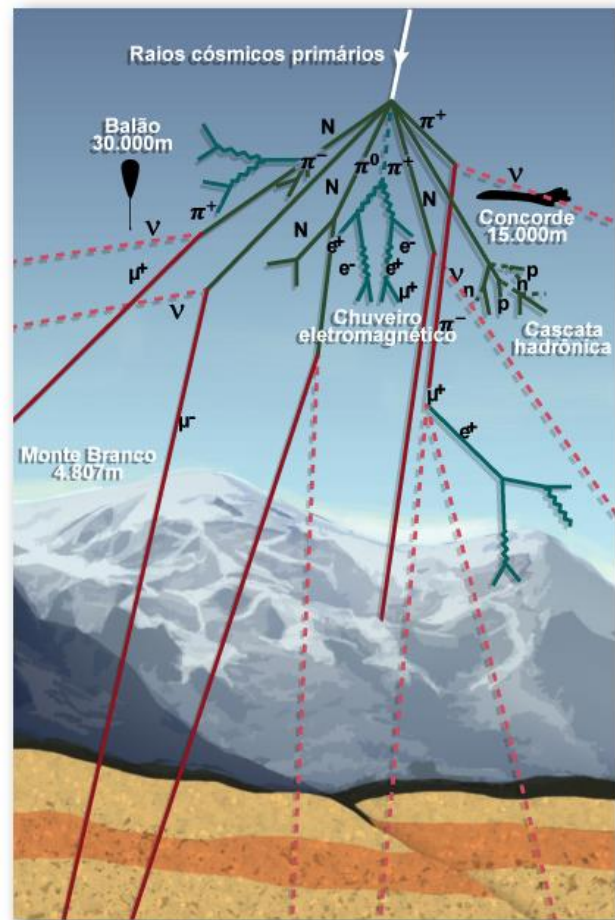
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

meson- μ (muon) decai em eletron, pósitrons e neutrinos

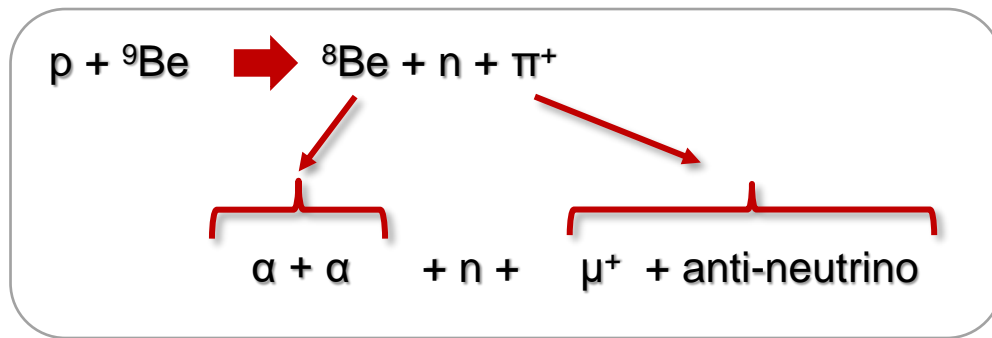
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$



Em uma medida de laboratório um pion foi produzido e decaiu em um muon com uma vida média $T=6,9 \times 10^{-6}$ s e com uma massa de repouso 207 vezes maior do que um eletron.

- ❑ Qual a velocidade do meson- μ (muon)?
- ❑ Qual a massa relativística do muon?
- ❑ Qual sua energia cinética?
- ❑ Qual seu momento?



Primeiramente podemos determinar o fator de Lorentz a partir da informação do tempo de vida média, considerando que houve uma dilatação do tempo.

$$\Delta t = \Delta t_0 \gamma$$

Tempo próprio medido em repouso em S'

$$T = T_0 \gamma$$

Vida média própria medida em repouso

❑ Qual a velocidade do meson- μ (muon)?

vida média do muon em repouso é $T_0 = 2.2 \times 10^{-6}$ s.

vida média em movimento no laboratório $T = 6.9 \times 10^{-6}$ s

$$T = T_0 \gamma \quad \Rightarrow \quad \gamma = \frac{T}{T_0} = \frac{6,9 \times 10^{-6}}{2,2 \times 10^{-6}} = 3,14$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Downarrow$$
$$v = 0,948c$$

❑ Qual a massa relativística do muon?

Massa de repouso $m_{0\mu} = 207 \times m_{0e} = 207 \times 0,511 \frac{MeV}{c^2} = 105,8 \frac{MeV}{c^2}$

Massa relativística $m_{\mu} = m_{0\mu} \times \gamma(v) = 105,8 \times 3,14 = 332 \frac{MeV}{c^2}$

❑ Qual energia cinética do muon?

$$E = mc^2 = K + E_0$$

$$K = E - E_0 = m_{\mu}c^2 - m_{0\mu}c^2 = 332 - 106 = 226 MeV$$

❑ Qual momento do muon?

$$p_{\mu} = m_{\mu}v = 332 \frac{\text{MeV}}{c^2} \times 0,948c = 314,7 \frac{\text{MeV}}{c}$$

$$p_{\mu} = 314,7 \frac{\text{MeV}}{c}$$

$$E^2 = E_0^2 + p^2c^2 \quad p = \sqrt{\frac{E^2 - E_0^2}{c^2}} = \sqrt{\frac{332^2 - 105,8^2}{c^2}}$$

$$p = 314,7 \frac{\text{MeV}}{c}$$