



# **Universidade de São Paulo**

## **Instituto de Física**

**Física Aplicada**  
**Aula 18**

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**

**Edifício Oscar Sala – sala 220**

[rizzutto@if.usp.br](mailto:rizzutto@if.usp.br)

<http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=24279>

**2º Semestre de 2016**

# Programa

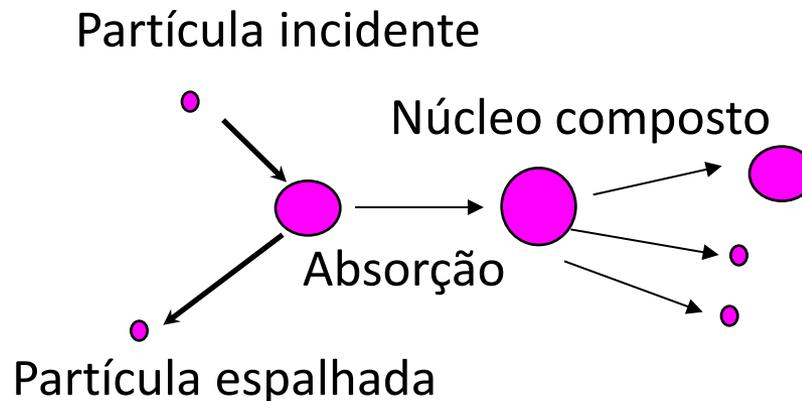
- O Espectro Eletromagnético
  - Dimensões dos objetos
  - Produção de energia
- Revisão sobre ondas Mecânicas;
- Princípios de acústica - Efeito Doppler;
  - Imagens por Ultrassom
  - Levitação mecânica
- Revisão das Equações de Maxwell - Equação da onda eletromagnética
  - Ondas de rádio; TRC, LCD,
  - Estrutura atômica – Revisão de física moderna;
  - Efeito Fotoelétrico, Celulares solares, Modelo atômico
- Descrição dos princípios de geração dos Raios-X: Tubos de raios-X
  - Propriedades dos Raios-X – Difração, Absorção
  - Aplicações de raios X: e interação com a matéria
  - Imagens obtidas com Raios-X – Radiografia,
    - Fluorescência de raios X (XRF)
      - Tomografia.
      - Microscopia
  - Aceleradores de partículas e radiação Síncrotron
  - Uso de aceleradores para análise de materiais
    - Física Nuclear, Datação
      - Reatores

Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
agosto						
	Aula 1		Aula 2			
	Aula 3		Aula 4			
	Aula 5		Aula 6			
	Aula 7		Aula 8			
setembro						
	SEMANA DA	DA	PÁTRIA			
	AULA 9		não AULA			
	não AULA		não AULA			
	Aula 10		Aula 11/AP1			
outubro						
	Aula 12/AP2		Aula 13/AP3			
SEMANA Física	Aula 14		Período			
	Aula 15/AP4		Aula 16/AP5			
	Aula 17/AP6		Aula 18 /AP7			
	Aula 19/AP8					
novembro			Período			
	Aula 20		Aula 21			
	RECESSO	Período	não AULA			
	Aula 22		Aula 23			
	Aula 24		Aula 25			
dezembro						
	PROVA					

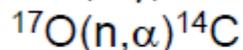
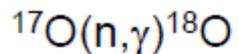
# Calendário

# Do átomo para o núcleo

## Reações Nucleares



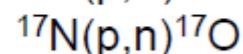
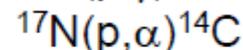
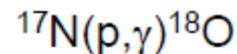
**O decaimento do núcleo composto é por emissão de partículas ou radiação (gama) até o estado fundamental ou se quebra emitindo partículas leves (alfas) e resultando em um outro núcleo**



capture reaction

transfer reaction

charge exchange

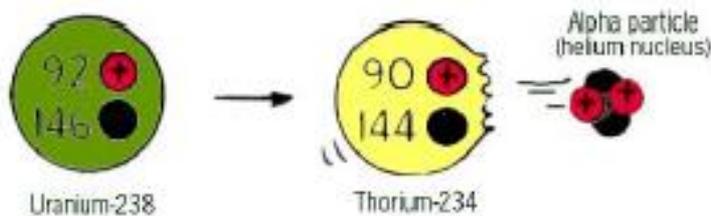


# Do átomo para o núcleo

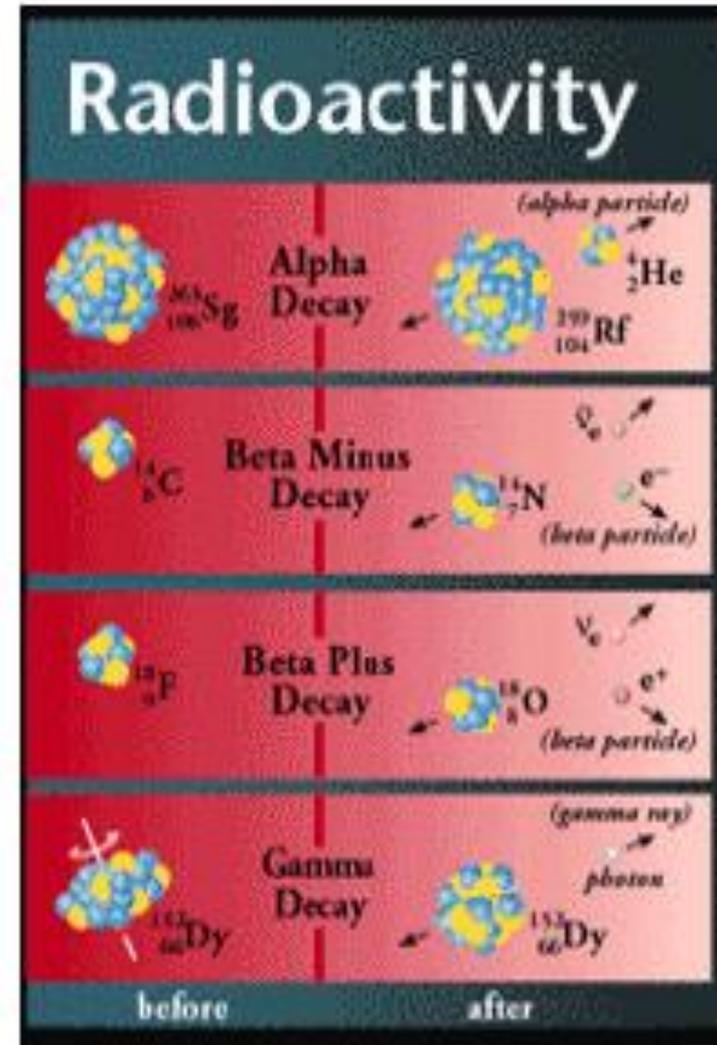
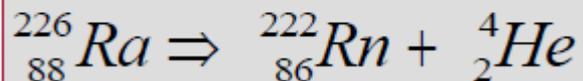
## Decaimento Nuclear

O decaimento do núcleo composto pode ocorrer por vários processos: por emissão de partículas ou radiação (gama) até o estado fundamental

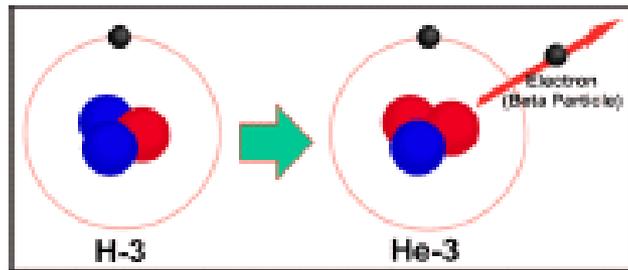
### Decaimento alfa



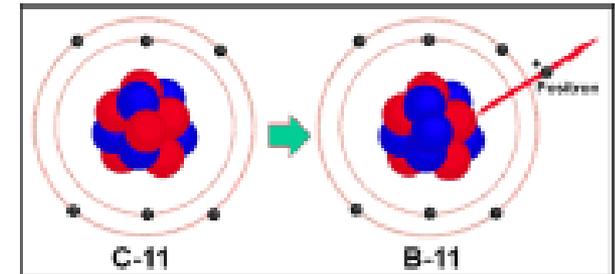
Alpha particle  $\alpha = {}^4\text{He}$



# Decaimento beta ( $\beta$ )



Núcleo decai espontaneamente por emissão de um elétron + antineutrino ou pósitron + neutrino



Para entender este decaimento precisamos definir as seguintes transformações:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad n = \text{nêutron}; p = \text{próton}; e^- = \text{elétron};$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \quad \bar{\nu} = \text{antineutrino}; e^+ = \text{pósitron}; \nu = \text{neutrino}.$$

**Neutrino/antineutrino:** partícula sem carga e quase sem massa, de tal modo que sua interação com a matéria é muito pequena, tendo um alto grau de penetração, por isto sua detecção é muito difícil.

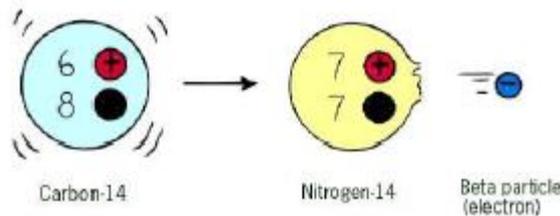
**IMPORTANTE:**  $e^-$  ou  $e^+$  emitidos no decaimento  $\beta$  não existem no interior do núcleo, mas são criados no processo de desintegração, assim como os fótons são criados no processo de emissão!

# Do átomo para o núcleo

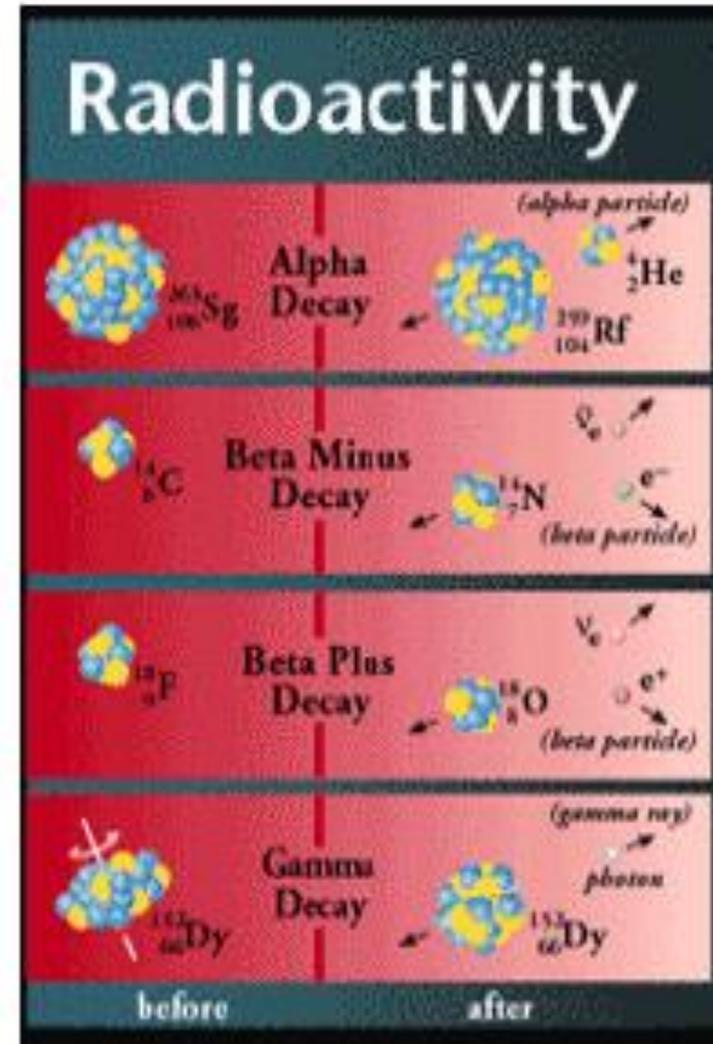
## Decaimento Nuclear

O decaimento do núcleo composto pode ocorrer por vários processos: por emissão de partículas ou radiação (gama) até o estado fundamental

### Decaimento beta



O decaimento beta ( $\beta$ ) é a emissão de um elétron ( $e^-$ ) ou um pósitron ( $e^+$ ) para converter nêutron em próton ou próton em nêutron dentro do núcleo

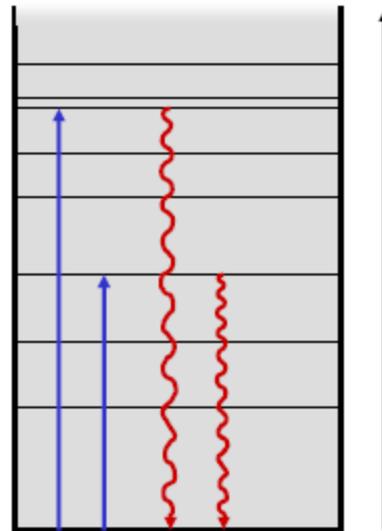
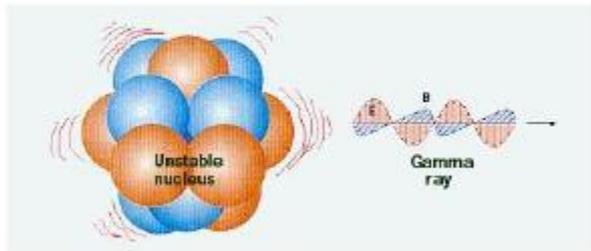


# Do átomo para o núcleo

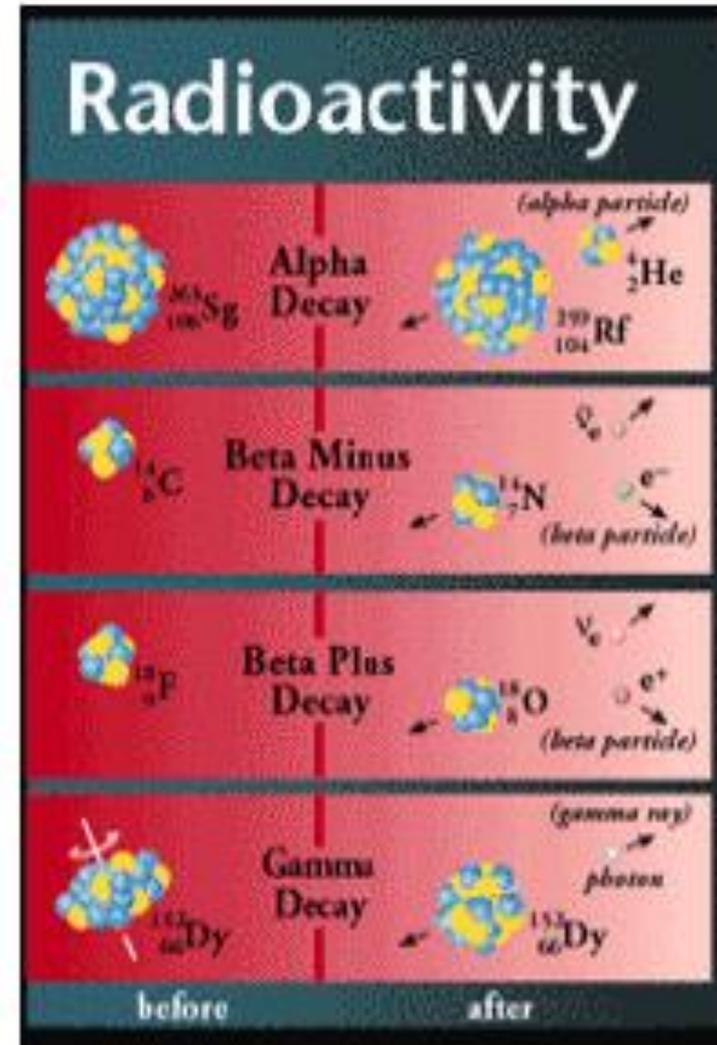
## Decaimento Nuclear

O decaimento do núcleo composto pode ocorrer por vários processos: por emissão de partículas ou radiação (gama) até o estado fundamental

### Decaimento gama



O decaimento gama ( $\gamma$ ) é a emissão de radiação indo o núcleo do estado excitado para o estado fundamental



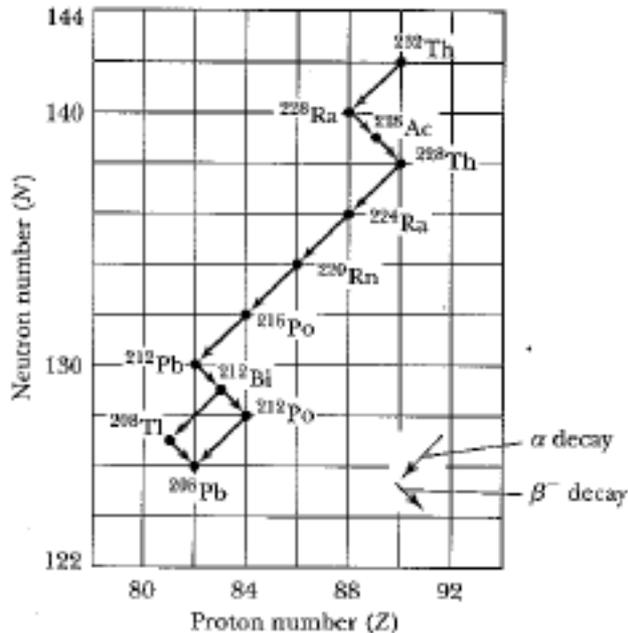
# Resumidamente

**Decaimento  $\alpha$**        $Q = E = [M({}_Z^A X) - M({}_{Z-2}^{A-4} D) - M({}_2^4 He)]c^2$

**Decaimento  $\beta^-$ : emissão  $\beta^-$**        $Q = E = M({}_Z^A X)c^2 - M({}_{Z+1}^A D)c^2$   
 nêutron se transforma em um próton

**Decaimento  $\beta^+$ : emissão  $\beta^+$**        $Q = E = M({}_Z^A X)c^2 - M({}_{Z-1}^A D)c^2 - 2m_e c^2$   
 próton se transforma em um nêutron

**Decaimento  $\beta^-$ : captura eletrônica**       $Q = E = [M({}_Z^A X) - M({}_{Z-1}^A D)]c^2$   
 próton no interior do núcleo absorve um elétron produzindo um nêutron



o número de massa só pode ser mudado por decaimento  $\alpha$ , mas ambos decaimentos  $\alpha$  e  $\beta$  podem mudar o número atômico  $Z$ .

# Lei de decaimento

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

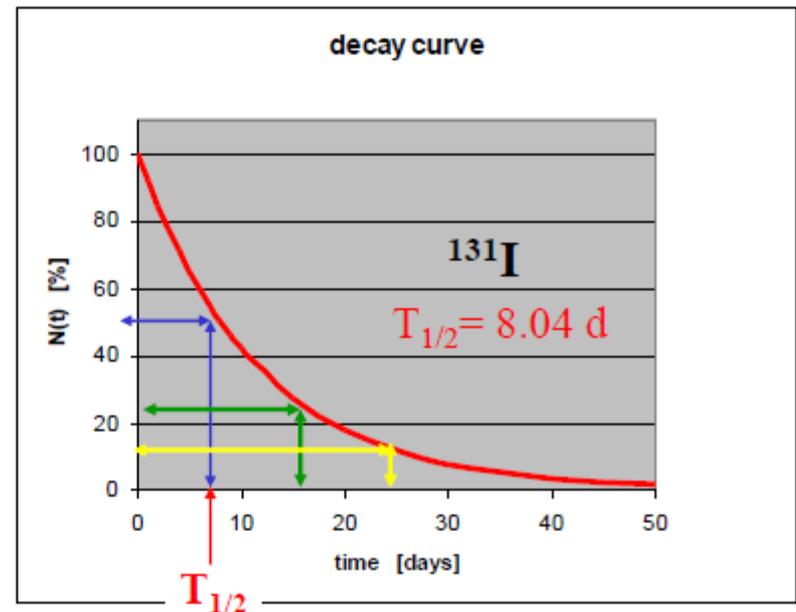
$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

$$N(t) = N(t_0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$\lambda$ : decay constant

time (days)	<sup>131</sup> I (%)
0	100.0000
1	91.7411
2	84.1642
3	77.2132
4	70.8362
5	64.9859
6	59.6188
7	54.6949
8	50.1777
9	46.0335
10	42.2317
15	27.4446
20	17.8351
25	11.5903
30	7.5321
40	3.1809
50	1.3434
60	0.5673
70	0.2396
80	0.1012
90	0.0427
100	0.0180

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$



# Lei de decaimento

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$\ln 2 = \lambda \cdot T_{1/2}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

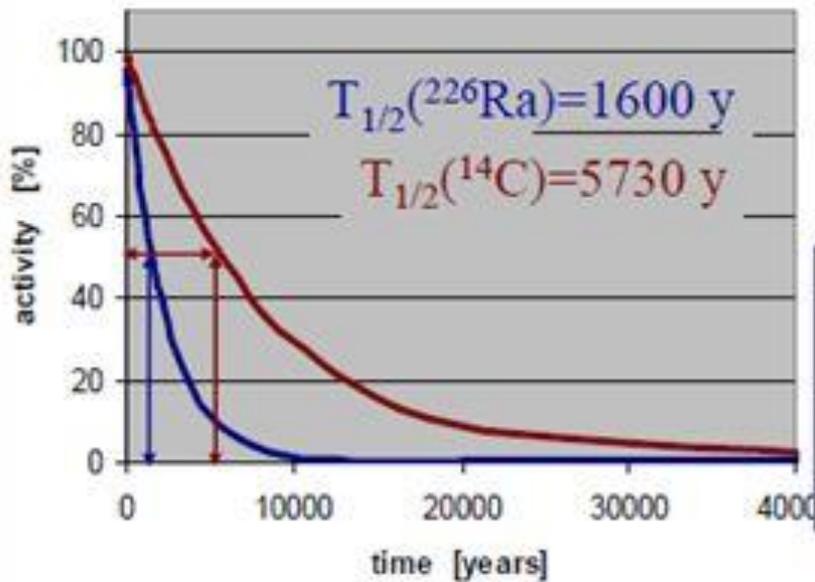
**A constante de decaimento  $\lambda$  é inversamente proporcional ao tempo de meia vida ( $T_{1/2}$ )**

**A meia vida de uma substância radioativa determina uma escala de tempo → relógio**

# Relógios radioativos

## Exemplo

dating isotopes



Se sua amostra possui 22920 anos (corresponde a 4 vidas medidas do  $^{14}\text{C}$ ). Originalmente haviam 1000 isótopos de  $^{14}\text{C}$ , quantos isótopos temos hoje?

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N(t) = 1000 e^{-\lambda 22920}$$

$$N(t) = 1000 e^{-2,773}$$

$$N(t) = 1000 * 0,0625$$

$$N(t) = 62,5$$

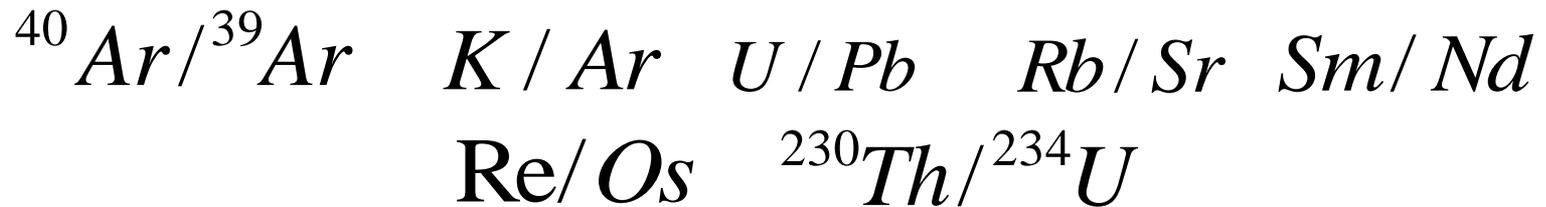
$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{5730} = 0,000121 \left( \frac{1}{\text{ano}} \right)$$

$$\lambda t = 0,000121 * 22920 = 2,773$$

- Datação Absoluta

- Análises físicas

- métodos de datação baseados em quantidade de isótopos radioativos e seus derivados



- Séries do U,  ${}^{14}\text{C}$

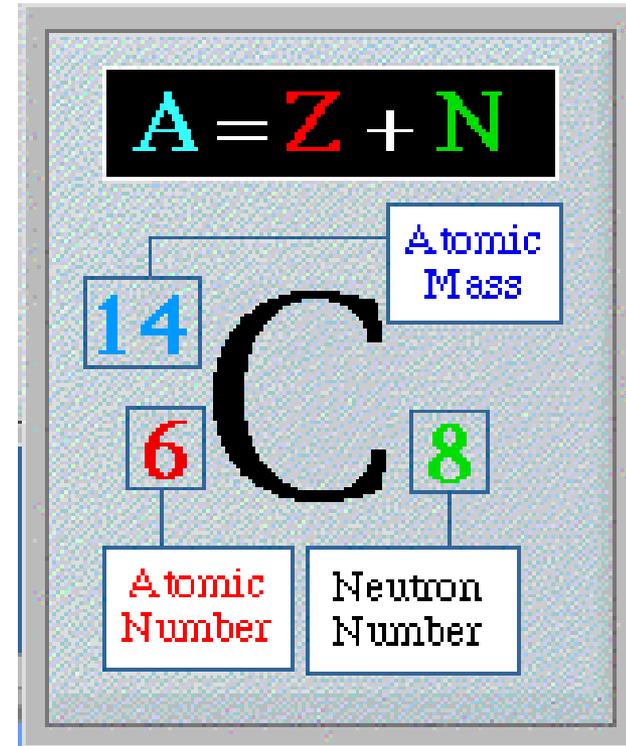
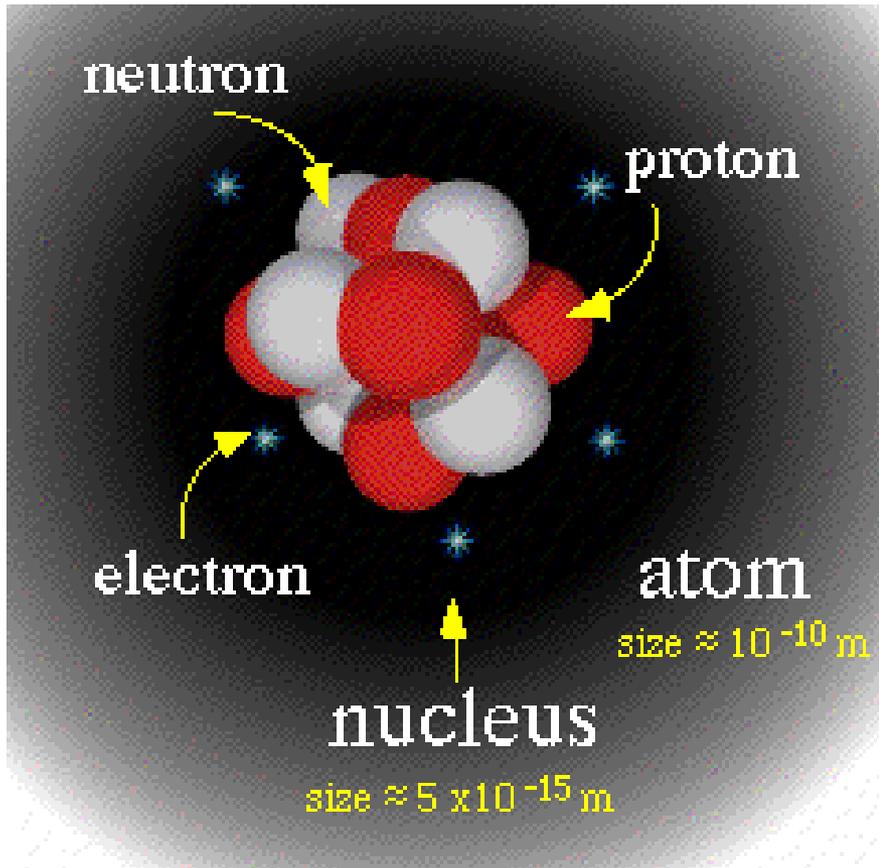
- Análises Geo-Físicas

- métodos baseados em danos de radiação cumulativos causados no material geológico (Traços de Fissão, Termoluminescência, Ressonância paramagnética)

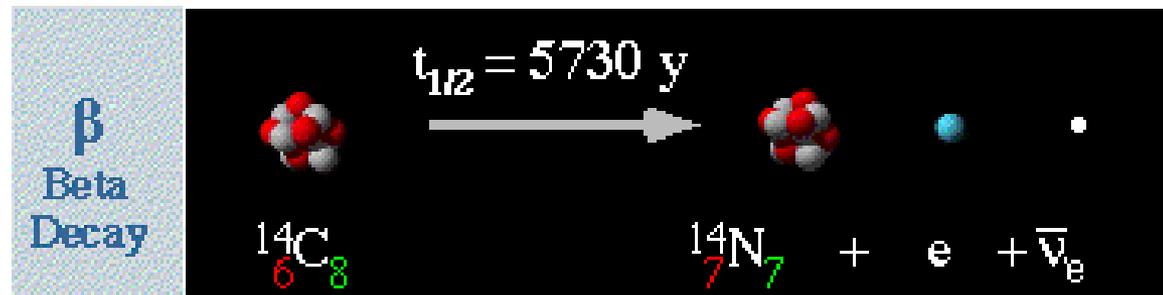
# O Núcleo Atômico

Isótopos - mesmo elemento

Isóbaros - mesma massa



$^{12}\text{C}$  (98.9%)  
 $^{13}\text{C}$  (1.1%)  
 $^{14}\text{C}$  radioactive



# Datação Absoluta

- Isótopos radioativos e seus derivados

Isótopo Pai	Meia Vida	Filho Estável
Urânio-235	704 Milhões de anos	Chumbo-207
Potássio-40	1.25 Bilhões de anos	Argônio-40
Urânio-238	4.5 Bilhões de anos	Chumbo-206
Tório-232	14.0 Bilhões de anos	Chumbo-208
Lutécio-176	35.9 Bilhões de anos	Háfnio-176
Rubídio-87	48.8 Bilhões de anos	Estrôncio-87
Samário-147	106 Bilhões de anos	Neodímio-143

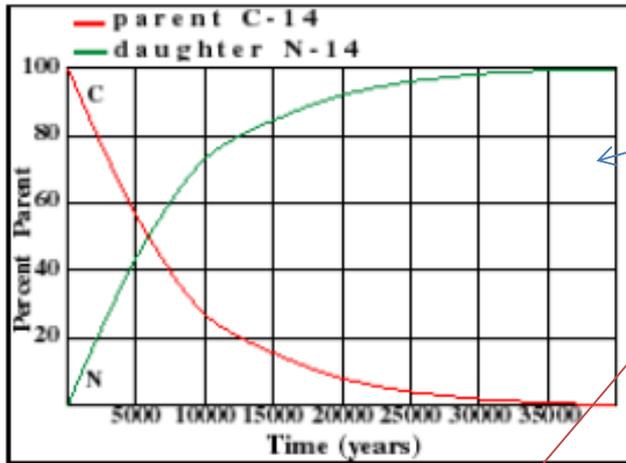
Espectrometria de massa

Convencional

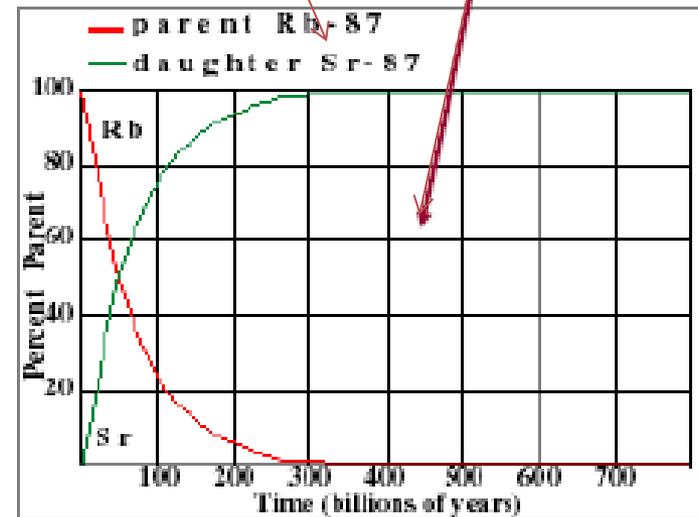
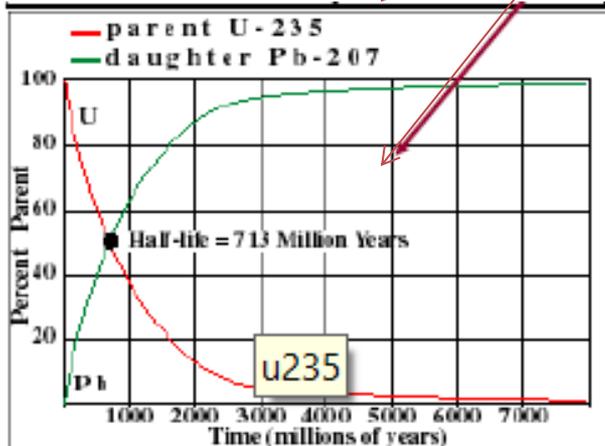
Aceleradores (AMS)

Decaimento Radioativo

# $t_{1/2}$ determinar o intervalo de aplicação



Área	intervalo (anos)
História	2000
Archaeologia	10000 = 10k
Antropologia	100k
Evolução	10M
Geologia	100M
Planetologia	5G
Cosmologia	10G



# MÉTODO DE DATAÇÃO COM RADIOCARBONO

- ▶ A datação com carbono é a mais frequente técnica usada.
- ▶ Esta técnica mede a quantidade de  $^{14}\text{C}$  presente em uma amostra  $N(t)$
- ▶ E compara esta quantidade com o valor da razão na amostra  $N_0$

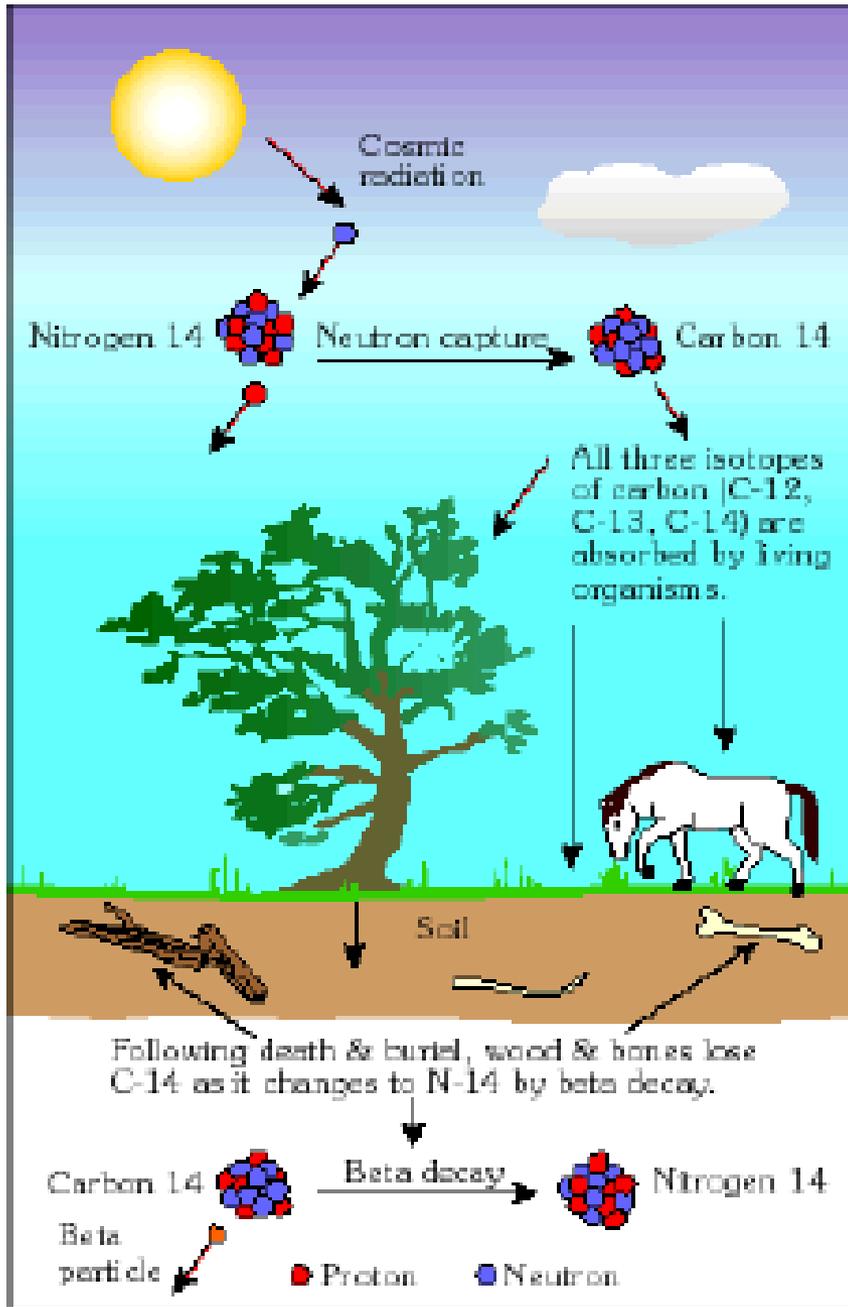
$$R = \frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}$$

- ▶ Esta comparação dá a idade da amostra ( $t$ )

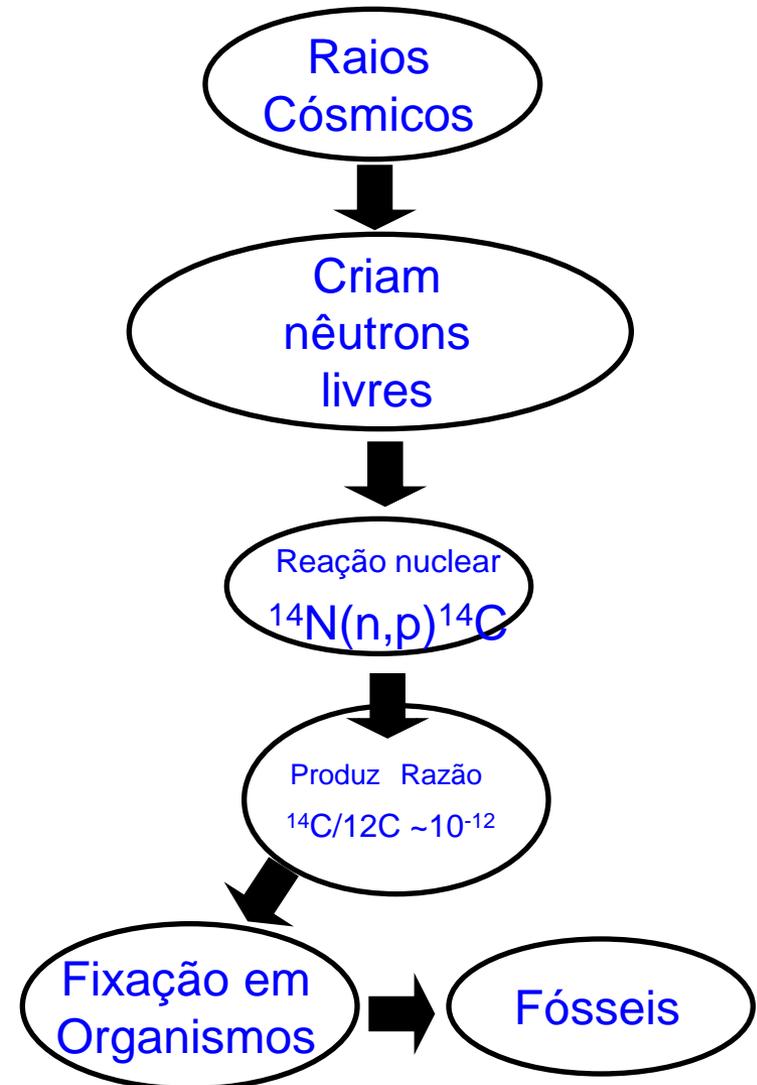
$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{N_0}{N(t)}\right) = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{N(^{14}\text{C})_{t=0}}{N(^{14}\text{C})_{t=t}}\right)$$

- ▶ Com  $N_0 = N(^{14}\text{C})_{t=0} = RN(^{12}\text{C})$

$$R = \frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C})}$$



# O PROCESSO DE FIXAÇÃO DO $^{14}\text{C}$



## • *Princípio da Datação por $^{14}\text{C}$*

Um organismo vivo, devido à contínua troca de carbono com o meio ambiente, atinge no equilíbrio, uma atividade específica de  $^{14}\text{C}$  igual a existente na atmosfera. Com sua morte, essa troca de carbono cessa, e sua atividade específica decresce com a meia vida do radiocarbono.

# Datação por $^{14}\text{C}$

- *Breve Histórico*

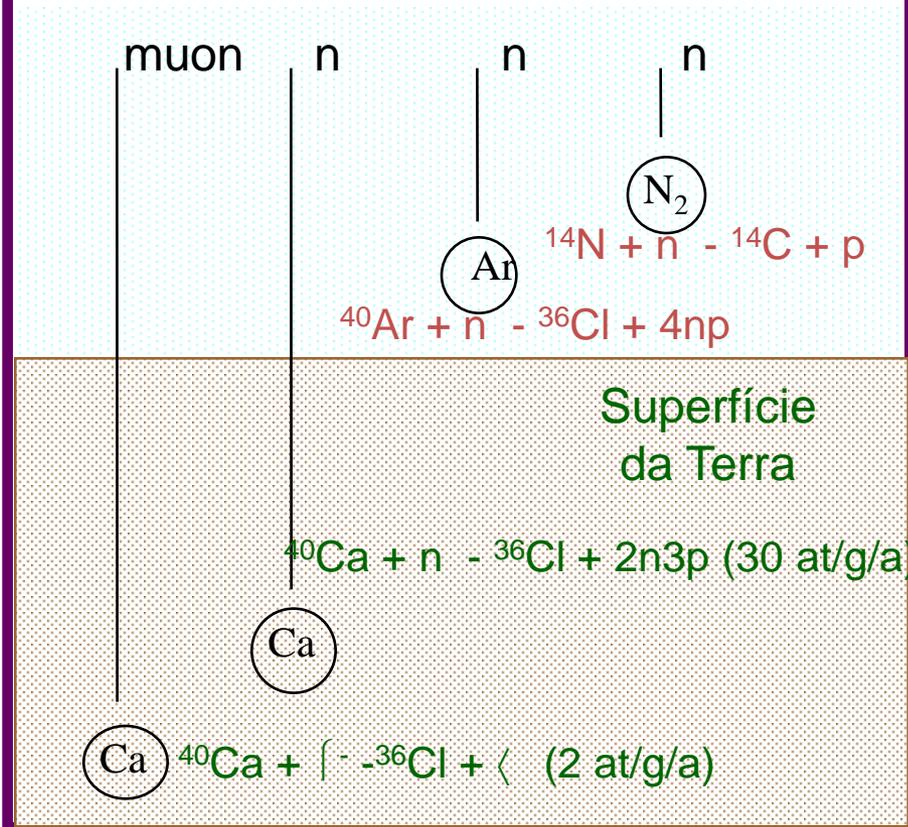
Introduzido em **1947** - E.C. Anderson e W.F. Libby

- **1947**, amostra sólida - *Geiger Müller*

- **1953**, amostras em gas. - *Geiger Müller*

- tb em **1953**, amostras líquido - *Espectrometria de Cintil. Líquida Orgânica.* ( *p-terfenil dissolv. em benzeno, acetileno dissolv. em tolueno, álcoois metílico e etílico e benzeno* )

## Raios C3smicos Prim3rios



Produção de is3topos

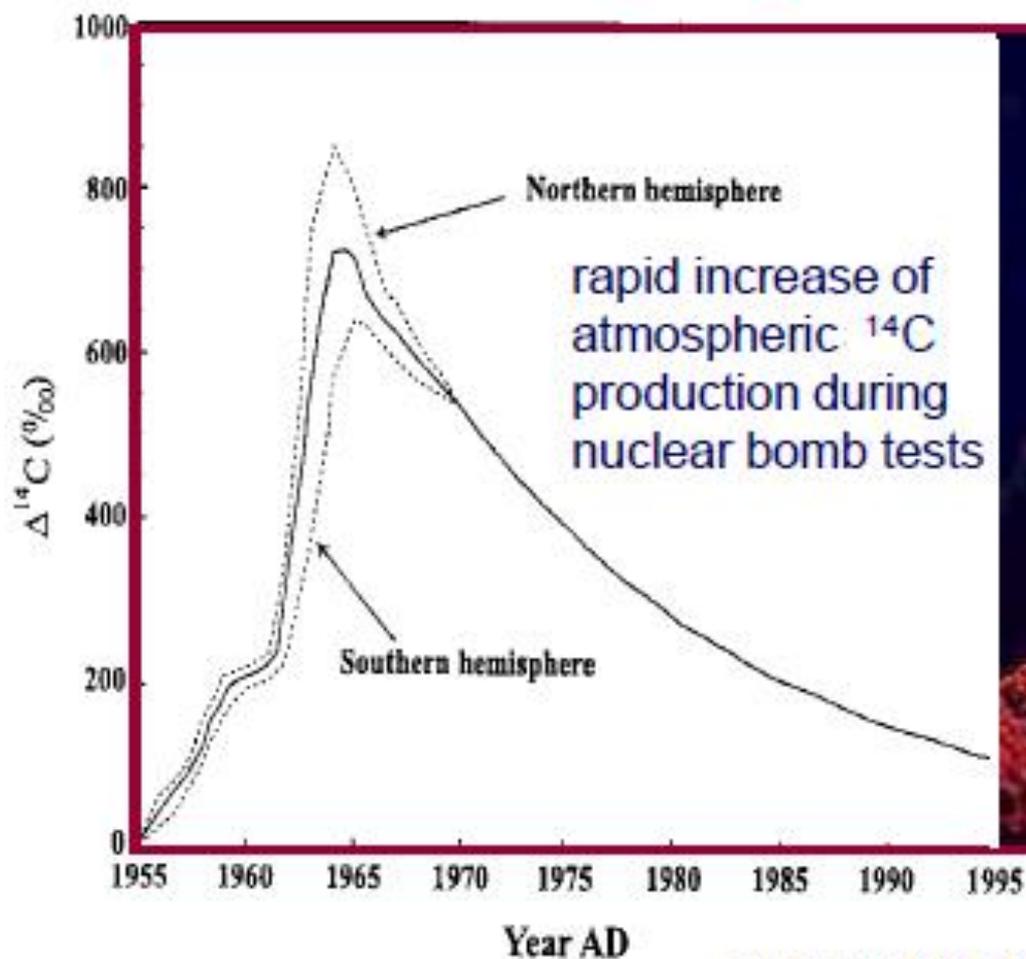
Cosmog3nicos

Interaç3o de raios c3smicos na atmosfera e rochas na superf3cie terrestre

Antropog3nicos

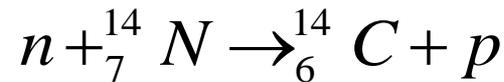
Reatores e artefatos nucleares

# Anthropogenic Sources



e.g. "Fluctuations of Atmospheric Carbon-14 Concentrations During the Past Century", M. S. Baxter and A. Walton; Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 321, 1971, 105-127

O  $^{14}\text{C}$  radioativo é produzido em nossa atmosfera pelo bombardeamento do  $^{14}\text{N}$  por nêutrons produzidos por raios cósmicos:



## Datação Radioativa com Carbono 14

$^{14}\text{C}$  – decaimento  $\beta^-$



Exemplo:

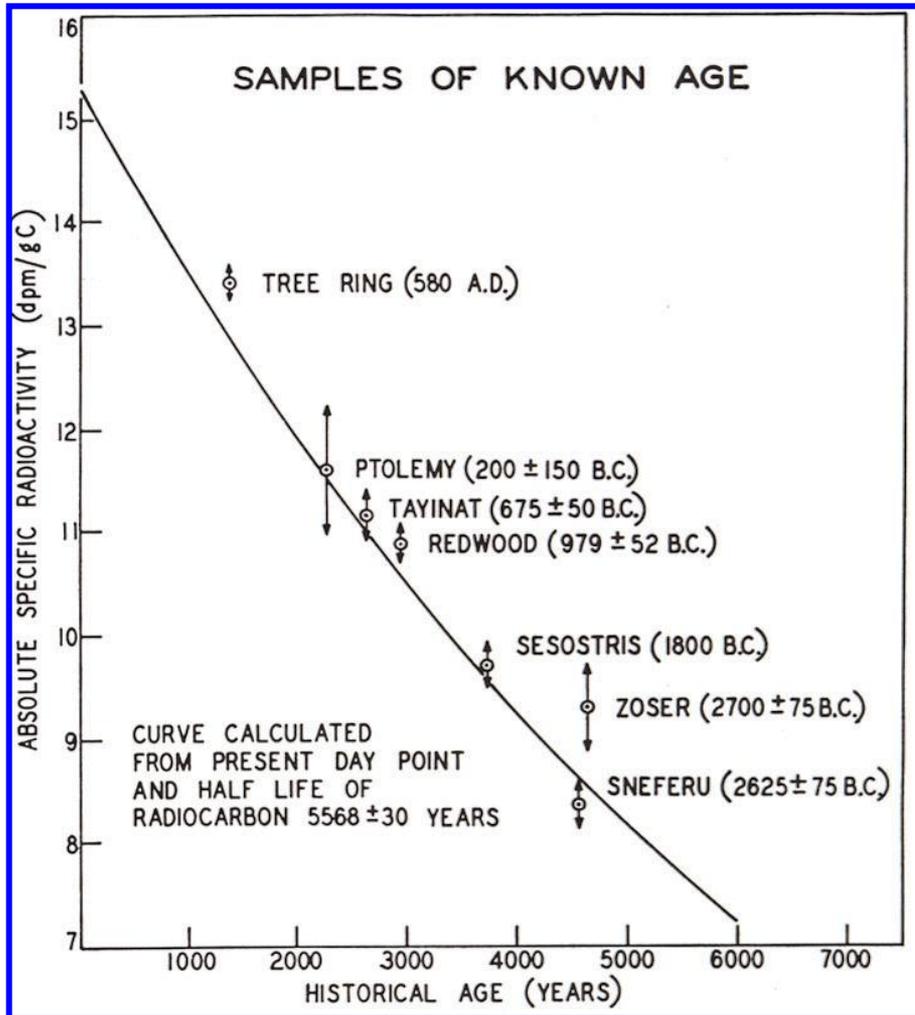
Restos de carvão foram encontrados num sítio arqueológico e mediu-se a radioatividade deste “material morto”: para 1 kg deste material, a taxa de decaimento do  $^{14}\text{C}$  foi de  $9,4 \times 10^2$  decaimentos/segundo. Sabe-se que para um “material vivo” esta taxa é de  $1,5 \times 10^4$  decaimentos/segundo. Com estes dados determinar a idade do material encontrado.

$$\left. \begin{array}{l} \text{“material morto”}: R = 9,4 \times 10^2 \text{ decaimentos/segundo} \\ \text{“material vivo”}: R_0 = 1,5 \times 10^4 \text{ decaimentos/segundo} \end{array} \right\} \begin{array}{l} R = R_0 e^{-\lambda t} \quad \ln \frac{R}{R_0} = -\lambda t \\ t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{R}{R_0} \end{array}$$

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{R}{R_0} = -\frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{R}{R_0}$$

**Resposta:  $t = 2,3 \times 10^4$  anos**

# Datação por $^{14}\text{C}$



Primeiro teste do modelo, medindo árvores, por Libby (1952)

Contabilizar o número de átomos de  $^{14}\text{C}$

Métodos:

Decaimento Radioativo  
Espectroscopia com cintiladores líquidos (LSC)  
Contadores proporcional gasoso (GPC)

Contagem direta de átomos  
LSC e GPC medida da atividade do  $^{14}\text{C}$  com detectores cintiladores ou proporcional para medir a energia da radiação beta

AMS – Espetroscopia de Massa com Aceleradores, medida do número de átomos de  $^{14}\text{C}$  de amostras pequenas

# Tamanho das amostras

Material	Conventional (g)	Mini-counting (g)	AMS (mg)
Wood (whole)	10-25	0.1-0.5	50-100
(cellulose)	50-100	0.5-1.0	200-500
Charcoal (& other charred materials)	10-20	0.1-0.5	10-100
Peat	50-100	0.5-1.0	100-200
Textiles	20-50	0.05-0.10	20-50
Bone	100-400	2.0-5.0	500-1000
Shell	50-100	0.5-1.0	50-100
Sediment, soils	100-500	2.0-10.0	500-25 000

# Comparação datação tradicional de $^{14}\text{C}$ e AMS

In  $^{14}\text{C}$  dating you count  $^{14}\text{C}$  activity

With AMS you count  $^{14}\text{C}$  number

$$A(^{14}\text{C}) = \lambda \cdot N(^{14}\text{C})$$

$$N(^{14}\text{C}) \cdot \varepsilon$$

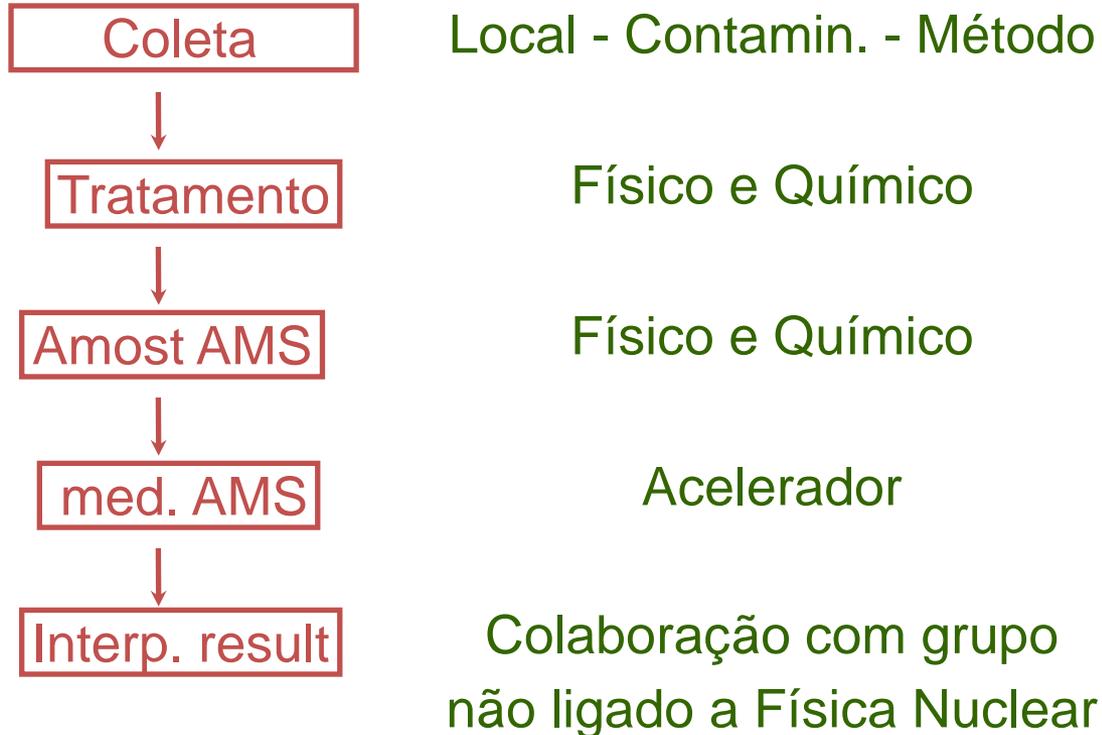
$$A(^{14}\text{C}) = \frac{\ln 2}{5730\text{y}} \cdot N(^{14}\text{C})$$

$$\varepsilon \approx 0.01 - 0.1$$

Decay constant  $\lambda$  versus efficiency  $\varepsilon$  of device including ionization in sources and transmission in accelerator.

AMS é uma técnica que necessita mais da parte experimental, mas é mais acurada e requerer menos quantidade de amostra

# Trabalho completo - AMS



- Tratamento amostras (sólidas)
  - Remoção de material extra a amostra e redução a carbono elementar
    - Pré-tratamento físico e químico
      - AAA (remoção de carbonatos)
      - Extração de colágeno gelatinoso (osso)
      - Hidrólise de carbonatos com  $\text{H}_3\text{PO}_4$
    - Oxidação para  $\text{CO}_2$ 
      - Combustão com  $\text{CuO}$  a  $900^\circ \text{C}$
      - Combustão em forno com analisadores elementares
    - Grafitização
      - Redução por  $\text{H}_2$  (catalizados por Fe ou Co) (processo lento)
      - Redução (Zn) com  $\text{TiH}$

- **Contaminação**

- Contaminação durante a coleta
  - Incorporação de material orgânico antigo
  - Incorporação de material orgânico novo
- Contaminação devido ao sítio
  - Infiltração de umidade
  - Penetração de raízes
  - Mistura com material espúrio
- Contaminação durante a preparação
  - Subtração de fundo (Branco)

# AMS para $^{14}\text{C}$

Troca de carga do feixe

Quebra Molecular  $^{12}\text{CH}_2$

$^{13}\text{CH}$

## Accelerator Mass Spectrometry (AMS)

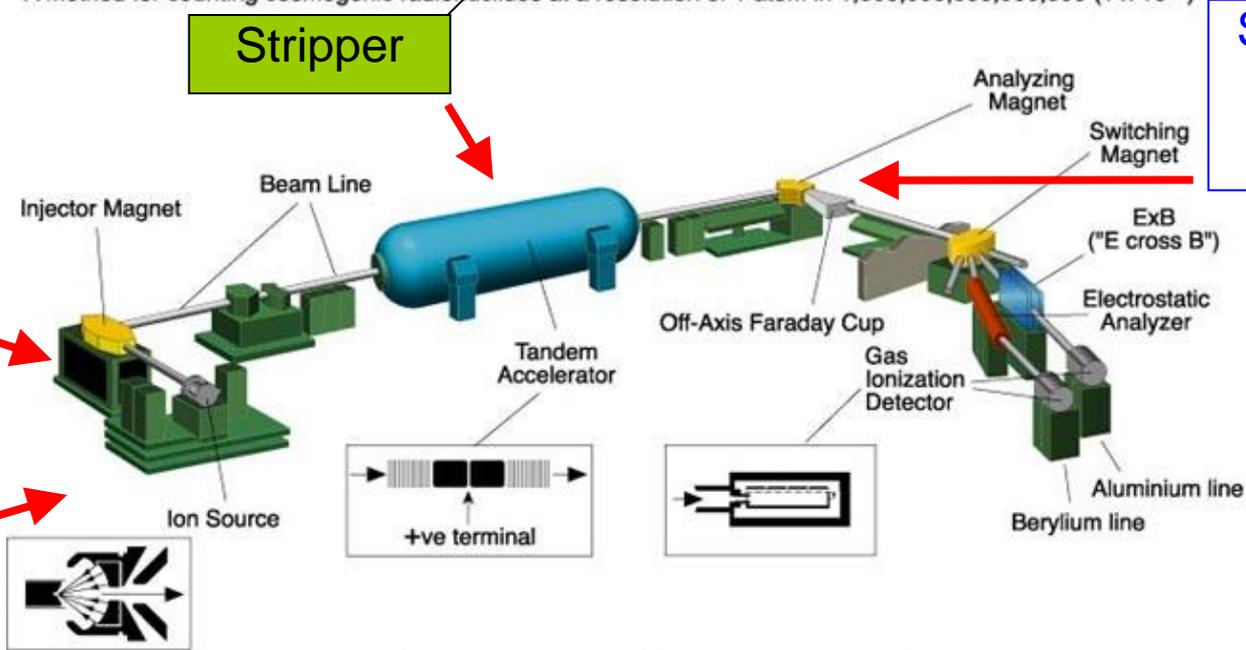
A method for counting cosmogenic radionuclides at a resolution of 1 atom in 1,000,000,000,000,000 ( $1 \times 10^{15}$ )

Stripper

Seletor de Massa e Energia

Seletor Massa 14

Fonte de Íons Negativos

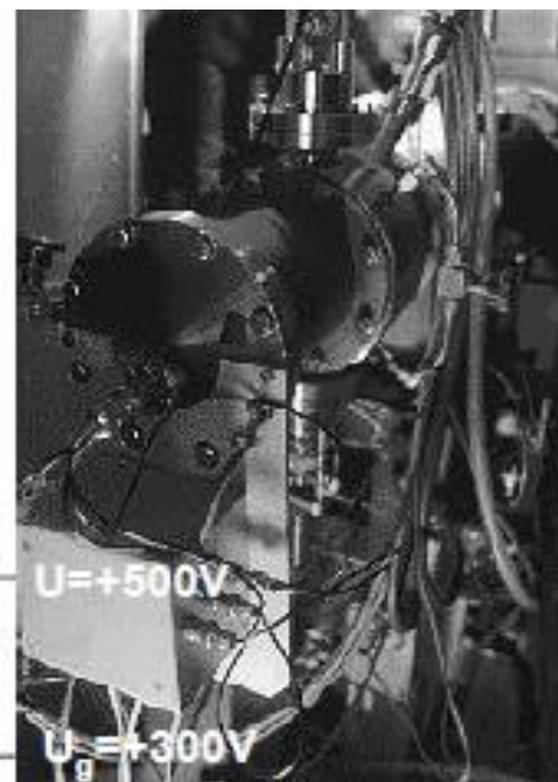
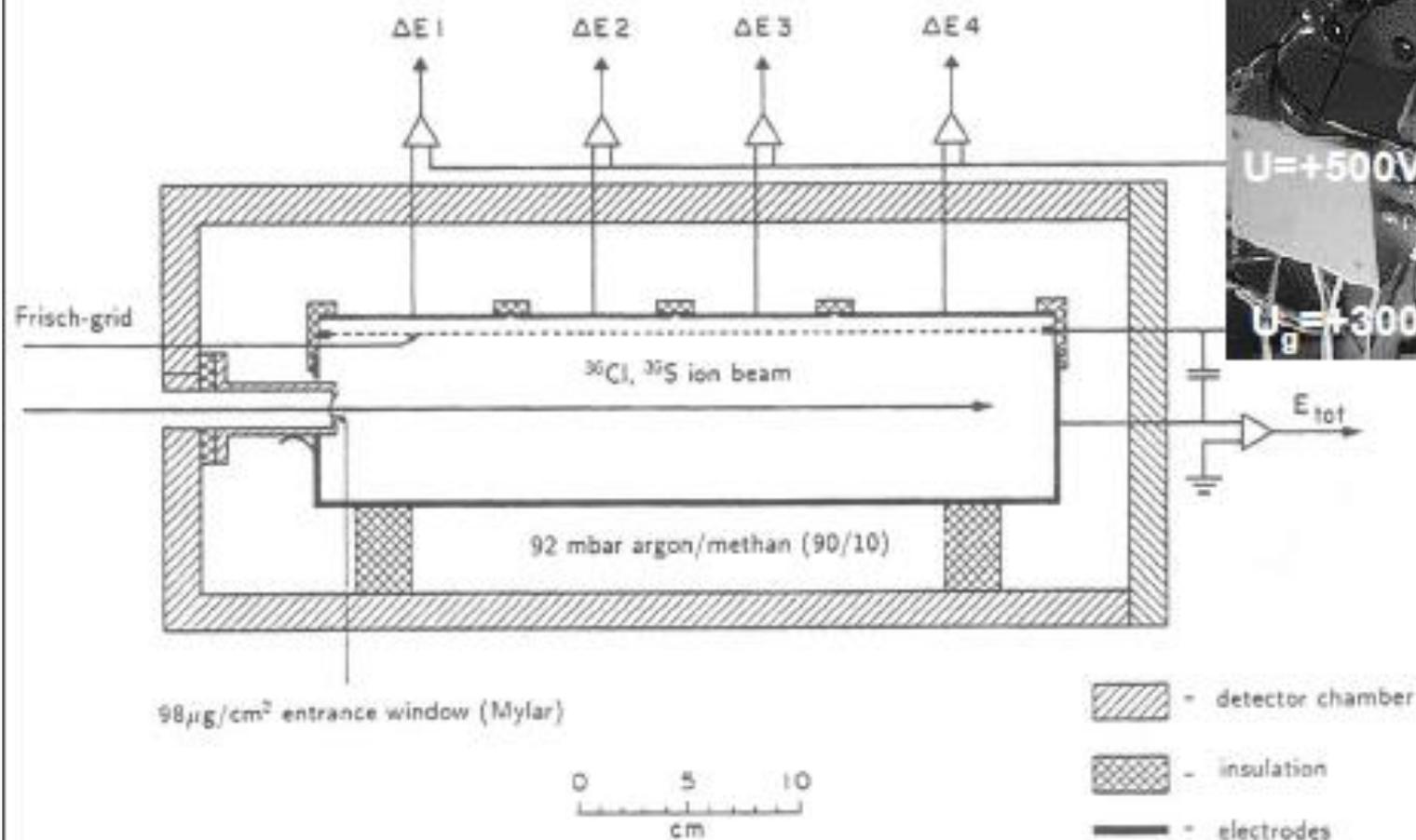


Cosmogenic radionuclides used in Earth Science applications measured by AMS with half-lives in years:

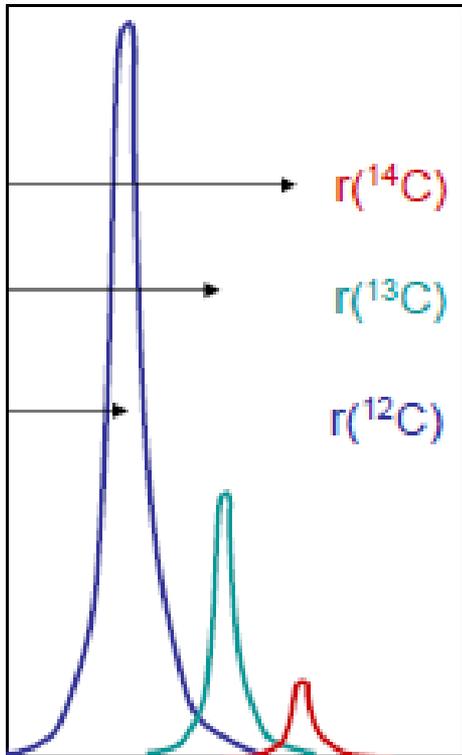
$^{14}\text{C}$  (5730)    $^{41}\text{Ca}$  (100,000)    $^{36}\text{Cl}$  (301,000)    $^{26}\text{Al}$  (705,000)    $^{10}\text{Be}$  (1,510,000)

# $\Delta E$ -E gas-counter system

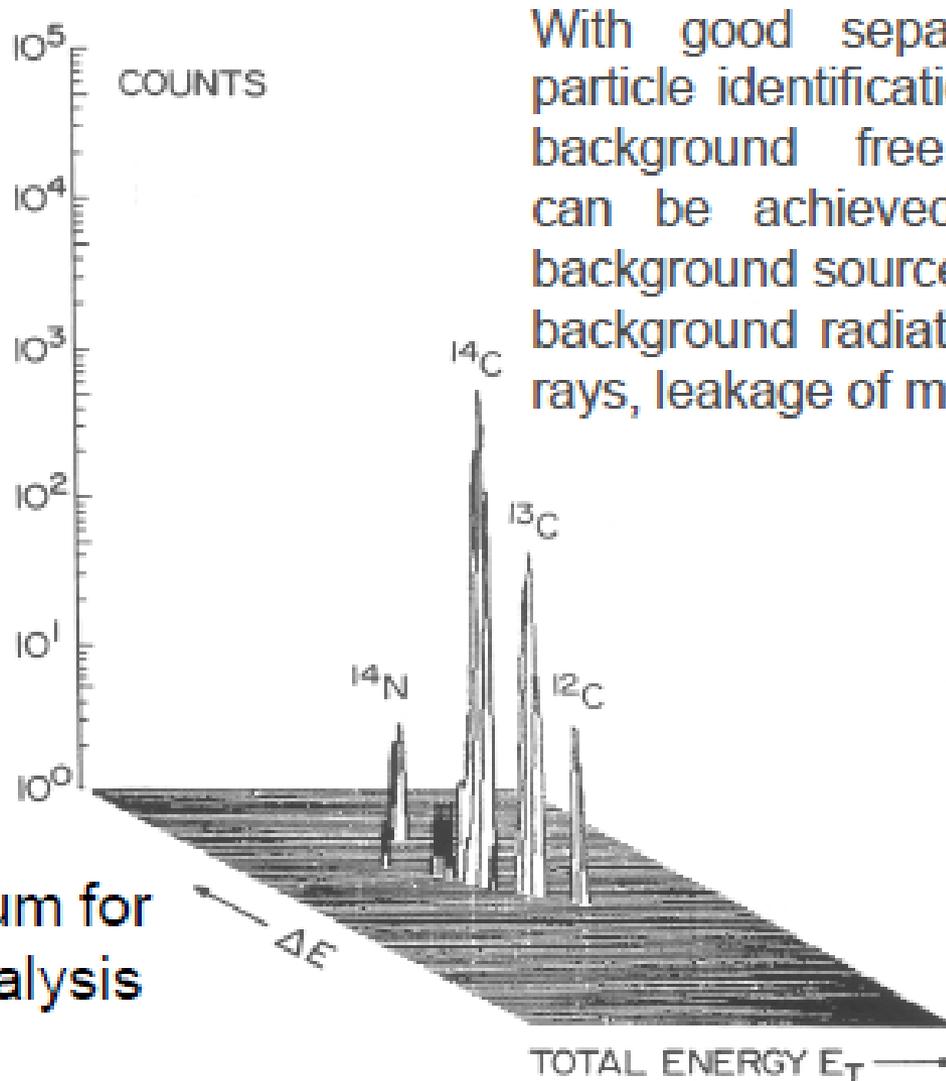
is based on measurement of energy loss and total energy of incoming ions in gas.



# separation and identification



Two-dimensional gas counter spectrum for radiocarbon  $^{14}\text{C}$  analysis



With good separation and particle identification a nearly background free spectrum can be achieved. Potential background sources are room background radiation, cosmic rays, leakage of molecules.

# Aplicações de AMS

- As análises por Espectroscopia de Massa com Aceleradores (AMS) é um campo de pesquisa que está crescendo devido ao aumento da eficiência e da acurácia da datação de radiocarbonos.
- Esta técnica pode ser aplicada em estudos de geologia, hidrologia, oceanografia, climatografia e ambientais.
- Atualmente a técnica AMS também está sendo utilizada com outros radioisótopos para

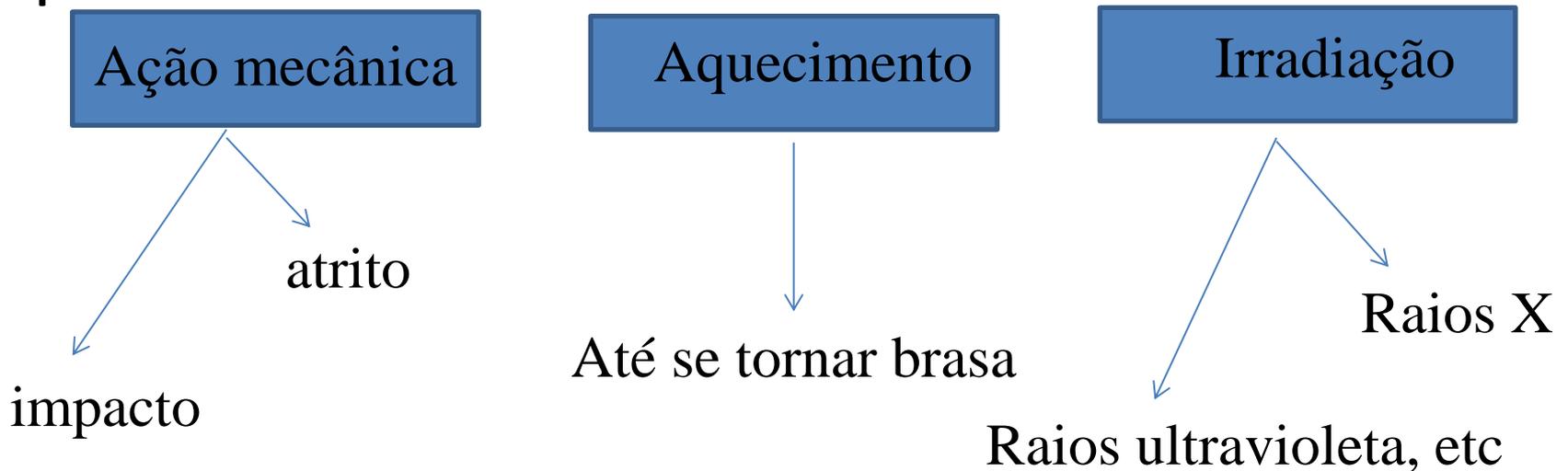
# Termoluminescência

<http://www.comciencia.br/reportagens/arqueologia/arq06.shtml>

- Para se determinar a idade de objetos com mais de 50 mil anos ou cuja idade não tenha relação com compostos orgânicos (como vasos de cerâmica), usam-se outros métodos. Uma técnica bem mais barata que a do carbono-14 e que vem sendo cada vez mais usada no mundo todo é a da termoluminescência (TL).
- Esse método mede os pequeninos defeitos que aparecem no material de que é feita a amostra, decorrentes da radiação a que ele está submetido: radiação cósmica, radiação do ambiente ao redor da amostra ou do próprio material de que ela é feita.
  - Quando a radiação reage com a amostra, são liberados alguns elétrons das suas moléculas. Alguns desses elétrons são aprisionados em defeitos no material da amostra. Algumas moléculas, portanto, não recebem seus elétrons de volta e ficam ionizadas (carregadas eletricamente).

# LUMINESCÊNCIA

- Alguns minerais apresentam propriedades de emissão de luz quando submetidos a alguns processos como:



# LUMINESCÊNCIA

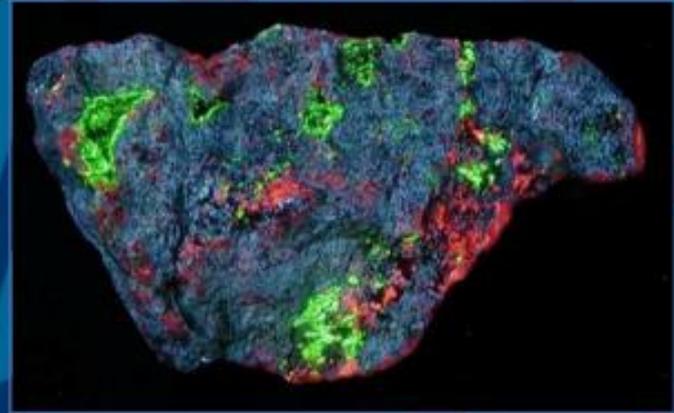
- As cores de luminescência são marcadamente diferentes daqueles dos minerais quando não excitados

Antes – irradiação ultravioleta



Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e Willemita ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ )

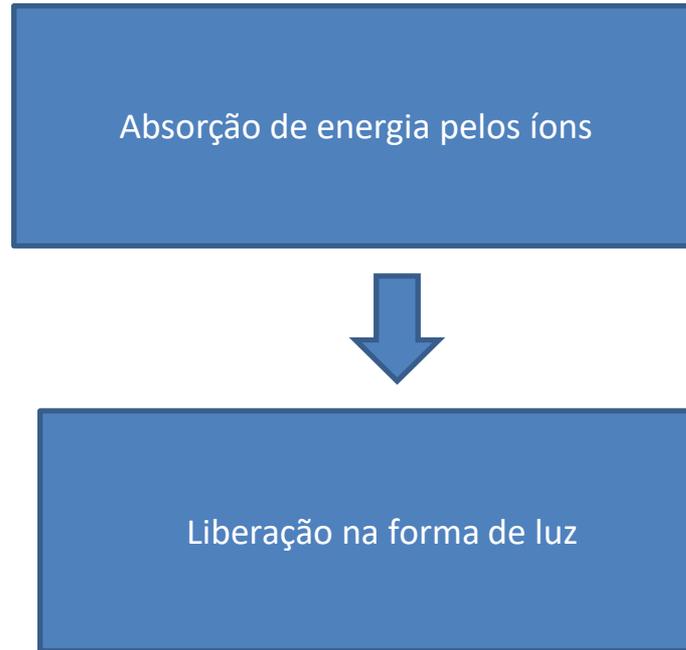
Durante - irradiação ultravioleta



Calcita (laranja) e Willemita (verde)

# Produção da LUMINESCÊNCIA

- A luminescência nos minerais é fraca e geralmente só pode ser observada em ambientes



Os minerais absorvem uma forma de energia e a reemitem com luz visível

# Produção da LUMINESCÊNCIA

- Esta luminescência nos minerais esta relacionada a alterações presentes na rede cristalina que podem ser devido:

Defeitos na rede

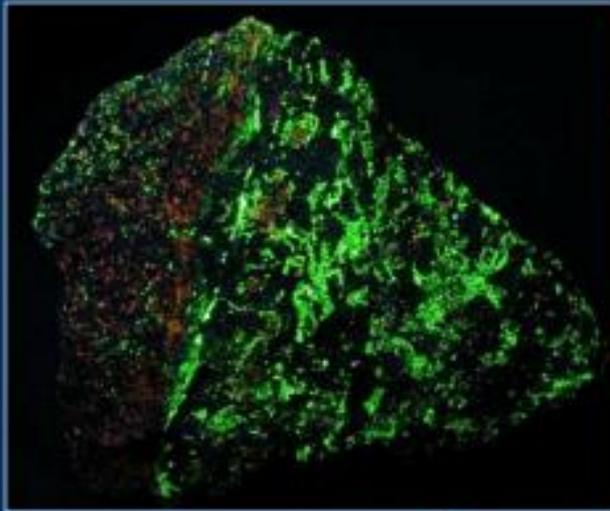
ou

Presença de íons ativadores (estranhos)

Íons ativadores podem  
substituir elementos principais  
na estrutura cristalina



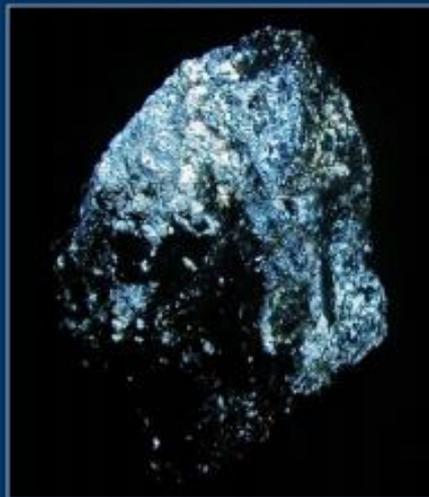
Willemita ( $Zn_2SiO_4$ )  $\Leftrightarrow$  íon ativador  $Mn^{2+}$   $\Leftrightarrow$  substitui o  $Zn^{2+}$



Isto explica o fato de que a willemita de Franklin, New Jersey (EUA), apresenta fluorescência.

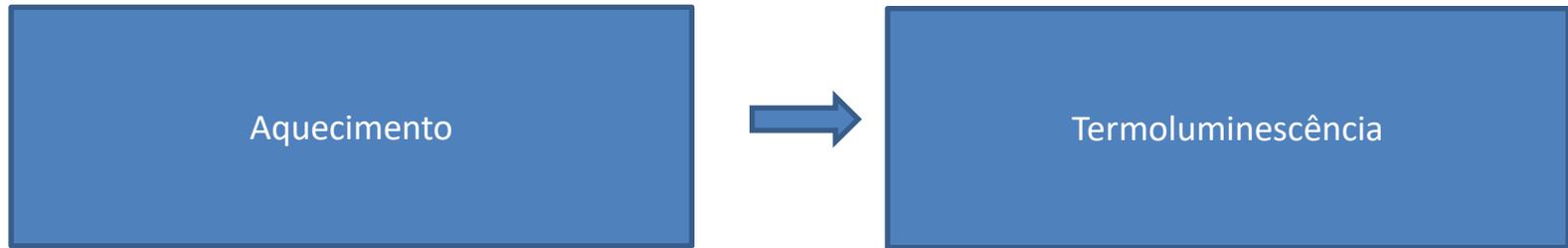
As willemitas de outras localidades que não apresentam **Manganês**, não mostram este fenômeno.

Scheelita ( $CaWO_4$ )  $\Leftrightarrow$  os íons ativadores:



- $Pb^{2+}$   $\Leftrightarrow$  substitui o  $Ca^{2+}$
- $Mo^{6+}$   $\Leftrightarrow$  substitui o  $W^{6+}$

# Produção da LUMINESCÊNCIA



Propriedade de alguns minerais que se tornam luminescentes por aquecimento

Quando se aquece um mineral termoluminescente a luz visível inicial geralmente:

- Surge – temperatura entre 50º e 100º C
- Cessa – normalmente a temperaturas superiores a 475º C

# Termoluminescência

- A termoluminescência refere-se à luz emitida por materiais cristalinos ou vítreos quando aquecidos por uma fonte de calor.
- O processo envolve, a ionização dos átomos e moléculas de um mineral por radiações (alfa, beta e gama) provenientes de isótopos de elementos naturais como  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ .
- Os sedimentos argilosos, por exemplo, contém 2 a 6 ppm de U, 8 a 20 ppm de Th e 2 a 8% de K (a concentração do isótopo  $^{40}\text{K}$  presente no potássio natural é de 0,0119%).
- Os elétrons livres produzidos pela ionização circulam pela estrutura do mineral, até serem capturados por defeitos (ou armadilhas) existentes na rede cristalina e, então, podem permanecer aprisionados por centenas, milhares e até milhões de anos.

# Termoluminescência

- Quando o mineral é aquecido ou exposto à luz solar, os elétrons retidos absorvem energia suficiente para escaparem das armadilhas e retornarem aos átomos aos quais estavam ligados. Este processo de reorganização é acompanhado por emissão de luz denominada de **termoluminescência**.
- A intensidade da luz emitida, ou o número de fótons produzido, pode ser medida sendo proporcional ao número de elétrons aprisionado que, por sua vez, é proporcional à dose total de radiação ionizante recebida pelo mineral.

# Termoluminescência

- O sinal TL de um mineral é destruído quando aquecido a altas temperaturas (acima de  $300^{\circ}$  C), exposto à luz solar ou ainda quando ocorre a sua recristalização. De modo que, após terem sido cozidos na confecção de utensílios cerâmicos, por exemplo, os minerais constituintes ficam isentos de sinal TL e inicia-se um processo de irradiação natural, com retenção de dose proporcional ao tempo de permanência no subsolo. A idade TL é calculada a partir da dose total ( $D_t$ ) ou paleodose e a dose anual ( $D_a$ ) pela relação:
  - $TL = D_t / D_a$
- Assim, a intensidade da termoluminescência fornece o tempo transcorrido desde que ela foi aquecida pela última vez. Com isso, pode-se datar objetos de até 1 milhão de anos, com precisão de até 10%.

# Termoluminescência

- Esse método foi introduzido no Brasil no final da década de 60 por Shigueo Watanabe, do Instituto de Física da USP. Sua equipe fez um estudo sobre fragmentos de vasos e urnas funerárias encontradas no interior do estado de São Paulo. Sua pesquisa estava inserida no Projeto Paranapanema, idealizado em 1968 pela arqueóloga Luciana Pallestini, cujo objetivo era o estudo do cenário da ocupação humana na bacia do Rio Paranapanema (São Paulo e Paraná), em nível físico, biológico e sócio-econômico.