

# **Universidade de São Paulo**

## **Instituto de Física**

### **Física Aplicada**

### **Aula 17**

**Profa. Márcia de Almeida Rizzutto**

Edifício Oscar Sala – sala 220

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

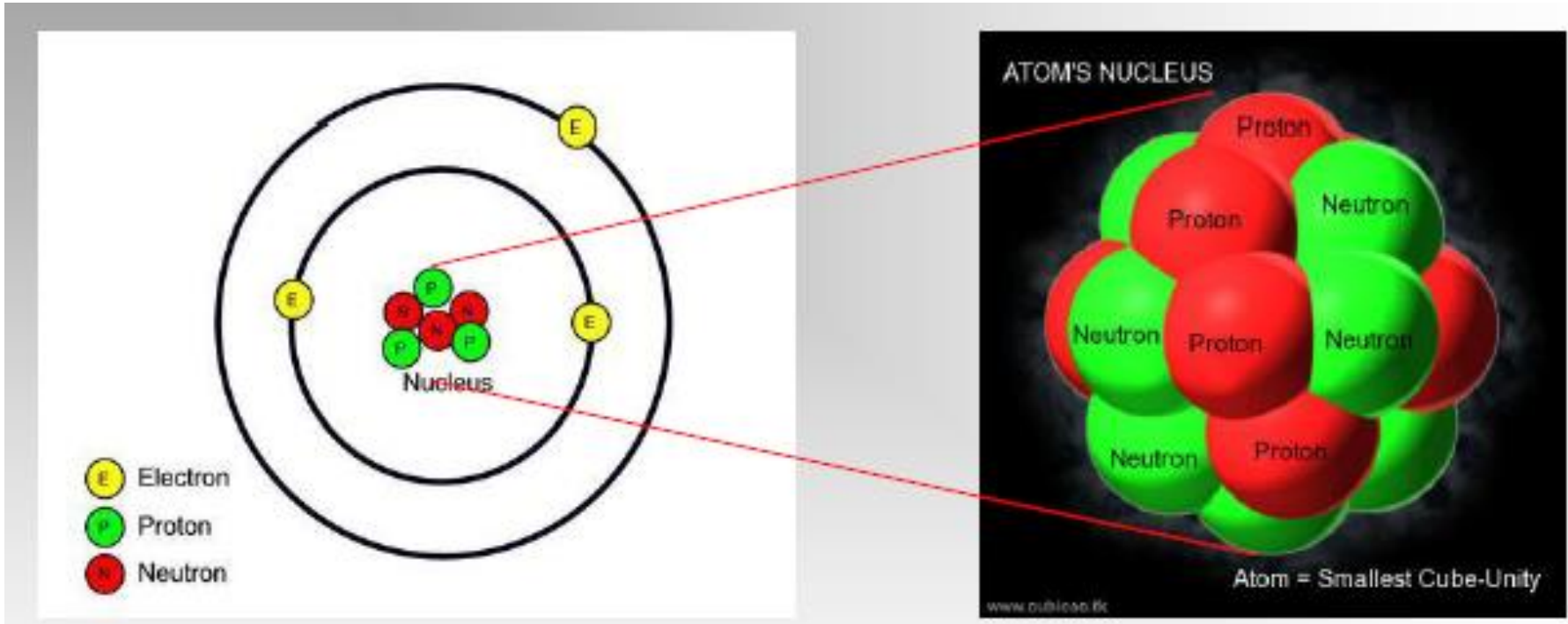
Página do curso:

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=67084>

**1º Semestre de 2019**

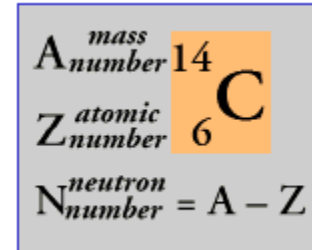
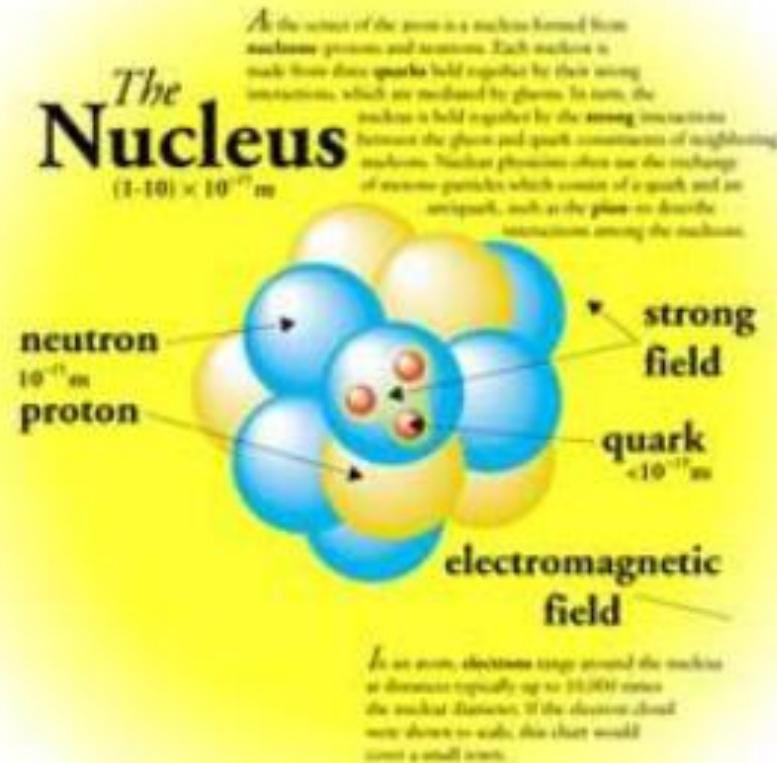
**14 maio de 2019**

# Do átomo para o núcleo



**Os processos nucleares estão presentes em nossa vida todos os momentos. Nestes processos são geradas radiações devido a processos de modificações dos prótons e nêutrons, por emissão de partículas ou por de-excitação nuclear**

# Princípios básicos de física nuclear

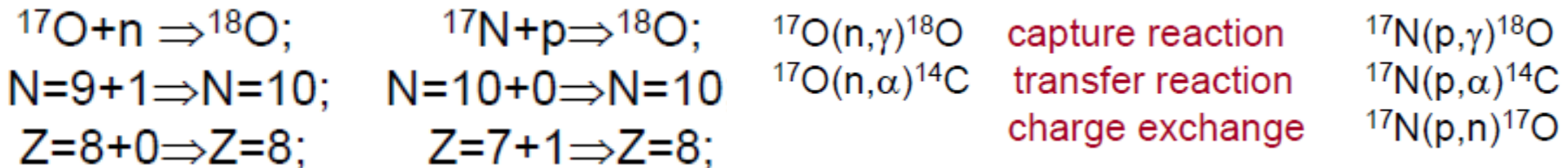
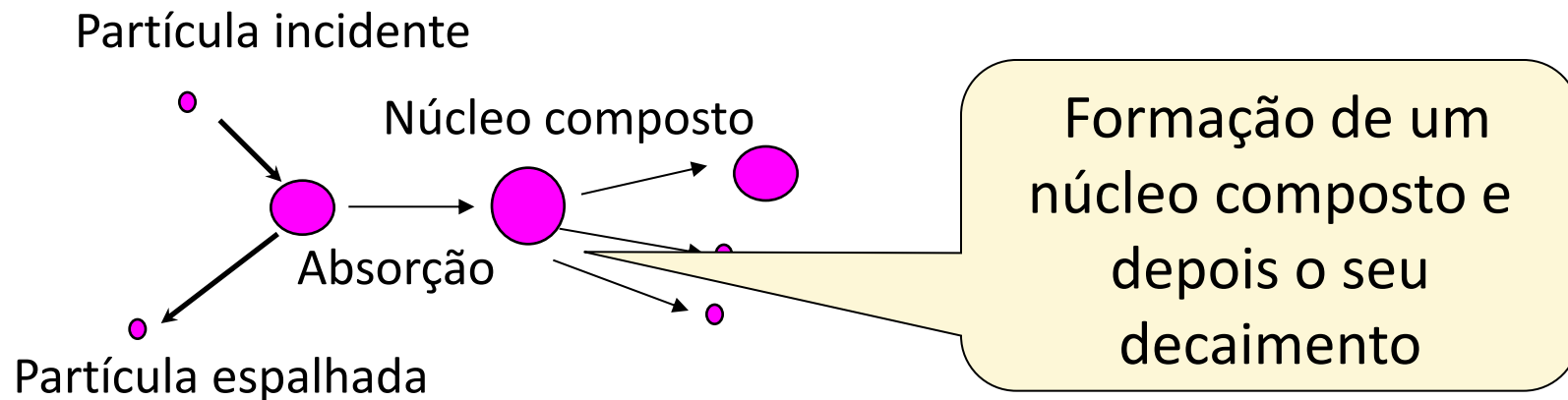


**Núcleo consiste de:**  
**Z prótons com carga e+**  
**N neutros sem carga**  
**A número de massa A=Z+N**  
**Prótons e nêutrons estão ligados**  
**por uma força forte**  
**R=10<sup>-13</sup>m**

# Do átomo para o núcleo

## Reações Nucleares

**Em uma reação nuclear dois núcleos se combinam formando um terceiro núcleo**



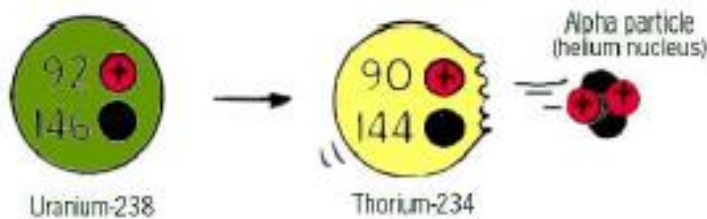
**O decaimento do núcleo composto é por emissão de partículas ou radiação (gama) até o estado fundamental ou se quebra emitindo partículas leves (alfas) e resultando em um outro núcleo**

# Do átomo para o núcleo

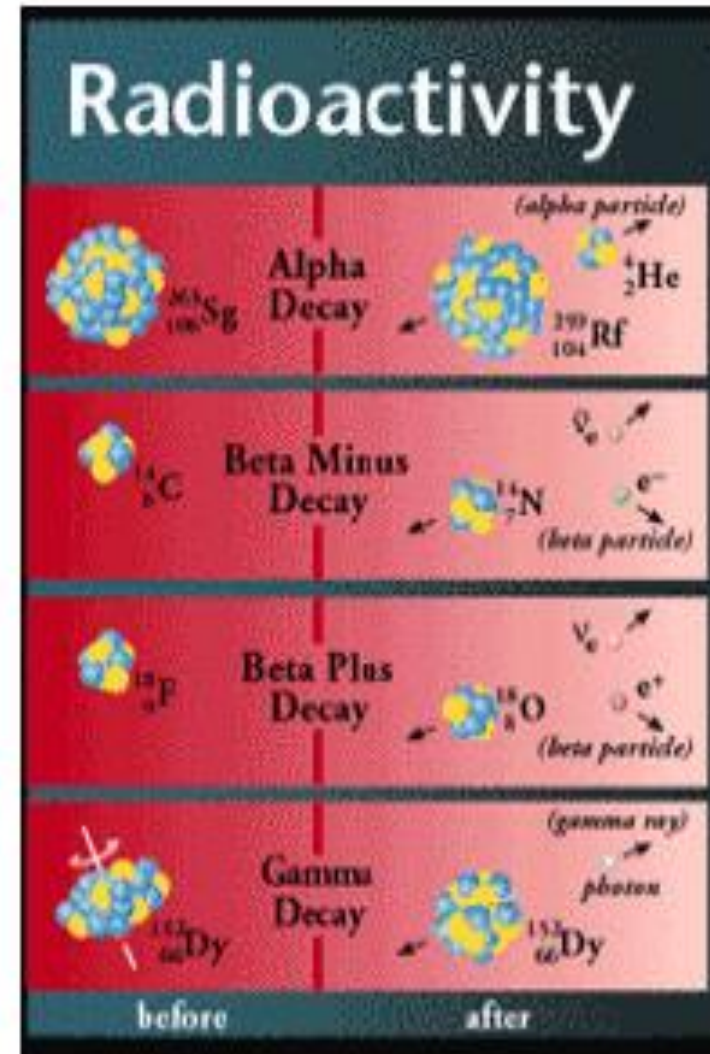
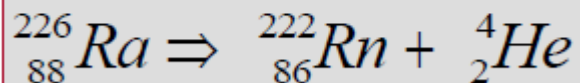
## Decaimento Nuclear

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

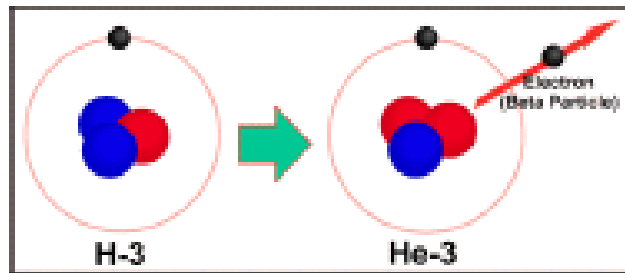
### Decaimento alfa



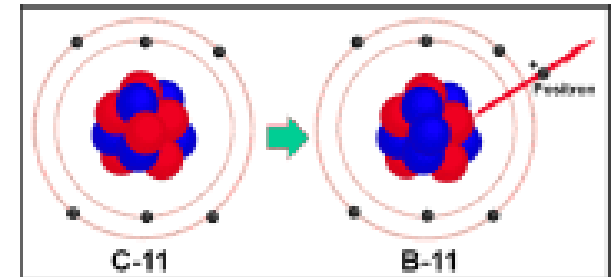
Alpha particle  $\alpha = {}^4_2\text{He}$



# 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!

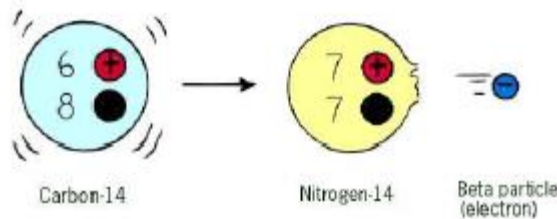


# Do átomo para o núcleo

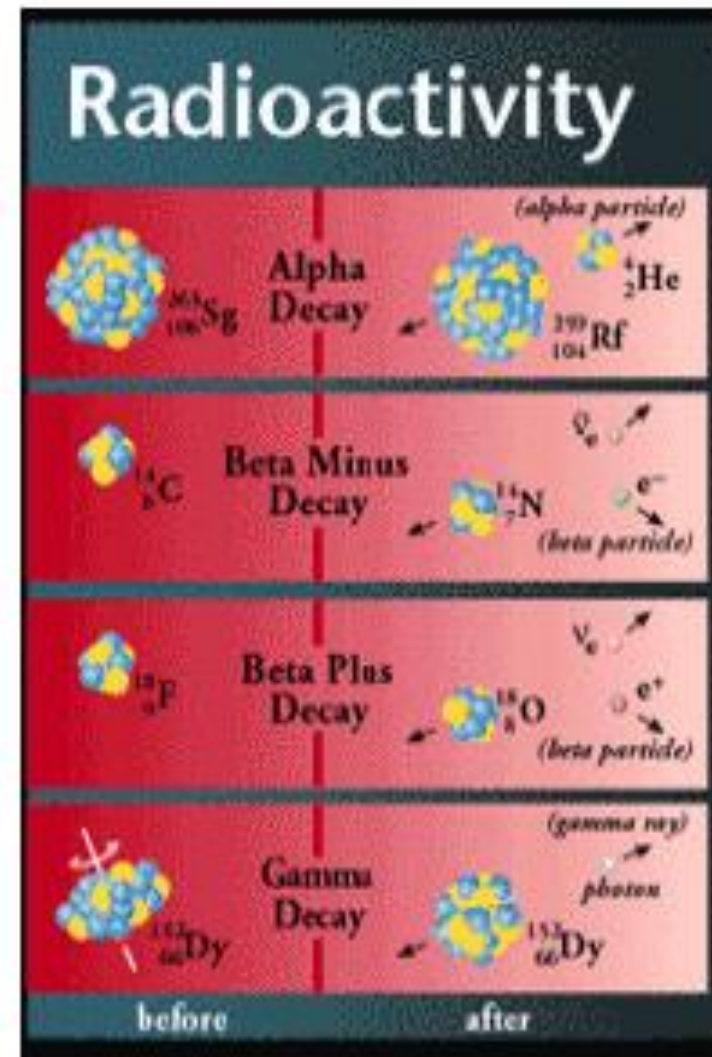
## Decaimento Nuclear

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

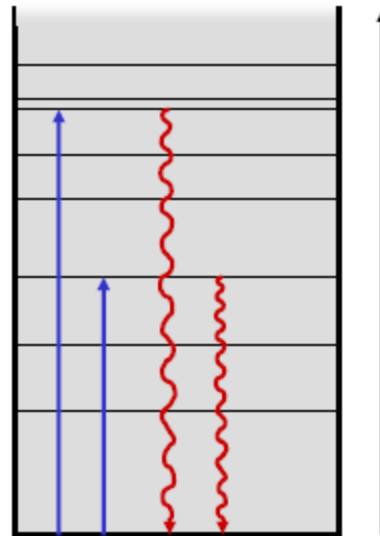
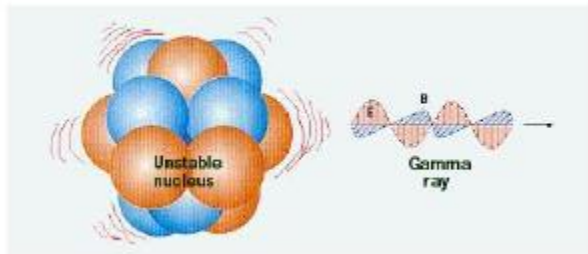


# Do átomo para o núcleo

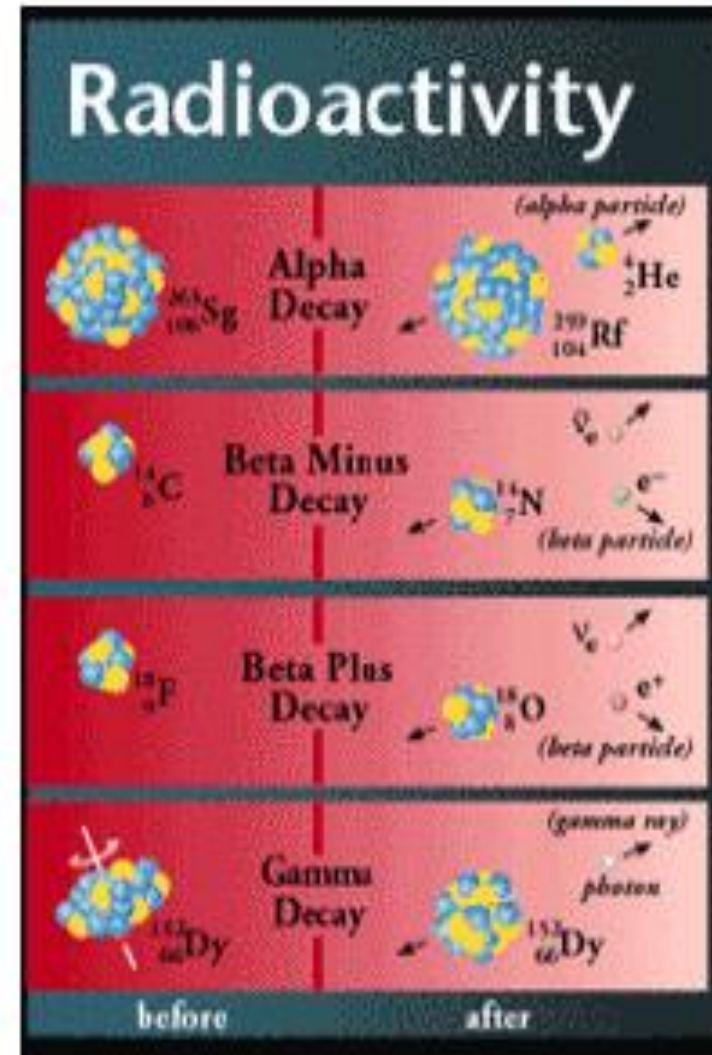
## Decaimento Nuclear

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





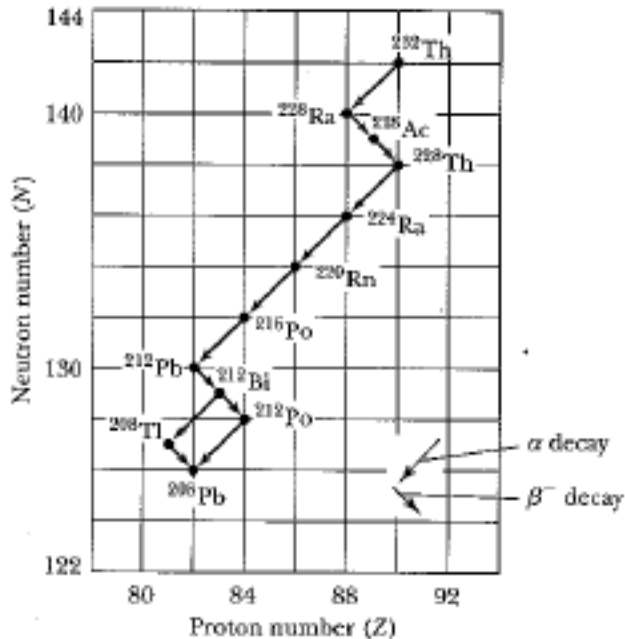
# Resumidamente

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

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

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

**Decaimento  $\beta^-$ : captura eletrônica**       $Q = E = [M({}_Z^AX) - M({}_{Z-1}^AD)]c^2$   
 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

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

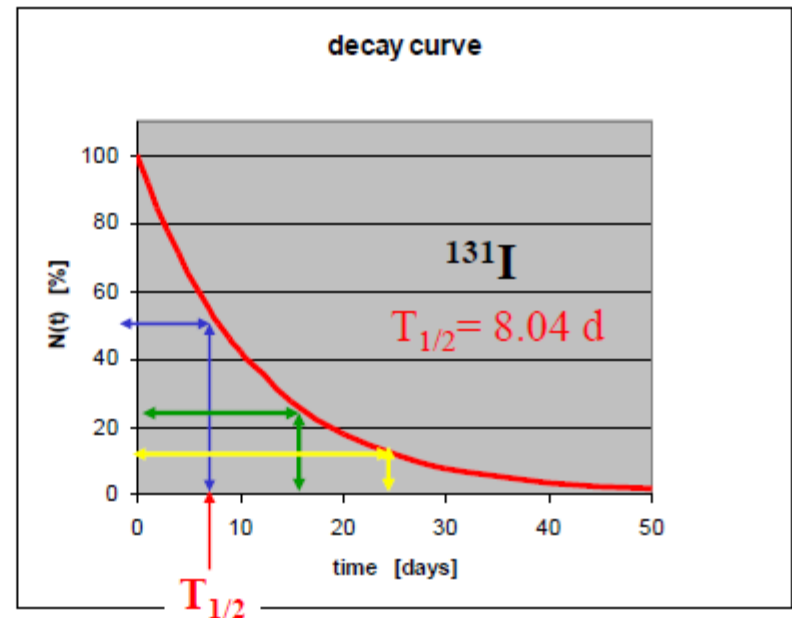
$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

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

$\lambda$ : 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


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

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

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

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

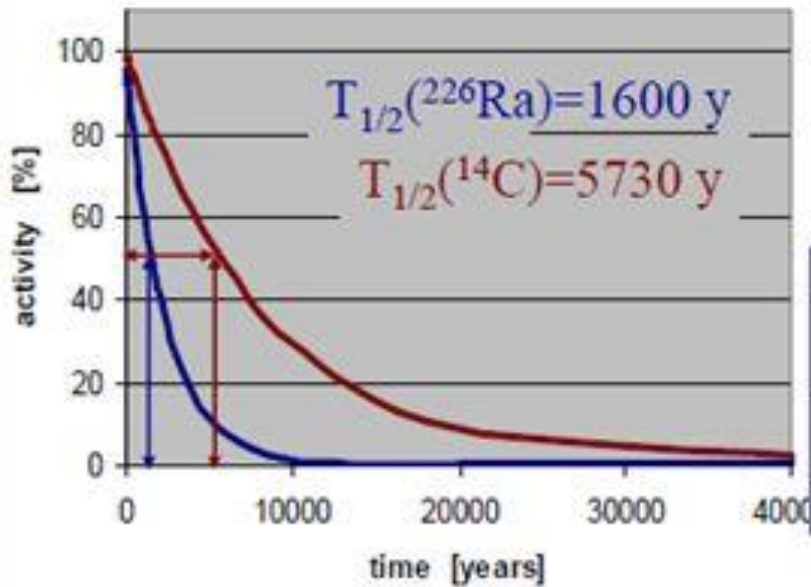
**A constante de decaimento  $\lambda$  é inversamente proporcional ao tempo de meia vida ( $T_{1/2}$ )**

**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?

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

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

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

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

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

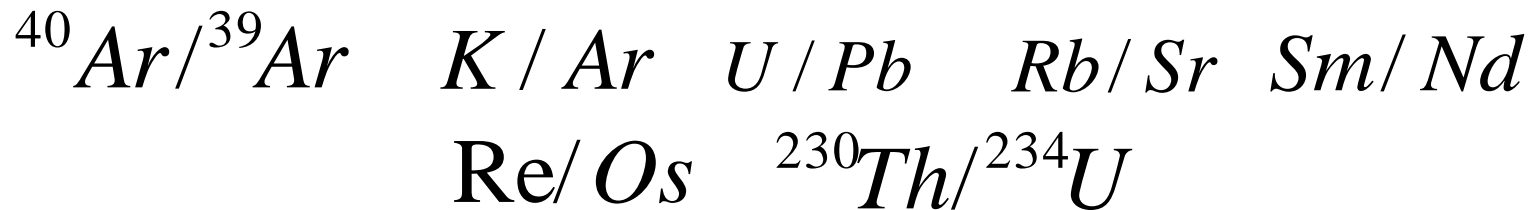
$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{5730} = 0,000121 \left( \frac{1}{\text{ano}} \right)$$

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

- 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

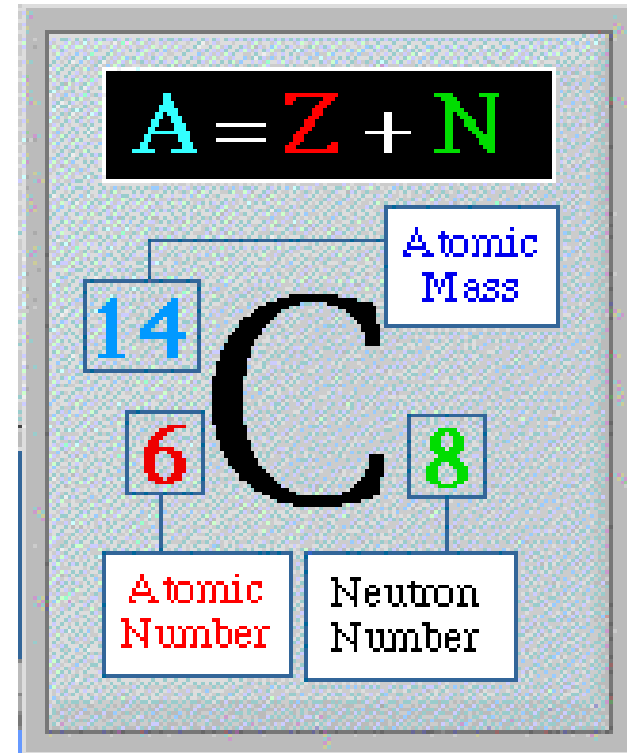
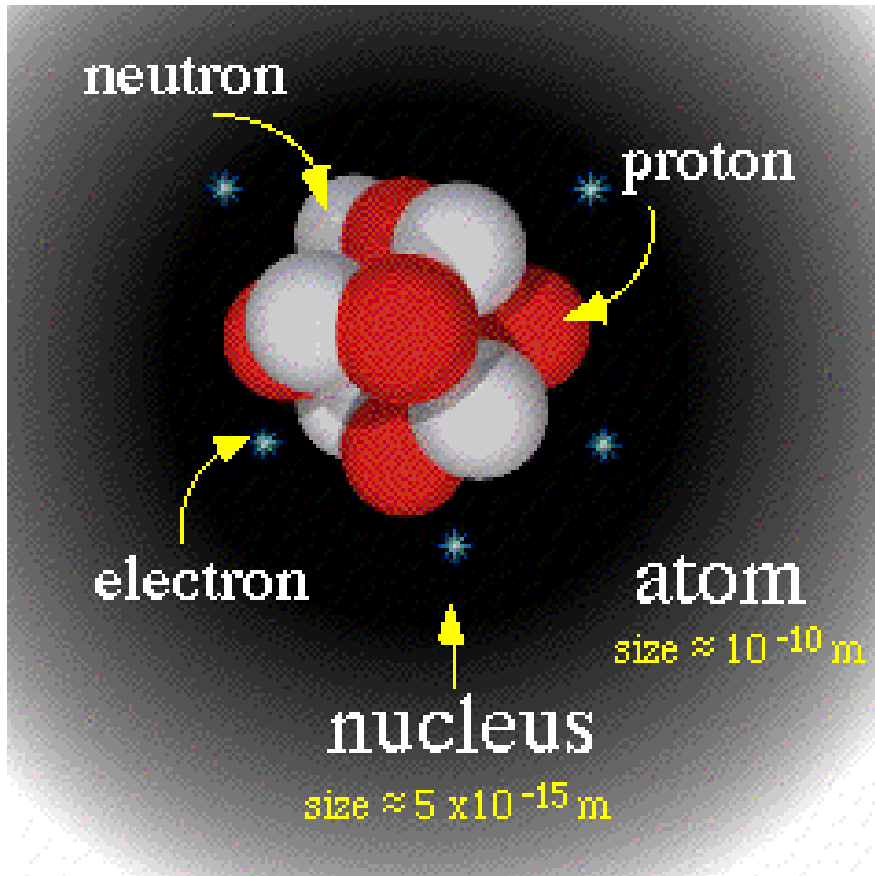
- métodos baseados em danos de radiação cumulativos causados no material geológico (Traços de Fissão, Termoluminescência, Ressonância paramagnética)



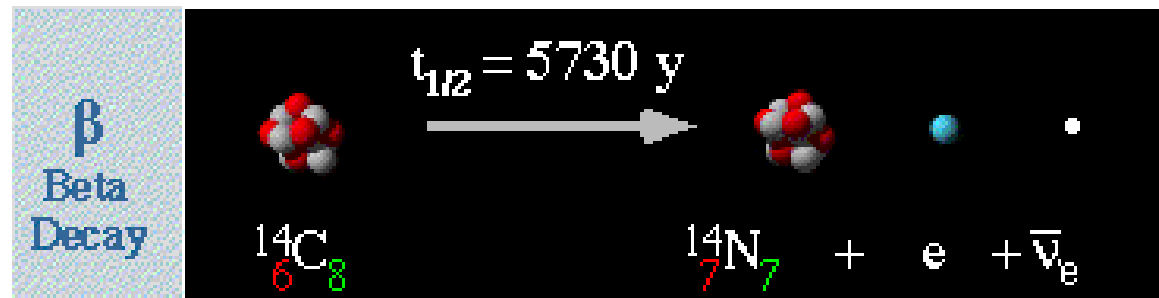
# O Núcleo Atômico

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

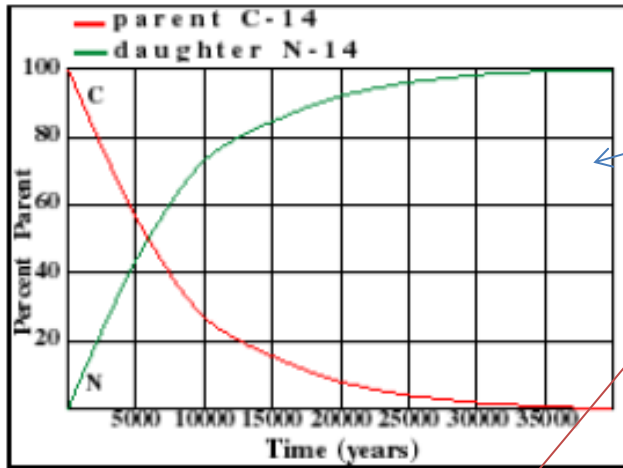
Espectrometria de massa

Convencional

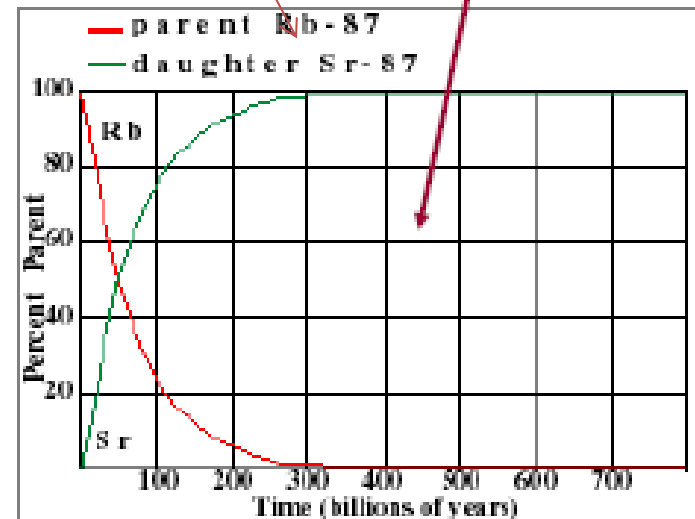
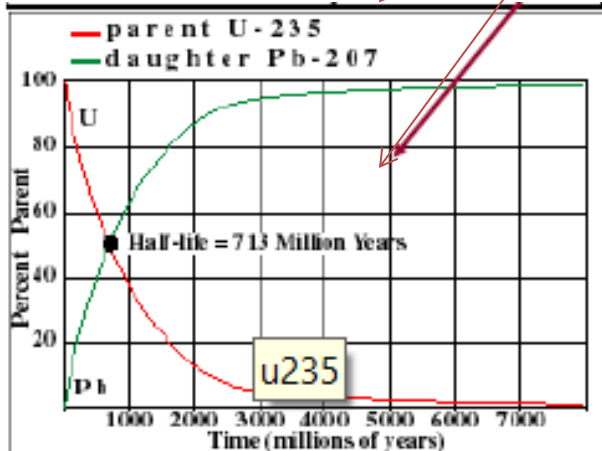
Aceleradores (AMS)

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 ( $t$ )

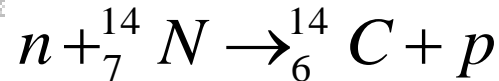
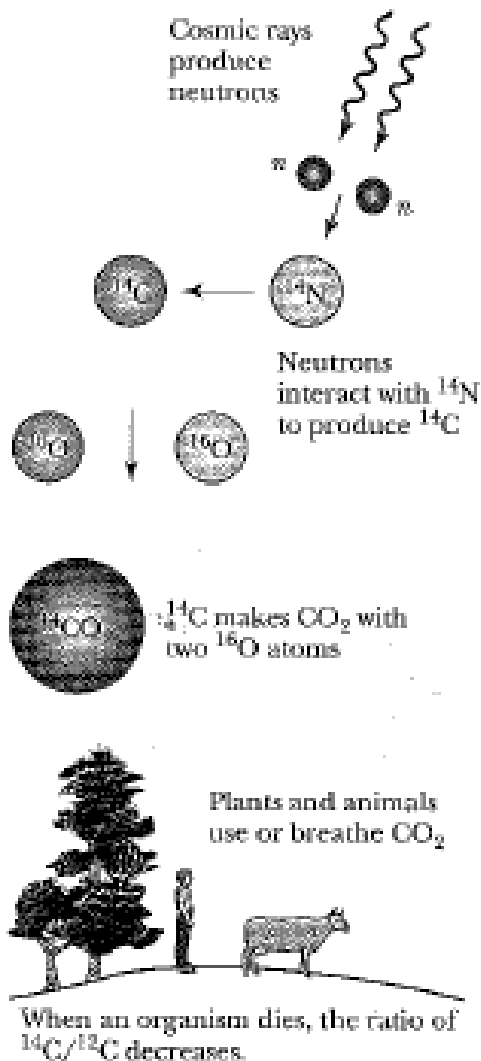
$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{N_0}{N(t)}\right) = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{N(^{14}\text{C})_{t=0}}{N(^{14}\text{C})_{t=t}}\right)$$

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

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

# Datação com Carbono

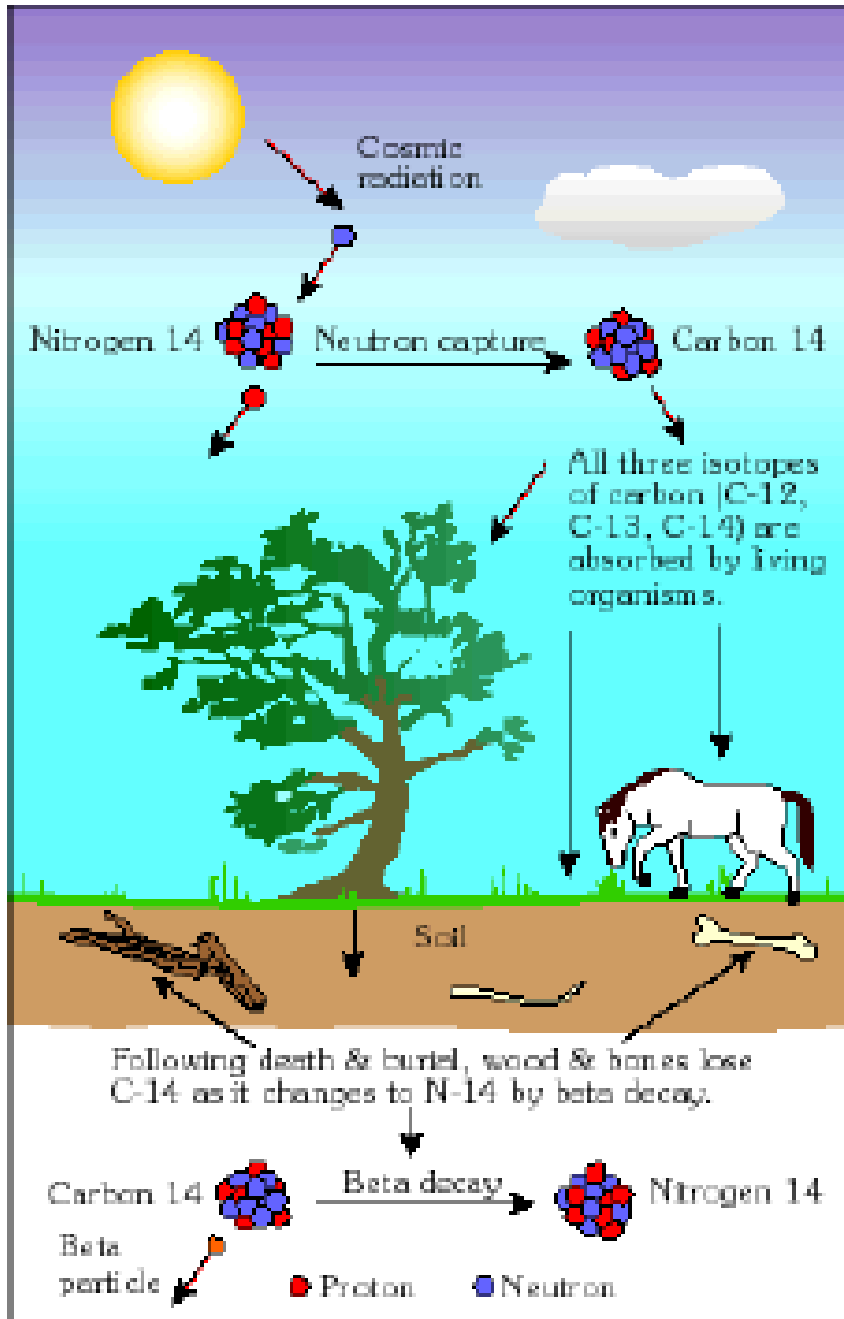
O  $^{14}\text{C}$  radioativo é produzido em nossa atmosfera pelo bombardeamento do  $^{14}\text{N}$  por nêutrons produzidos por raios cósmicos:



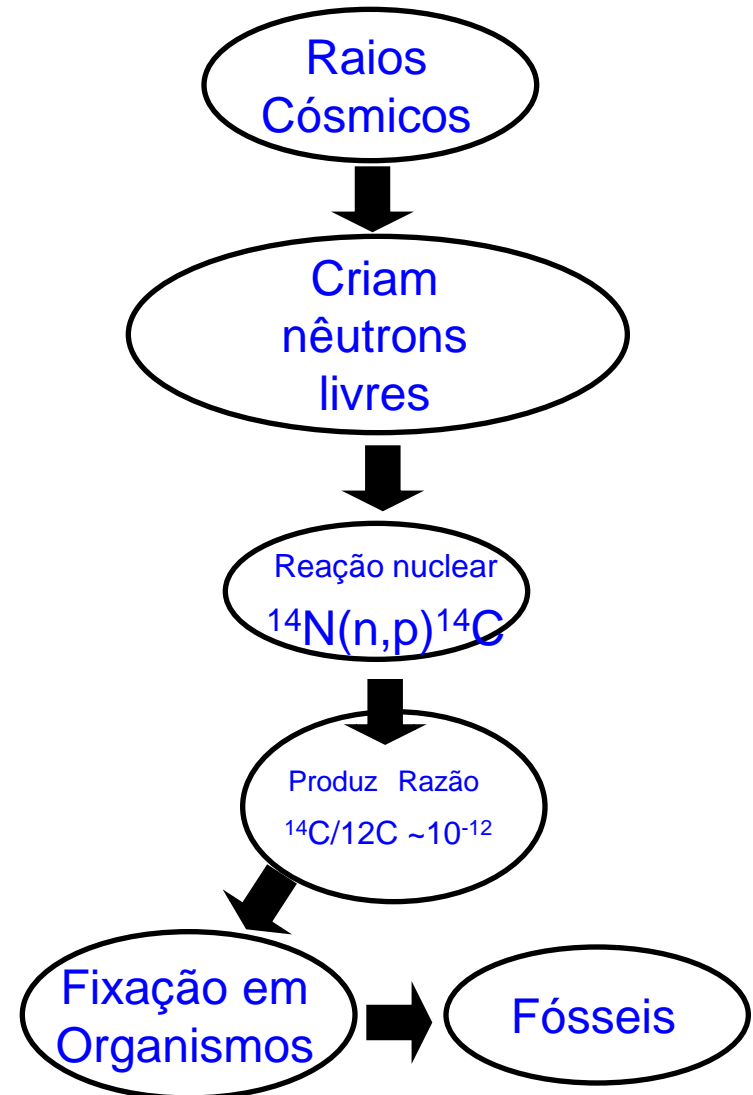
Um equilíbrio natural de  $^{14}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$  existe nas moléculas de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. No entanto quando um organismo vivo morre sua absorção de  $^{14}\text{C}$  cessa, então a razão  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  diminui o  $^{14}\text{C}$  tem meia vida de 5730 anos e é conveniente utilizar esta razão para determinar a idade dos objetos.

Recentemente esta se utilizando aceleradores de partículas (para acelerar os íons de C) para datar amostras com pequenas quantidades  $\sim 10^5$  de átomos ( $\sim 10^{-20}$  kg) que antes necessitavam de amostras com massa superiores a 0,01kg. Willard Libby (1960) recebe o premio Nobel por este engenhosa técnica.





# 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***

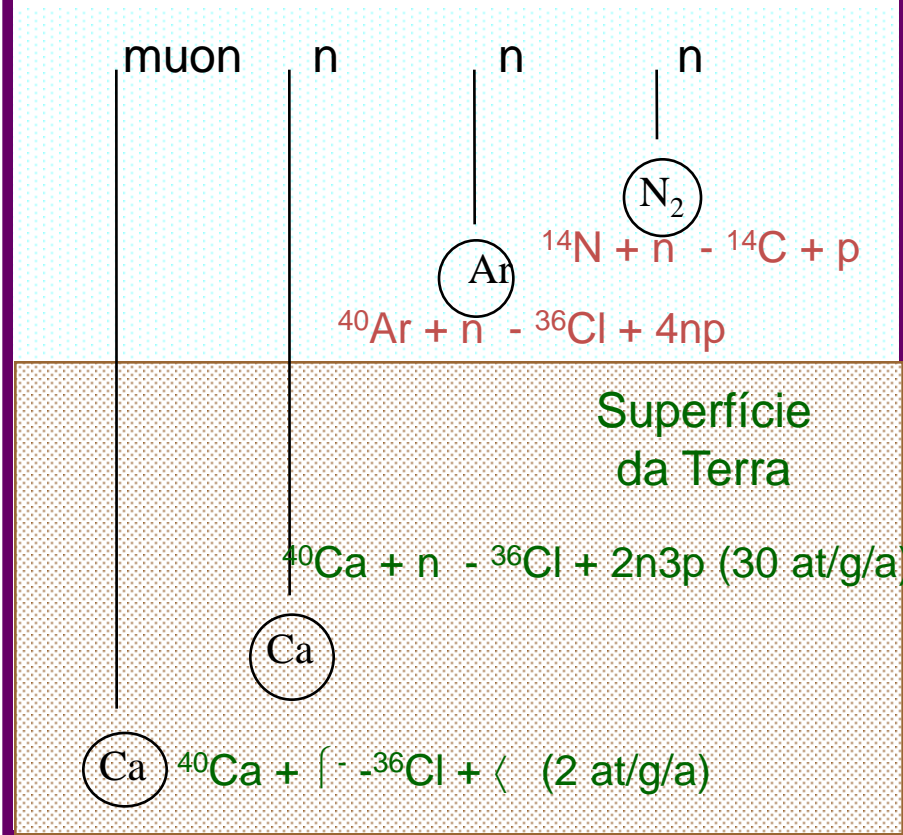
Introduzido em **1947** - E.C. Anderson e W.F. Libby

- **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

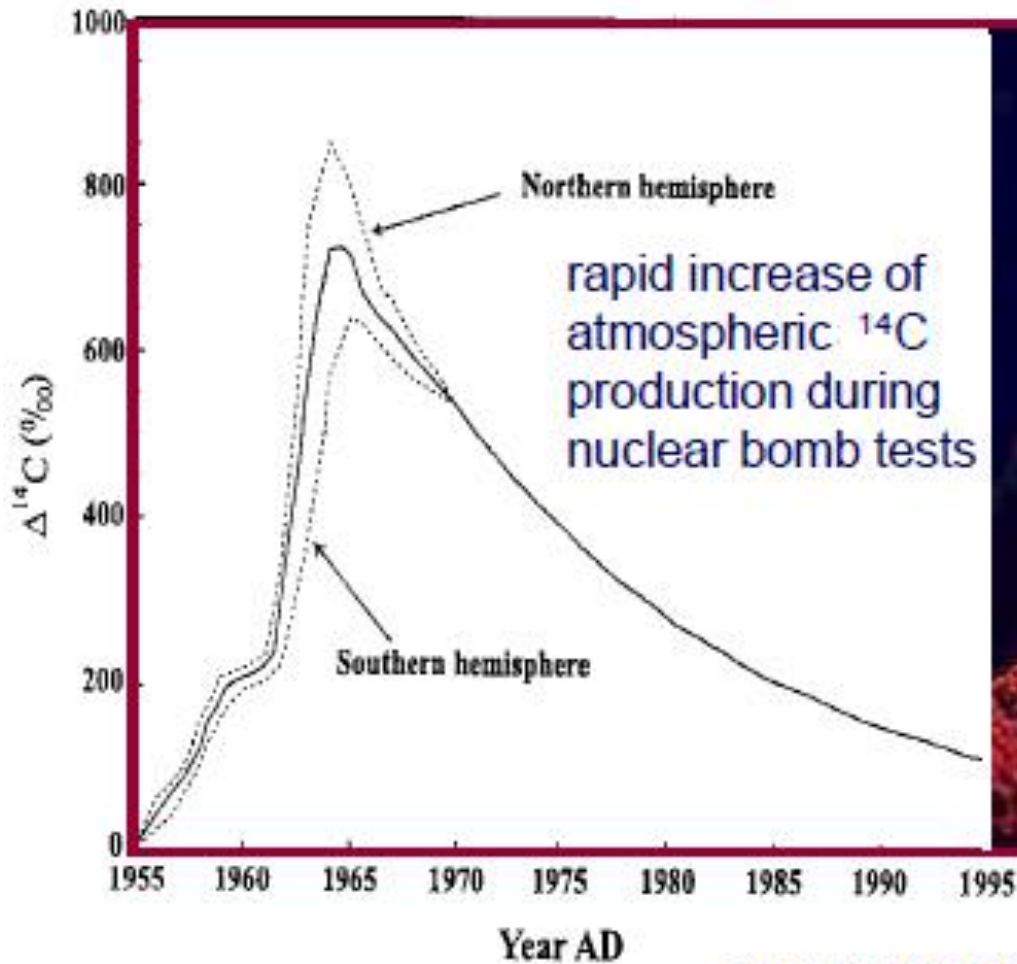
Cosmog3nicos

Interaç3o de raios c3smicos na atmosfera e rochas na superf3cie terrestre

Antropog3nicos

Reatores e artefatos nucleares

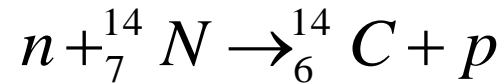
# Anthropogenic Sources



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:

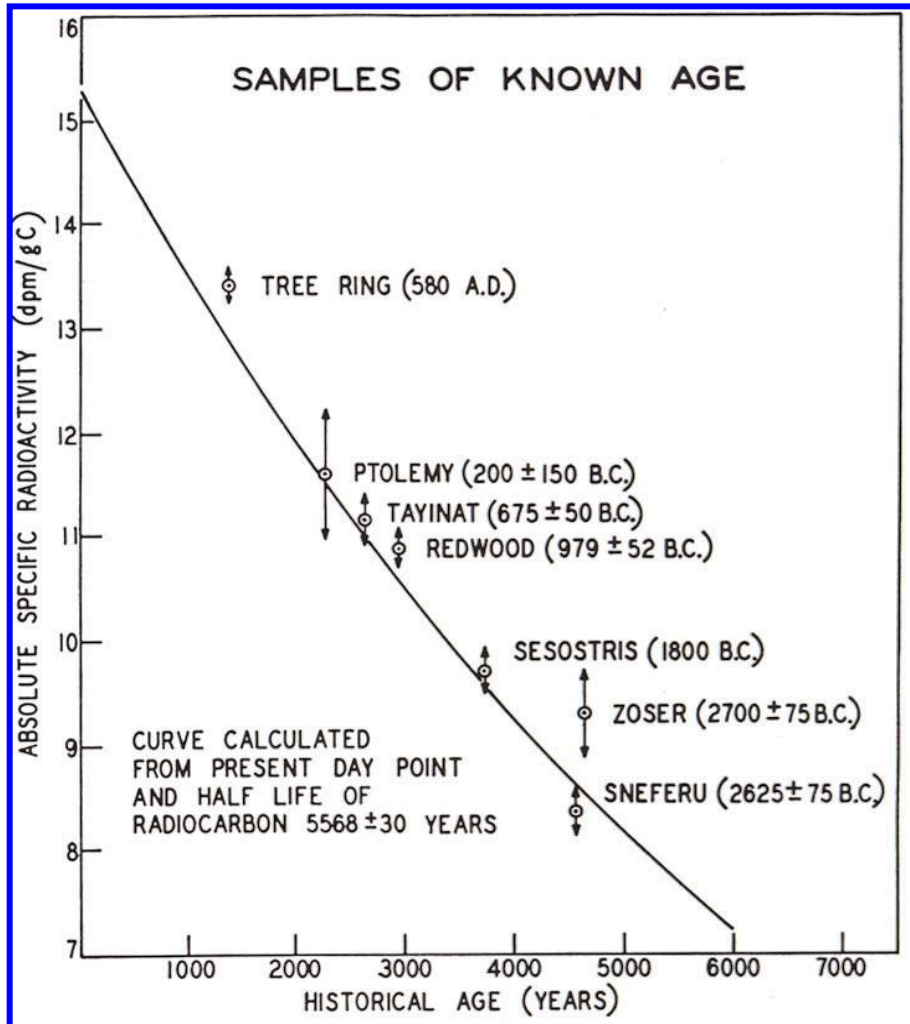
Restos de carvão foram encontrados num sítio arqueológico e mediu-se a radioatividade deste “material morto”: para 1 kg deste material, a taxa de decaimento do  $^{14}\text{C}$  foi de  $9,4 \times 10^2$  decaimentos/segundo. Sabe-se que para um “material vivo” esta taxa é de  $1,5 \times 10^4$  decaimentos/segundo.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

- **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)

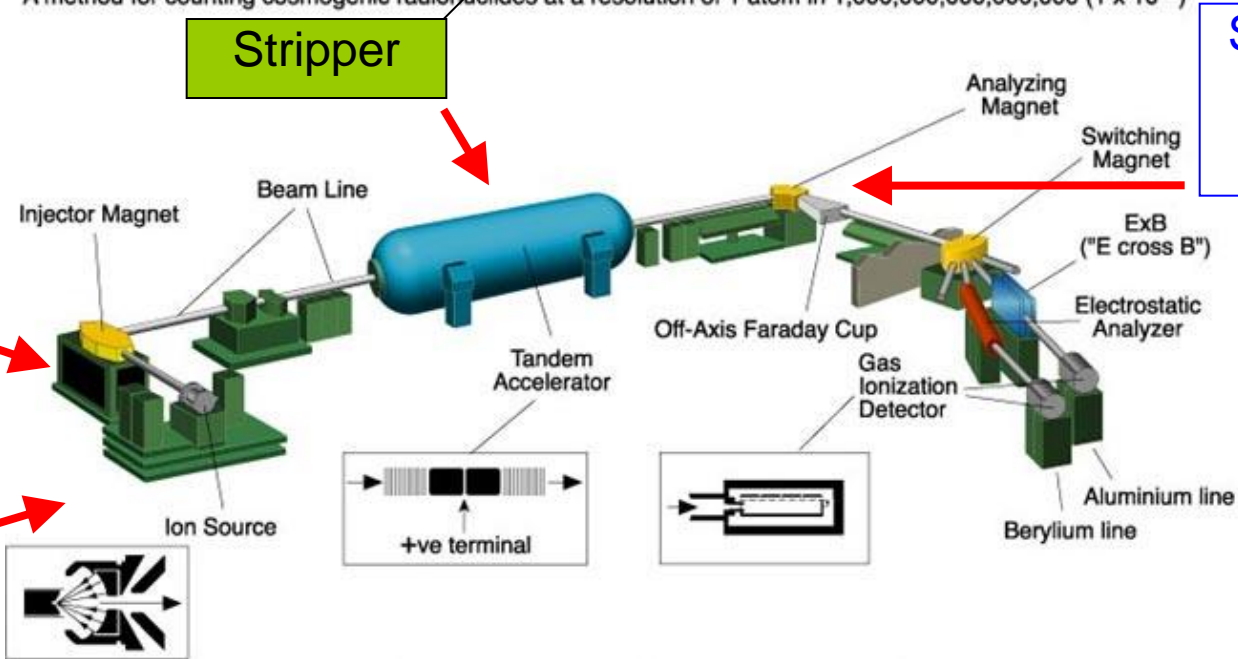
A method for counting cosmogenic radionuclides at a resolution of 1 atom in 1,000,000,000,000,000 ( $1 \times 10^{15}$ )

Stripper

Seletor de Massa e Energia

Seletor Massa 14

Fonte de Íons Negativos

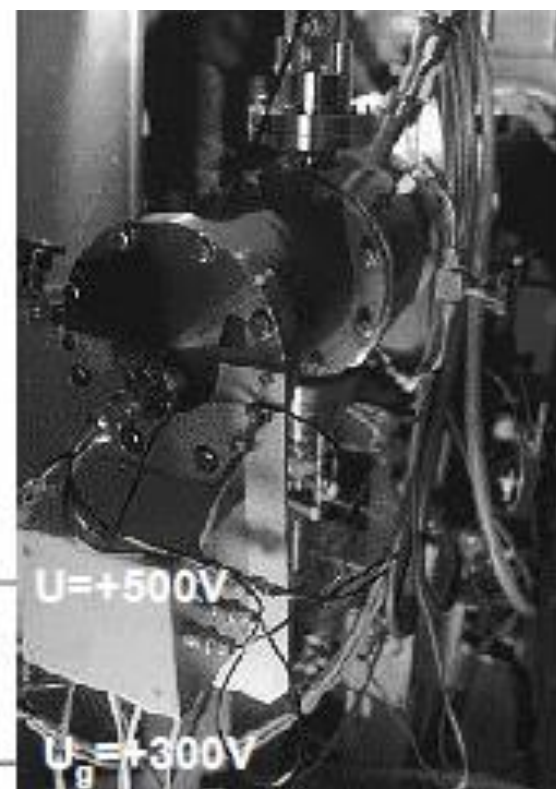
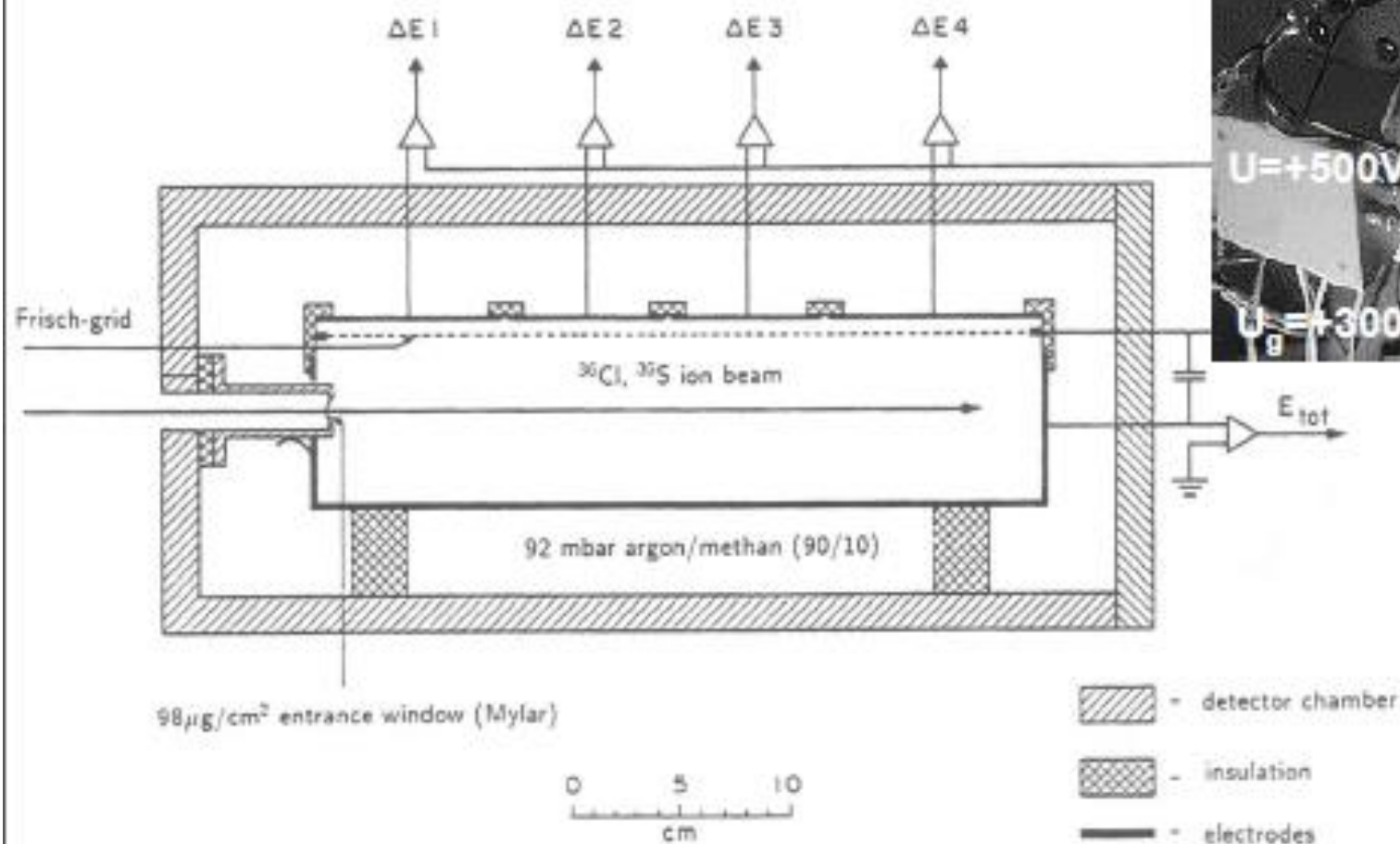


Cosmogenic radionuclides used in Earth Science applications measured by AMS with half-lives in years:

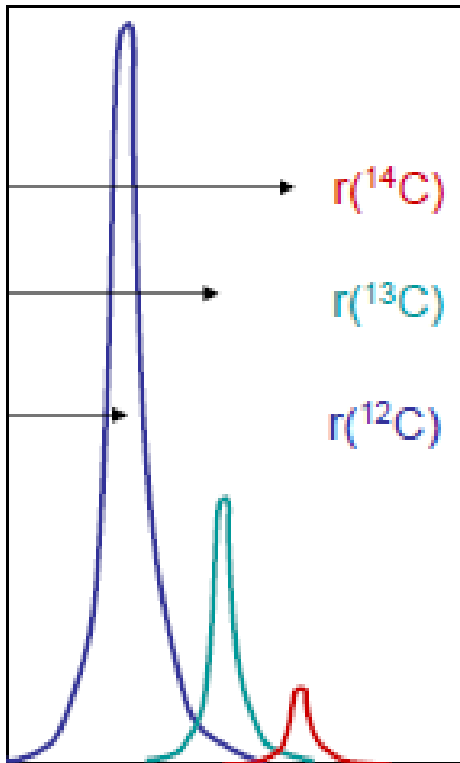
$^{14}\text{C}$  (5730)    $^{41}\text{Ca}$  (100,000)    $^{36}\text{Cl}$  (301,000)    $^{26}\text{Al}$  (705,000)    $^{10}\text{Be}$  (1,510,000)

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

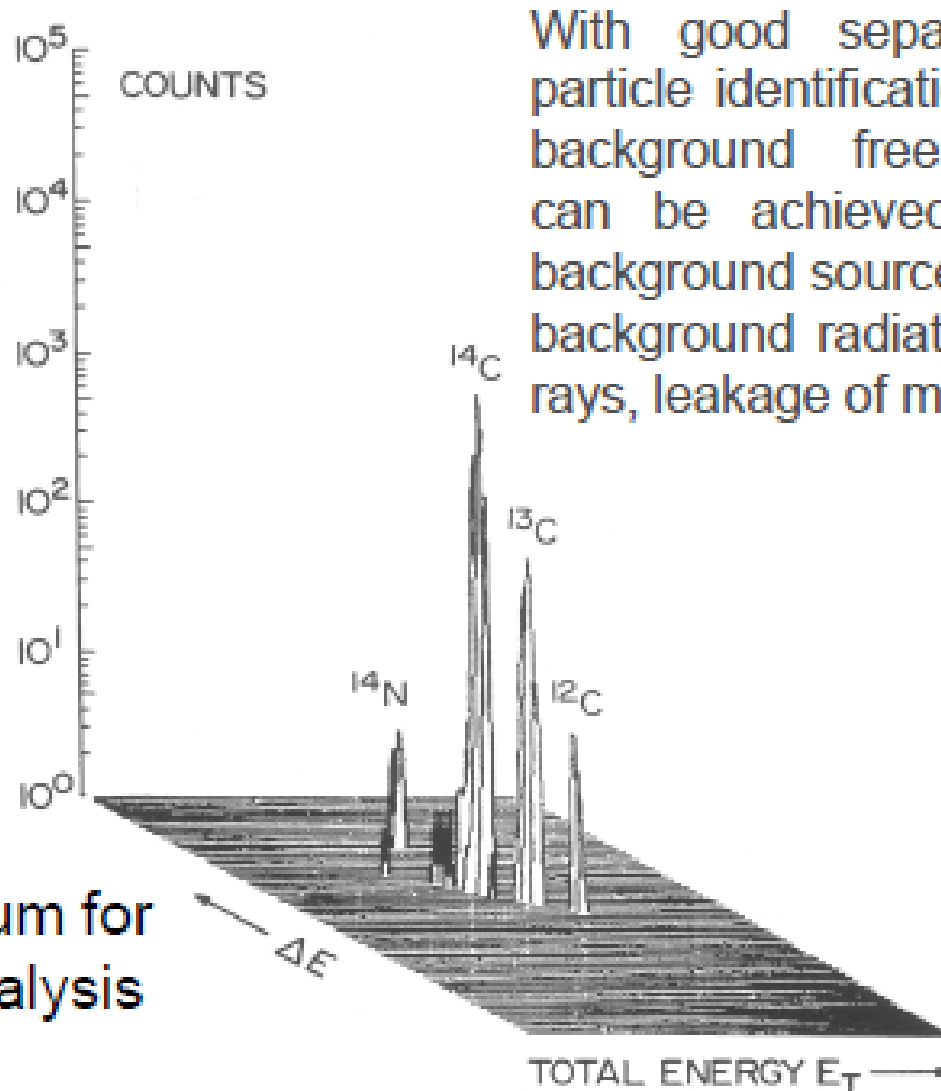
is based on measurement of energy loss and total energy of incoming ions in gas.



# 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.



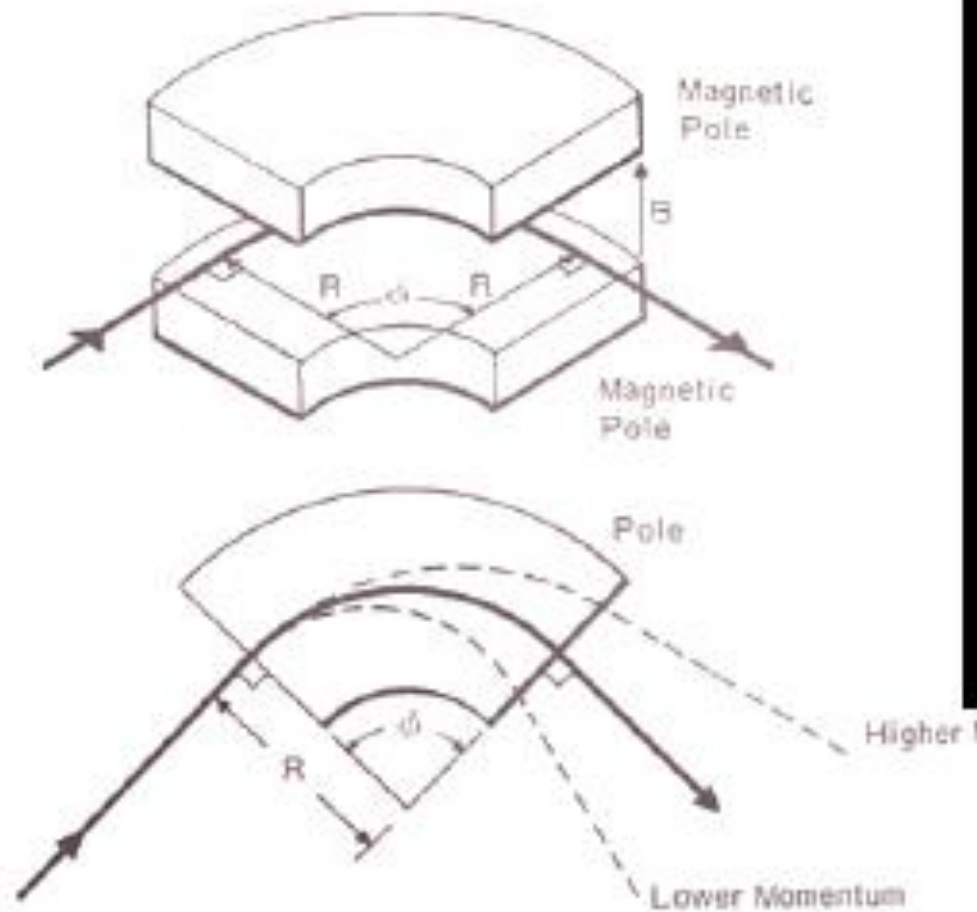
# SEPARAÇÃO ISOTÓPICA E ANÁLISE

## DETERMINAÇÃO DA RAZÃO DO ISÓTOPO DE Pb

### ANÁLISE ISOTÓPICA POR TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO DE MASSA

<b><math>^{204}\text{Pb}</math></b>	<b><math>^{206}\text{Pb}</math></b>	<b><math>^{207}\text{Pb}</math></b>	<b><math>^{208}\text{Pb}</math></b>	<b><math>^{210}\text{Pb}</math></b>
203.97302	205.97444	206.97588	207.97663	$t_{1/2}=22.6\text{yrs}$
1.40%	24.10%	22.10%	52.40%	
Stable	Radiogenic	Radiogenic	Radiogenic	Cosmogenic

# ANALISE ISOTÓPICA POR TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO DE MASSA



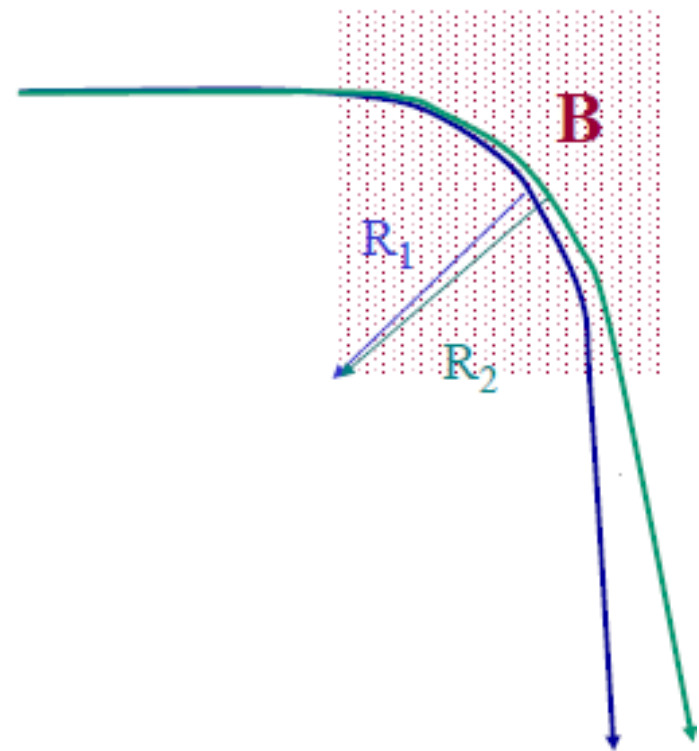
Partículas com velocidades  $v$  são separadas pela razão  $m/q$  para um campo magnético,  $B$ , fixo e um espectrômetro de raio  $R$ :

$$\frac{m}{q} = \frac{B.R}{v}$$

# ANALISE ISOTÓPICA POR TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO DE MASSA

Example: Separation of  $^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}$

$$\frac{m}{q} = m \frac{B \cdot R}{v}; \quad m = \left( \frac{q \cdot B}{v} \right) \cdot R$$
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\left( \frac{q \cdot B}{v} \right) \cdot R_1}{\left( \frac{q \cdot B}{v} \right) \cdot R_2} = \frac{R_1}{R_2}$$
$$\frac{204}{208} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{for } R_2 = 1 \text{ m};$$
$$R_1 = \frac{204}{208} \text{ m} = 0.98 \text{ m}$$



Separated  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  beams