



## Tecniche di datazione

**Massimiliano Pieraccini**

# Datazione con radiocarbonio

---



1947 Willard F. Libby (1908-1980)  
Premio Nobel per la Chimica 1960

Tessuti organici

Conchiglie

Legno

Corallo

Semi

Avorio

CO<sub>2</sub> intrappolato nei ghiacci

**fino a 60000 anni**



Atomo di carbonio  $^{12}_6C$

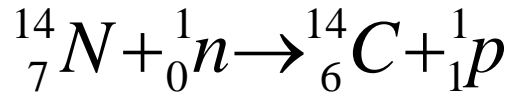
Biossido di carbonio  
(anidride carbonica)  $CO_2$

# Datazione con radiocarbonio

Radiazione cosmica  
(Attività solare)

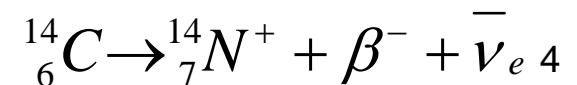
protoni, alfa, nuclei pesanti

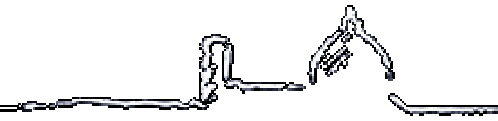
Neutroni veloci (1-100 MeV)



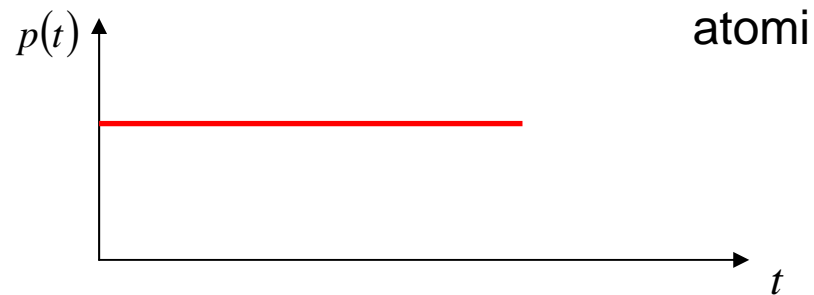
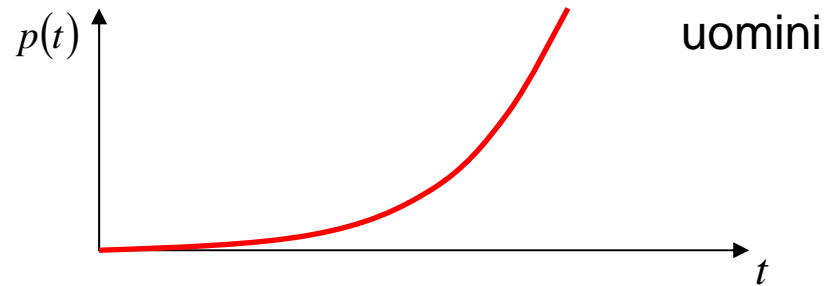
CO<sub>2</sub> radioattivo

**equilibrio:** negli esseri viventi 1 atomo carbonio su  
10<sup>12</sup> è radioattivo





La probabilità che un atomo radioattivo decada nell'unità di tempo è indipendente da quanto tempo l'atomo si è formato





La probabilità che un atomo radioattivo decada nell'unità di tempo è indipendente da quanto tempo l'atomo si è formato

**Gli atomi non hanno memoria del passato**

**Gli atomi (in generale tutte le particelle) non hanno individualità**

# Attività radioattiva

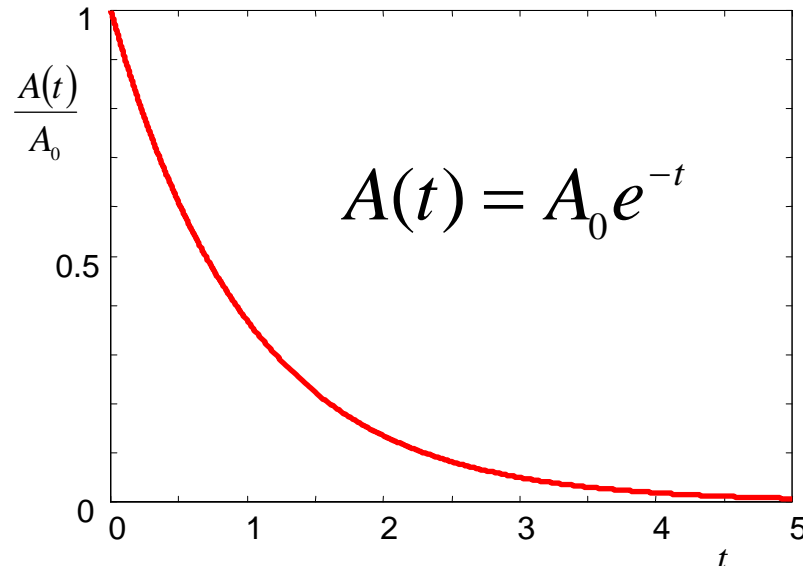


$A$  = numero di atomi radioattivi

$\lambda$  = probabilità che un atomo decada nell'unità di tempo [ $s^{-1}$ ]

$$N = A\lambda = \left[ \frac{\text{disintegrazioni}}{s} \right] = Bq$$


$$dA = -Ndt \quad \Rightarrow \quad dA = -A\lambda dt \quad \Rightarrow \quad \frac{dA}{A} = -\lambda dt$$

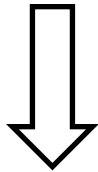


$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

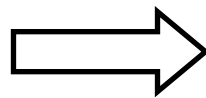
$\frac{A(t)}{A_0}$  = probabilità che un atomo non si sia disintegrato (ovvero che sia ancora “in vita”) dopo un tempo  $t$

Vita media

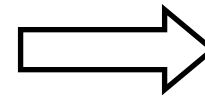

$$\tau = \int_{t=0}^{t=\infty} \frac{A(t)}{A_0} dt$$



$$\tau = \int_{t=0}^{t=\infty} e^{-\lambda t} dt$$



$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \left[ e^{-\lambda t} \right]_{t=0}^{t=+\infty}$$

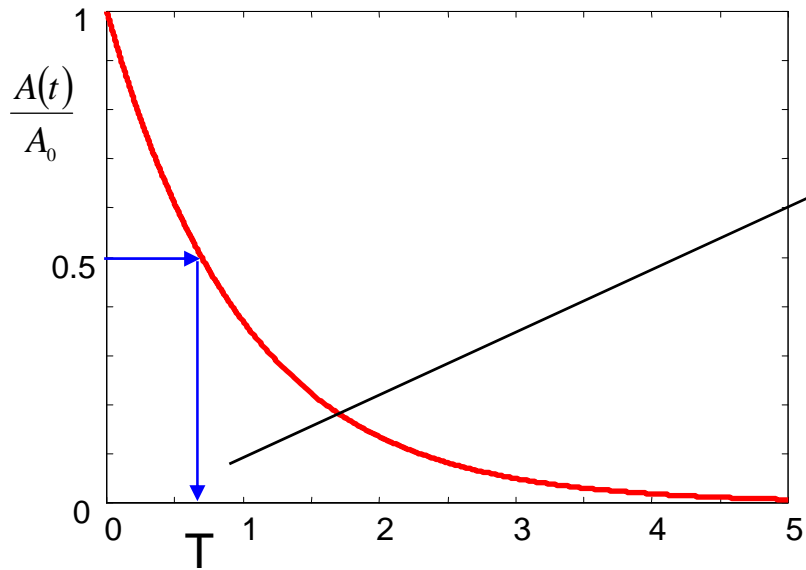


$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$



# Tempo di dimezzamento



$$\frac{A(T)}{A_0} = \frac{1}{2}$$



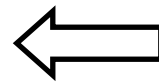
$$e^{-\frac{T}{\tau}} = \frac{1}{2}$$



$$-\frac{T}{\tau} = \ln\left(\frac{1}{2}\right)$$



$$A(t) = A_0 e^{-0.693 \frac{t}{T}}$$



$$T = 0.693 \tau$$



Tempo di dimezzamento del  $^{14}\text{C}$

$T = 5568$  anni

$T = 5730$  anni

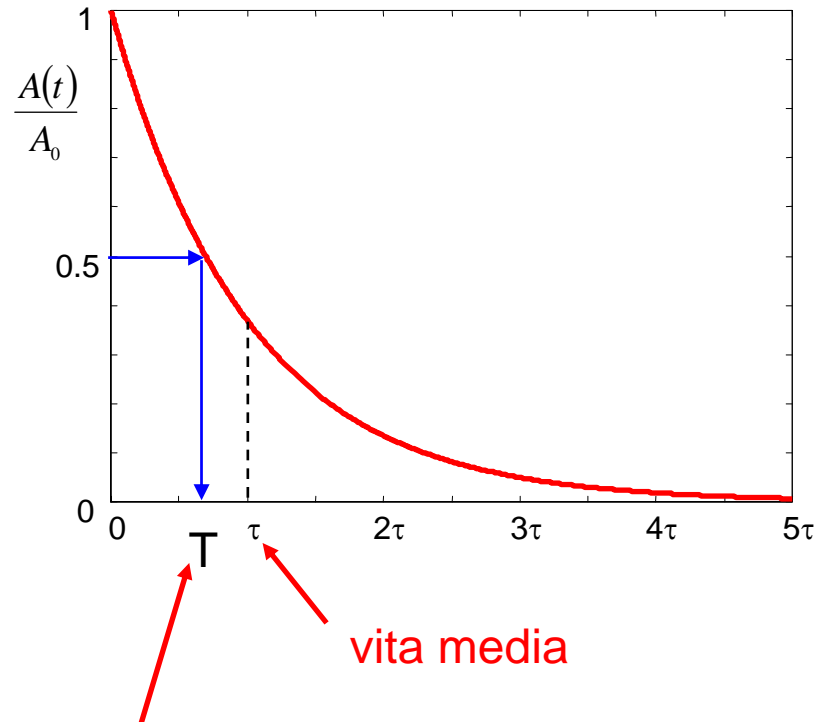
(Goldwin 1962)

# Datazione con radiocarbonio: formule operative

$$A(t) = A_0 e^{-0.693 \frac{t}{T}}$$



$$t = -\frac{T}{0.693} \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$

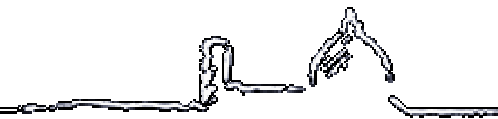


$T$  = tempo di dimezzamento

$A$  = atomi attivi ( $C_{14}$ )

$A_0$  = atomi attivi al momento della morte

# Datazione con radiocarbonio: formule operative



$$t = -\frac{T}{0.693} \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right)$$



$$t = -\frac{T}{0.693} \ln\left(\frac{\frac{N(t)}{\lambda}}{\frac{N_0}{\lambda}}\right)$$

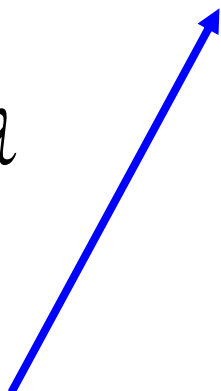


$$t = -\frac{T}{0.693} \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right)$$

$$N = A\lambda$$



$$A = \frac{N}{\lambda}$$



$T$  = tempo di dimezzamento

$N$  = disintegrazioni al secondo al momento della datazione(Bq)

$N_0$  = disintegrazioni al secondo al momento della morte (Bq)

1 mole di Carbonio di essere vivente: 2.80Bq

Attività di una mole:  $N = A\lambda$

$$N = \alpha N_A \lambda \quad \tau = \frac{1}{\lambda} \quad T = 0.693\tau$$

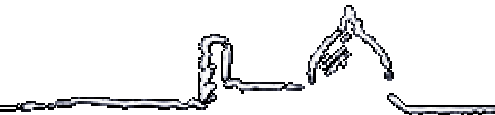


$$N = \frac{\alpha N_A}{T} (0.693)$$

$$\alpha = \frac{NT}{(0.693)N_A}$$

$$\alpha = \frac{(2.80)(5558)(365)(24)(3600)}{(0.693)(6.022 \times 10^{23})} = 1.18 \times 10^{-12}$$

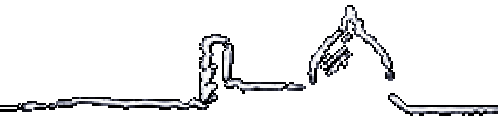
Negli esseri viventi 1.18 atomi di carbonio su  $10^{12}$  è radioattivo



1 mole di Carbonio di essere vivente: 2.80Bq

ovvero:

Negli esseri viventi 1.18 atomi di carbonio su  $10^{12}$  è radioattivo



1 mole di Carbonio di essere vivente: 2.80Bq

A quanti moli corrispondono un certo quantitativo di materiale organico?

Si “brucia” tutto il carbonio organico trasformandolo in  $\text{CO}_2$

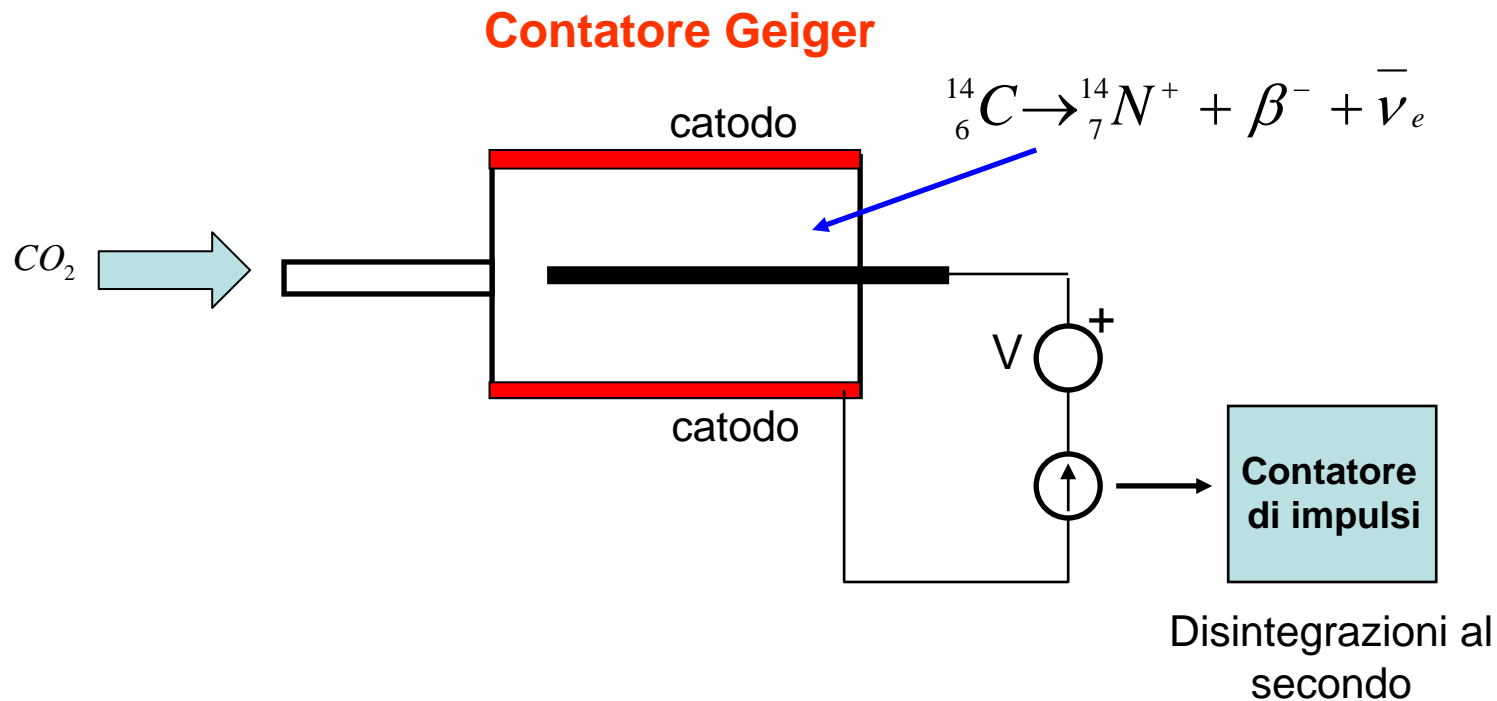
Si mette il gas  $\text{CO}_2$  in un contenitore di cui si può misurare pressione e temperatura

$$\boxed{PV = nRT} \Rightarrow n = \frac{V}{RT}P$$
$$R = 8.31 \frac{\text{Joule}}{\text{K mole}}$$

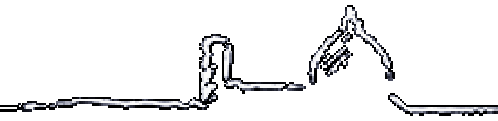
# Datazione con radiocarbonio

1 mole di Carbonio di essere vivente: 2.80Bq

Come si misura l'attività radioattiva del  $\text{CO}_2$  proveniente dal materiale organico bruciato?







- Pulizia chimica
- Il campione è convertito in CO<sub>2</sub> (“bruciato”) oppure in CH<sub>4</sub> (metano)
- Si misura il numero di moli del gas (usando l’equazione dei gas perfetti)  $\longrightarrow N_{moli}$
- Si misura l’attività radioattiva del gas con il contatore Geiger  $\longrightarrow N[Bq]$
- Si applica la seguente formula:

$$t = -\frac{T}{0.693} \ln \left( \frac{N}{N_{moli}} \right)$$

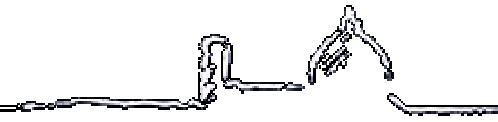


I conteggi dei decadimenti radioattivi seguono la statistica di Poisson  
(non quella gaussiana)

$$N_{tot} \pm \sqrt{N_{tot}} \quad \text{Disintegrazioni complessive}$$

$$t = -\frac{T}{0.693} \ln \left( \frac{N}{N_{moli}} \right)$$

$$\delta t = -\frac{T}{0.693} \frac{1}{\sqrt{N_{tot}}}$$



Tempo di dimezzamento del  $^{14}\text{C}$

$T = 5568$  anni

1950: Before Present (BP)



## Esercizio

0.1 moli di  $\text{CO}_2$  prodotto da un reperto da datare ha prodotto nell'anno 2002  
6912 conteggi in 96 ore di misura

Calcolare l'età (Before Present) del reperto usando il tempo di dimezzamento di Libby.

Calcolare l'errore nella stima dell'età.

Calcolare l'età (Before Present) dell'oggetto  
usando la seguente costante oggi considerate la migliore stima:  
 $T = 5730 \pm 30$  anni (Goldwin 1962)

Tenendo presente l'errore nel tempo di dimezzamento, si calcoli l'errore nella stima dell'età

Tenendo presente sia l'errore di conteggio, sia l'errore nel tempo di dimezzamento, si calcoli l'errore nella stima dell'età

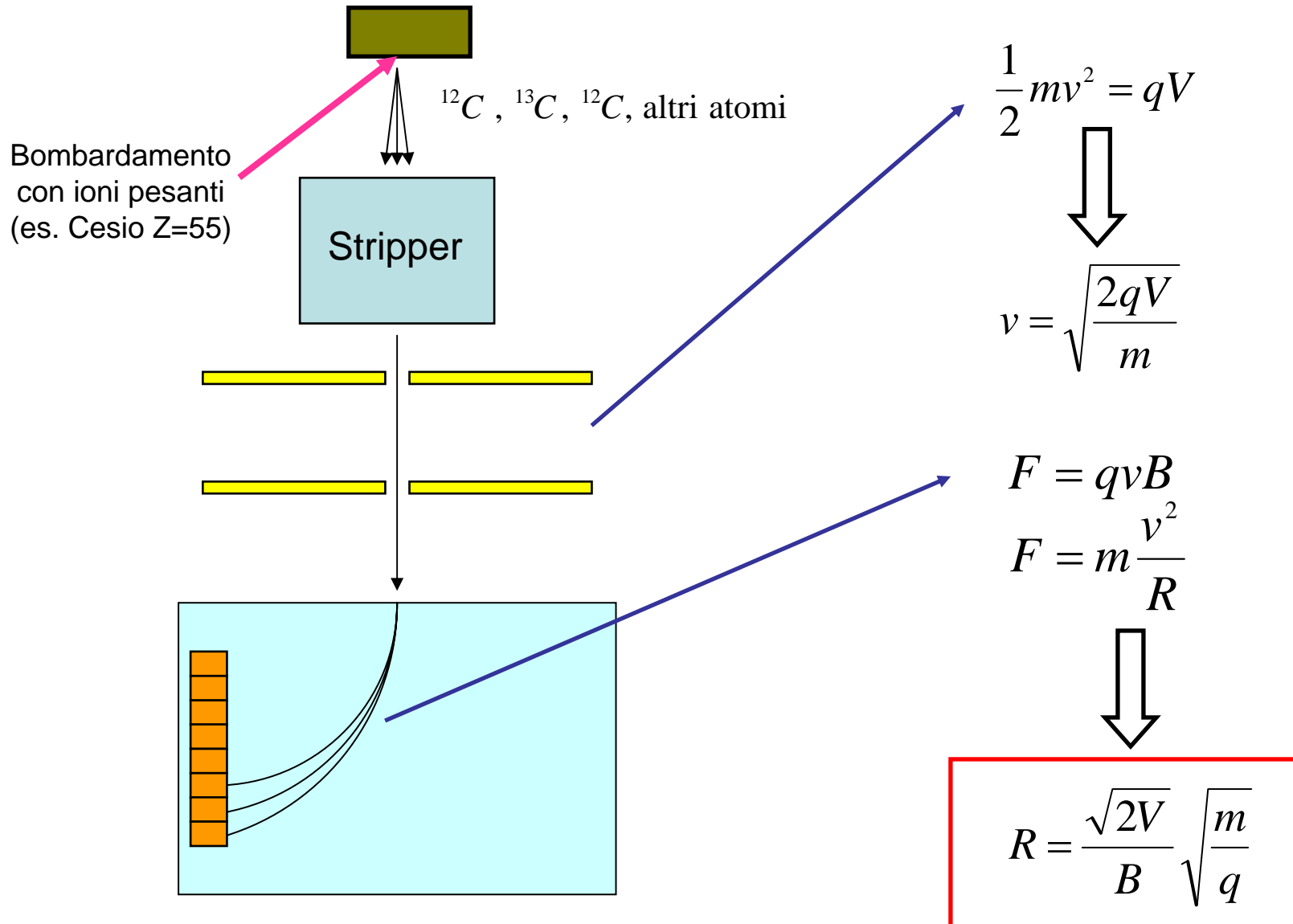


$$t = -\frac{T}{0.693} \ln \left( \frac{A(t)}{A_0} \right)$$

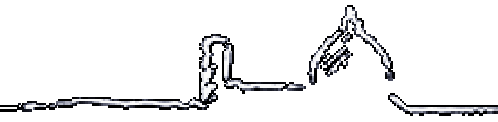
$$t = -\frac{T}{0.693} \ln \left( \frac{\frac{A_{^{14}\text{C}}}{A_{^{12}\text{C}}}}{\left( \frac{A_{^{14}\text{C}}}{A_{^{12}\text{C}}} \right)_{eq}} \right)$$

$$t = -\frac{T}{0.693} \ln \left( \frac{\frac{A_{^{14}\text{C}}}{A_{^{12}\text{C}}}}{1.176 \times 10^{-12}} \right)$$

# Metodo della spettrografia di massa



AMS (Atomic Mass Spectroscopy)



$$\frac{A_{^{14}\text{C}}}{A_{^{12}\text{C}}} = 1.176 \times 10^{-12}$$

**Costante per tutti gli esseri viventi!**

**Costante nel tempo!**



**Correzione  $\delta_{^{13}\text{C}}$**



**Curve di calibrazione**



Se la concentrazione del  $^{14}\text{C}$  in aria è costante e gli esseri viventi non distinguono tra  $^{14}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$  allora:

$$\frac{A_{^{14}\text{C}}}{A_{^{12}\text{C}}} = \text{cost} = 1.176 \times 10^{-12}$$





Il  $^{14}\text{C}$  viene assorbito in maniera leggermente dal  $^{12}\text{C}$ ,  
questa differenza è diversa da essere vivente a essere vivente

$$\delta_{14}\text{C}$$

Anche il  $^{13}\text{C}$  è assorbito in maniera leggermente diversa

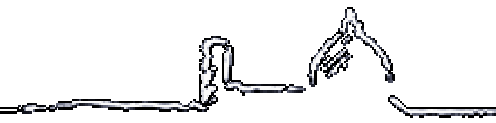
$$\delta_{13}\text{C}$$

Studi sperimentali su un gran numero di esseri viventi hanno dimostrato

$$\delta_{14}\text{C} = 2\delta_{13}\text{C}$$

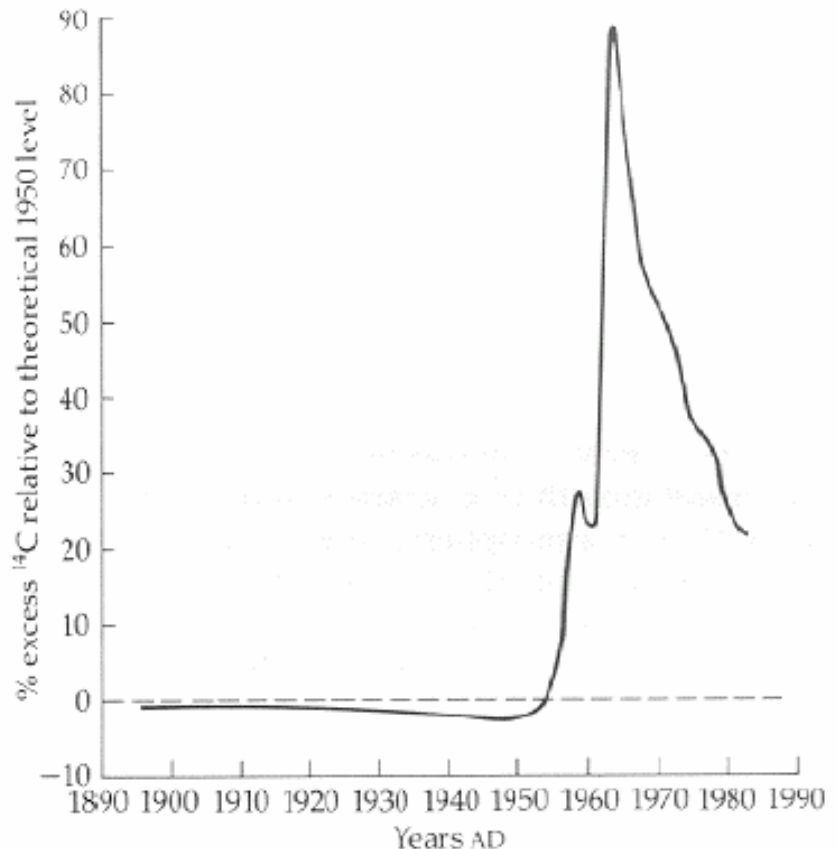
Il  $^{13}\text{C}$  è stabile come il  $^{12}\text{C}$ ,  
la sua variazione di concentrazione può essere misurata  
con la spettrografia di massa

# Curve di calibrazione



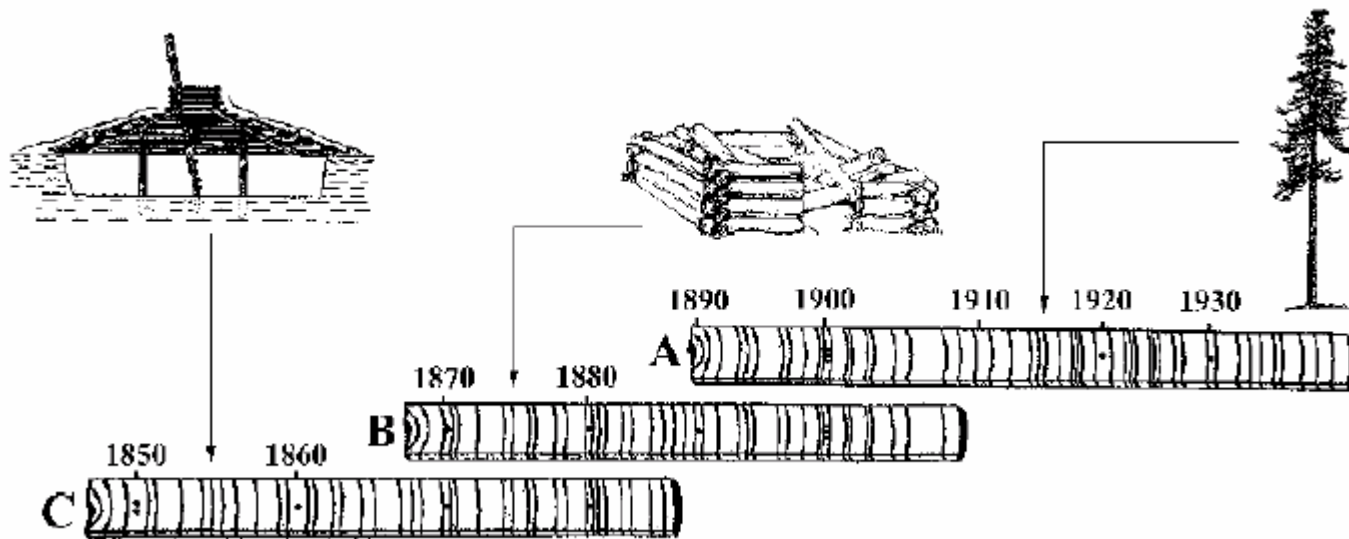
La concentrazione di  $^{14}\text{C}$  nell'atmosfera al tempo della morte dell'organismo vivente può essere stata diversa dall'attuale concentrazione

- 1) Aumento della temperatura
- 2) Uso di combustibili fossili
- 3) Esplosioni nucleari in atmosfera
- 4) Raggi cosmici?
- 5) Attività solare?
- 6) Campo magnetico?



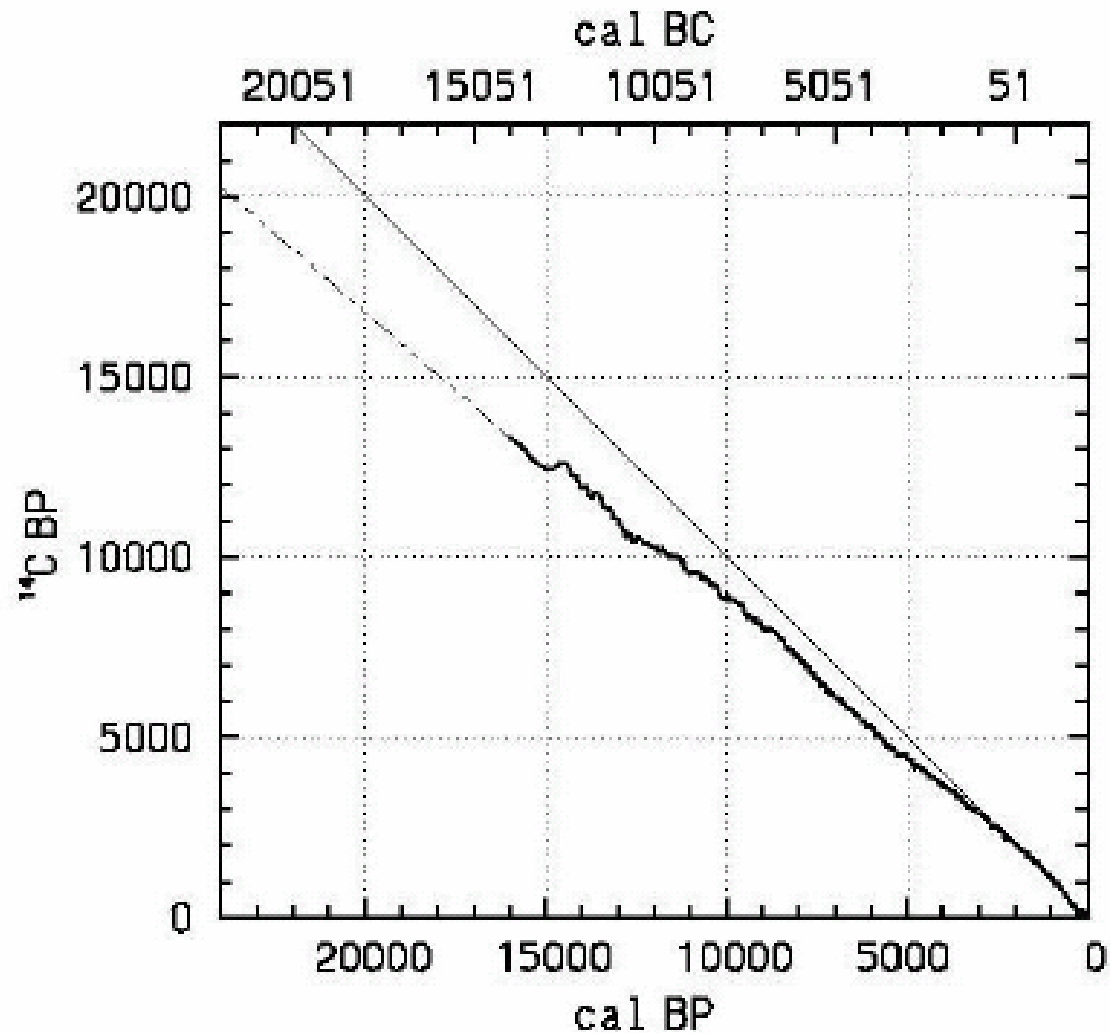


## Dendrocronologia



# Curve di calibrazione

- Dendrocronologia
- Depositi di coralli
- Stalagmiti



Copyright 1999 Quaternary Isotope Lab, University of Washington

## Esempio: Sindone, 1988

### Metodo del “doppio cieco”: 4 campioni

**Campione 2:** lino da una tomba a Qasr Ibrim in Numidia scavata nel 1964.

Sulla base delle iscrizioni trovate il lino è datato tra il XI e il XII

**Datazione 14C: 1026-1160 dC**

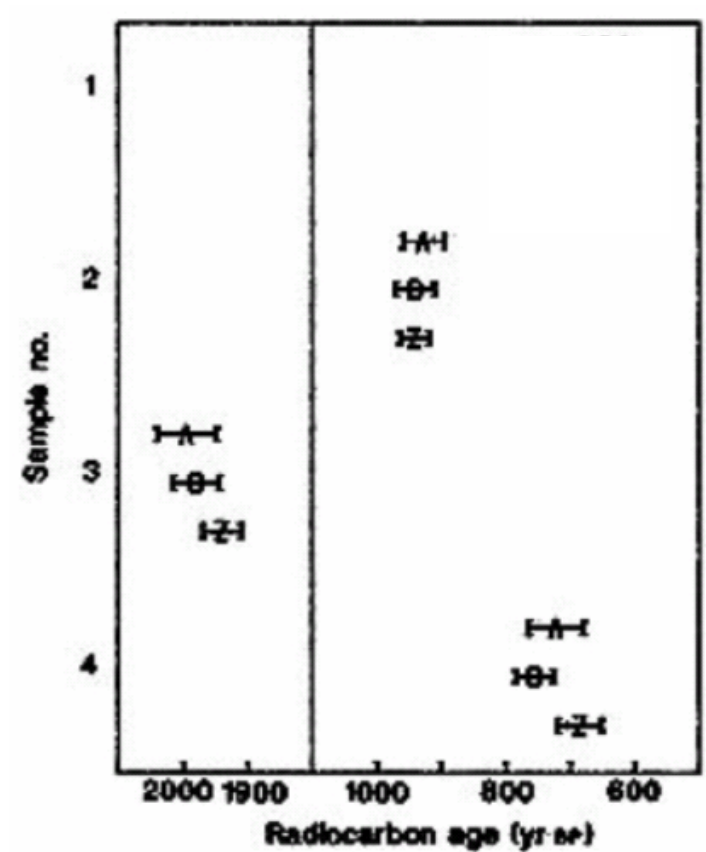
**Campione 3:** lino della mummia di Cleopatra (Tebe) della collezione del British Museum.

Datato precedentemente con radiocarbonio:  
140 aC – 20 dC

**Datazione 14C: 78 aC – 9 dC**

**Campione 4:** Cappa di San Luigi d'Angiò nella Basilica di S. Massimino a Var (Francia). Datato sulla base di dettagli stilistici e documentazione storica: 1290-1310 dC

**Datazione 14C: 1263 dC – 1283 dC**



# Esempio: Sindone

## Campione 1: Sindone

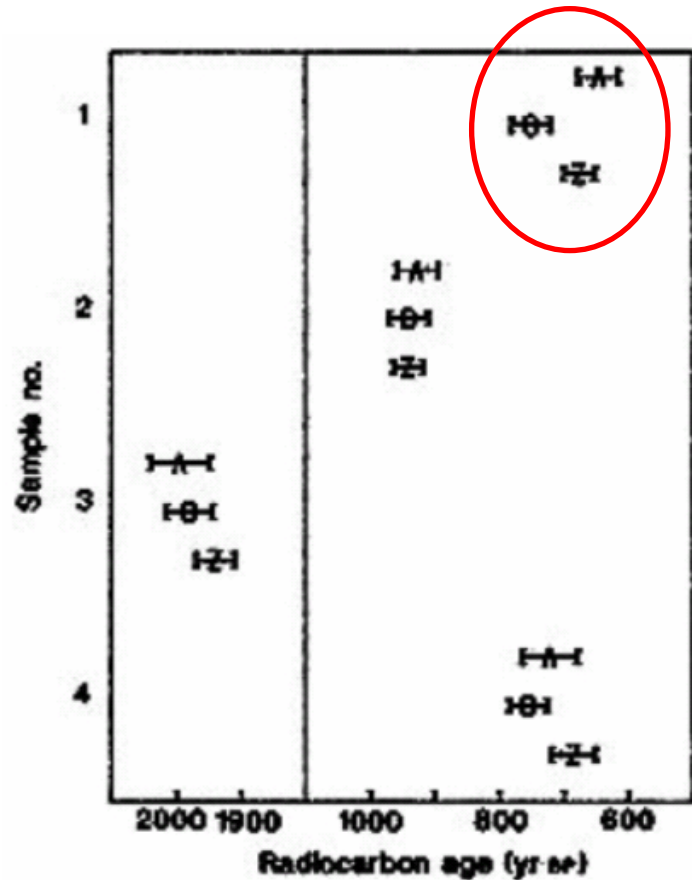
**Datazione  $^{14}\text{C}$ : 1353-1384 dC**

La documentazione sulla Sindone inizia a Bisanzio nel XV secolo

Bisanzio tra il XI-XIV ha una fiorente industria per la produzione di reliquie, stimolata dal flusso di pellegrini e crociati in terra santa, che si avvale delle più avanzate tecniche del tempo per la falsificazione, sviluppate in tre secoli di attività.

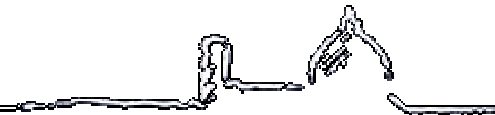
La Sindone è un vero **capolavoro**:

Anatomia accurata (impiego di un calco umano?),  
presenza di sangue umano maschile AB  
Tratto appena percettibile



**I conservatori della Sindone  
non permettono ulteriori analisi scientifiche**

# Esempio: Sindone



## La polemica che ne è seguita:

### Incendio del contenitore

Kouznetsov, 1996 (pubblicato con riserva)

L'incendio di Chambéry potrebbe aver alterato i dati

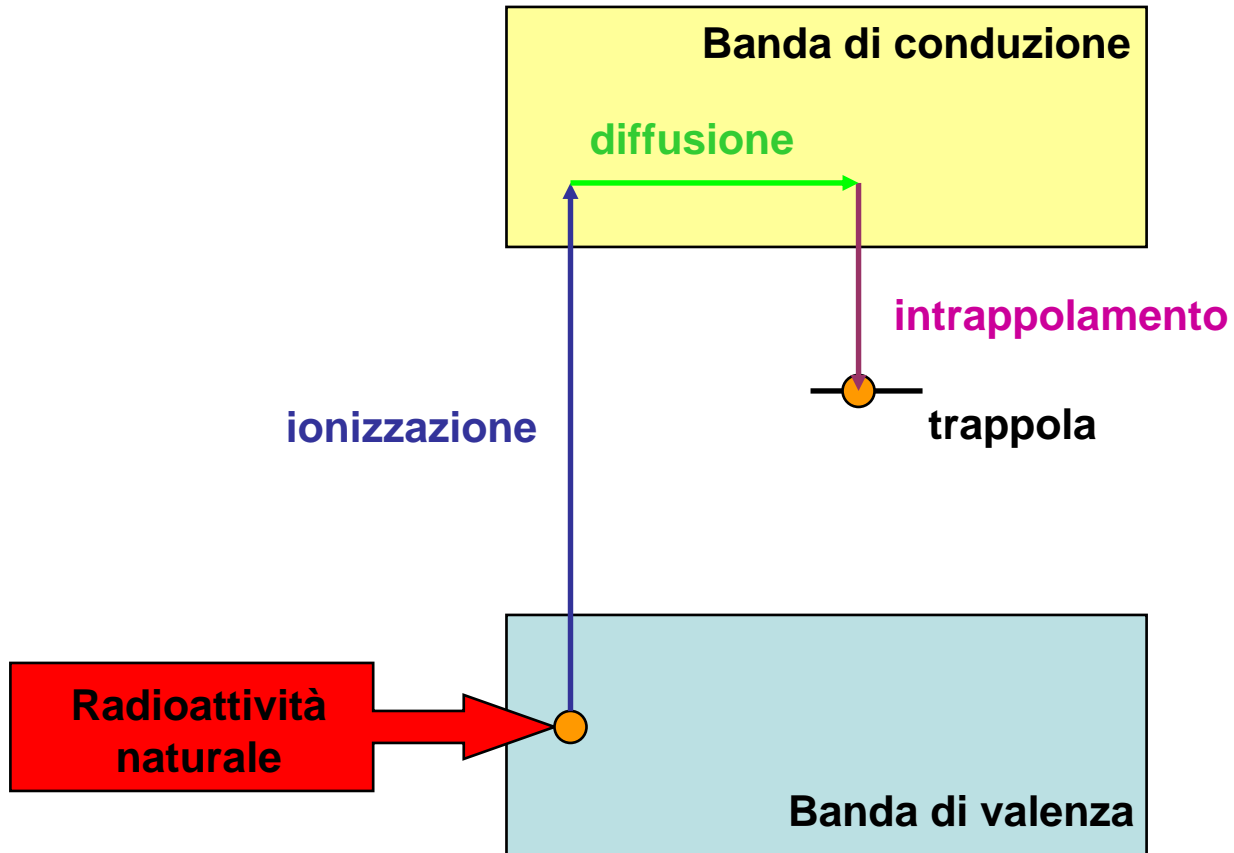
Long, 1998

Sulla base di prove sperimentali si smentisce questa possibilità

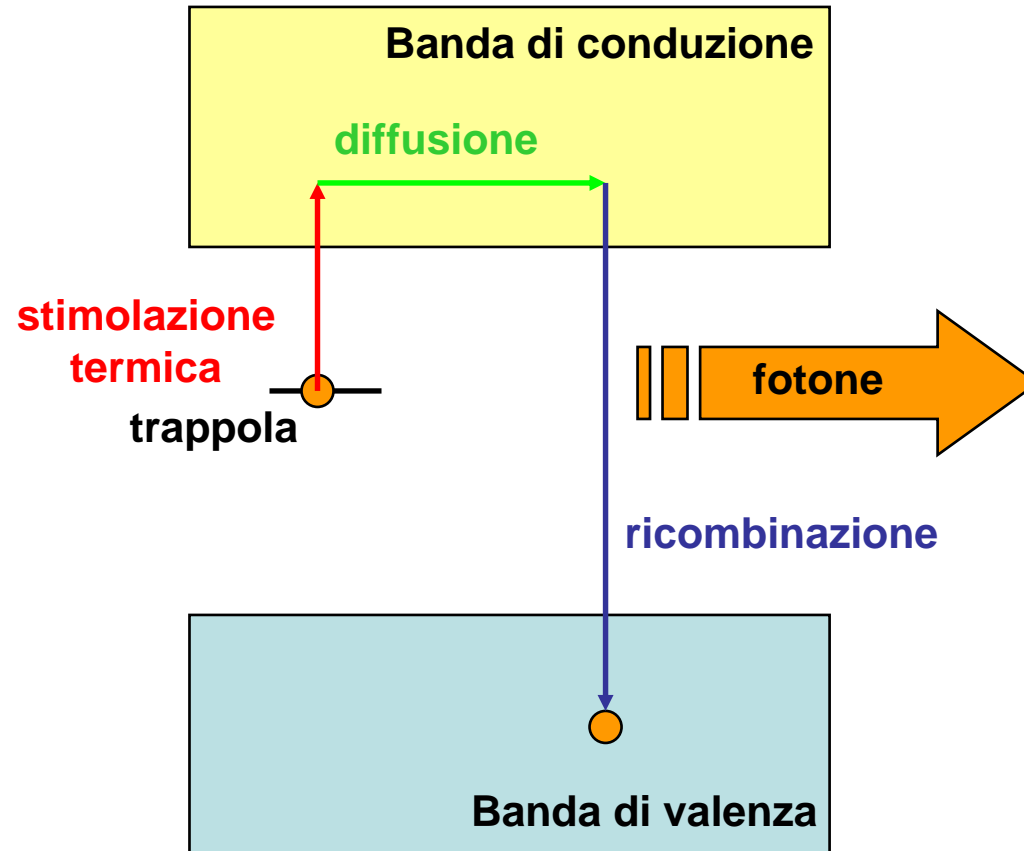
### Presenza contaminanti più recenti (funghi)

Per poter fornire una tale differenza di datazione, il fungo dovrebbe essere presente in quantità doppia rispetto al tessuto originale!

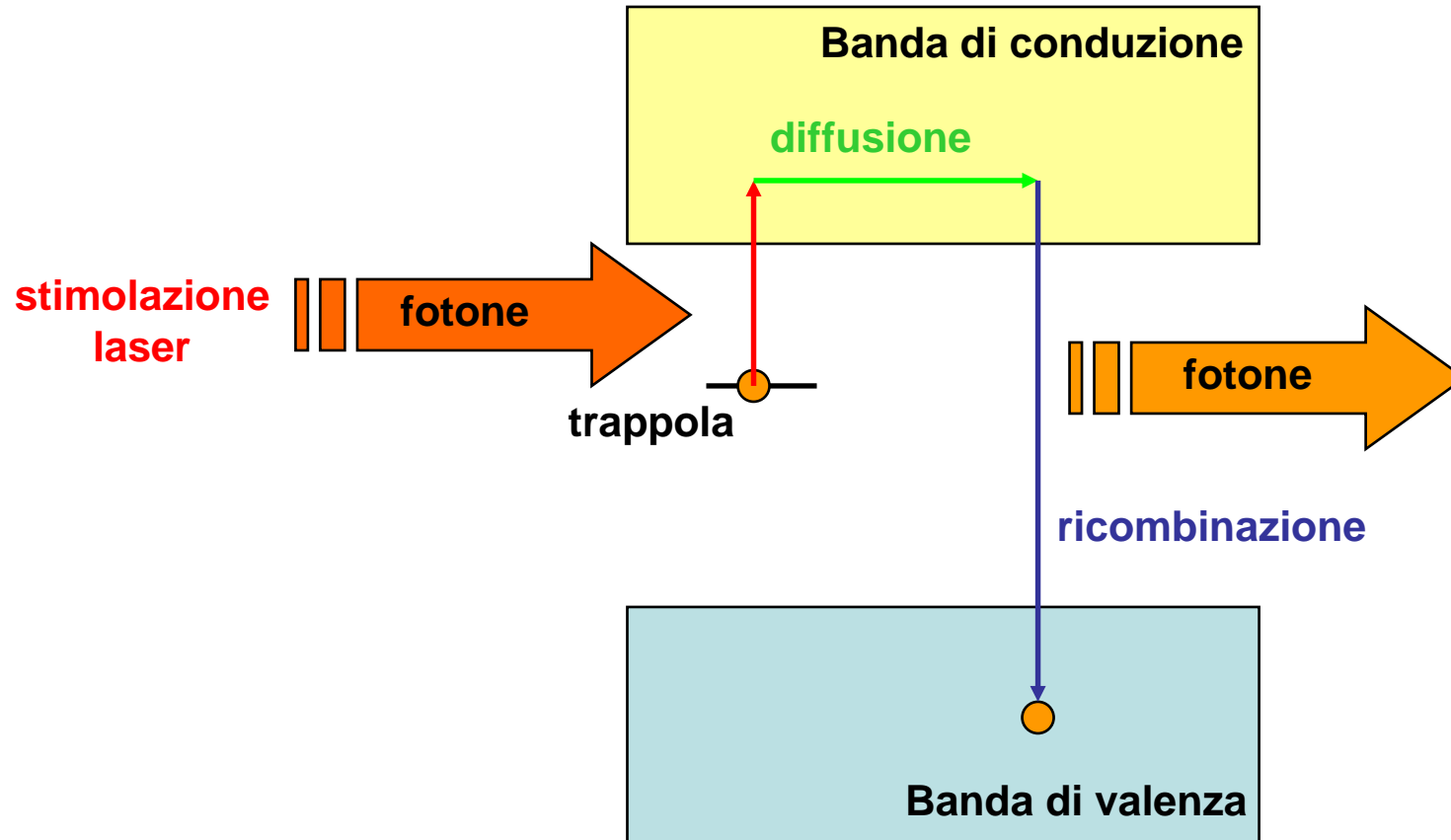
### Il fenomeno della risurrezione produce neutroni energetici

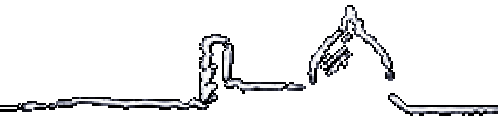






## OSL (Optical Stimulated Luminescence)



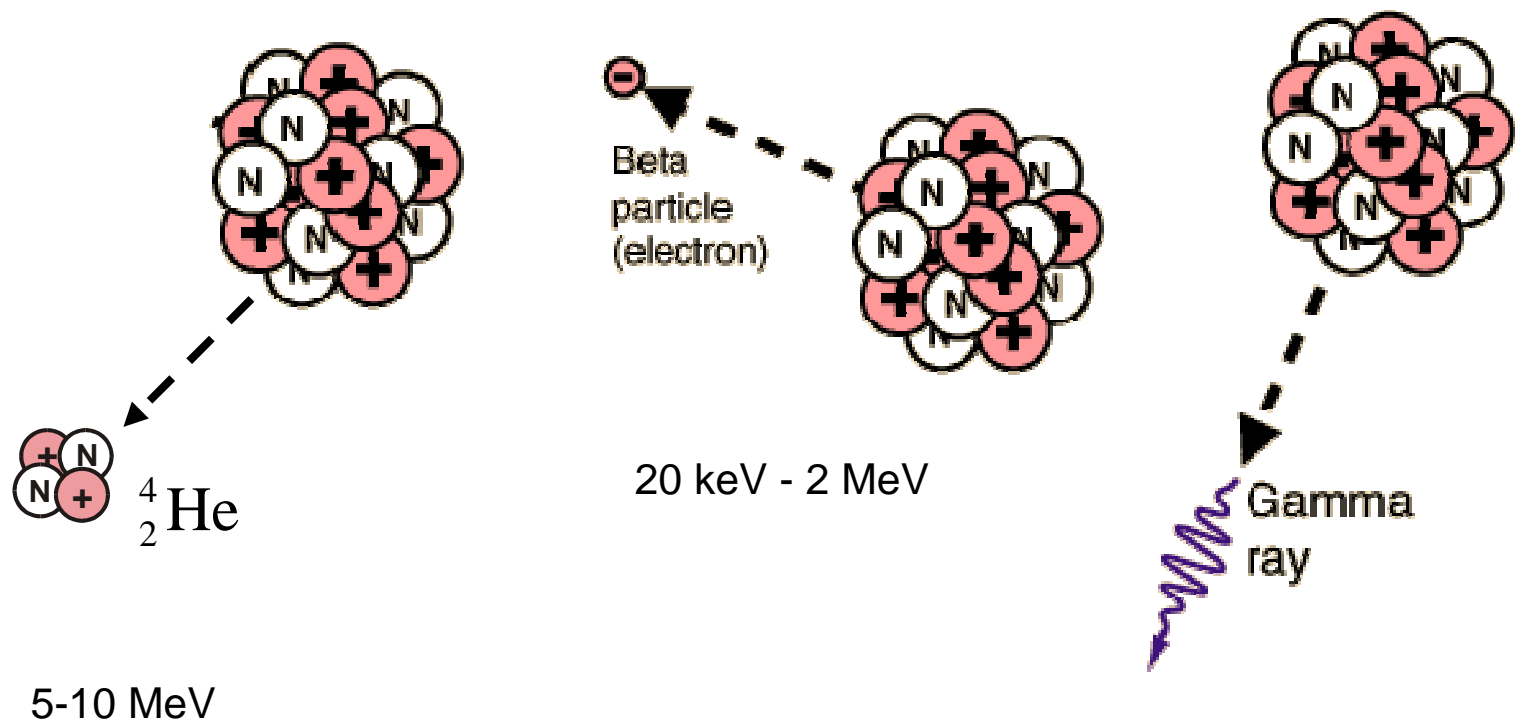


Qualsiasi cosa contenga argilla o terra  
ed è stato cotto a temperatura maggiore di 500 °C

- Ceramiche
- Mattoni laterizi
- Pietre da focolare
- Selci riscaldate
- Terra di fusione
- Antiche fornaci metallurgiche
- Tavolette cuneiformi



- Naturale (presenza di atomi radioattivi) 90%
- Raggi cosmici 10%

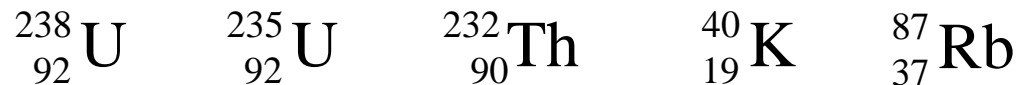


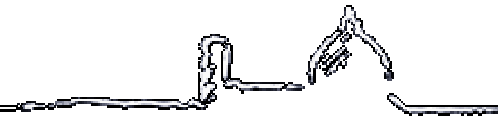


Quando un atomo emette una particella  $\alpha$  o  $\beta$  cambia il numero atomico e si trasforma in un altro atomo, che può essere ancora instabile, quindi emettere una particella  $\alpha$  o  $\beta$  cambiare ancora numero atomico e così via fino a un atomo stabile

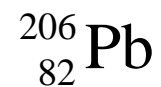
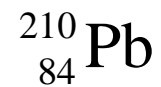
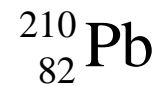
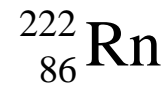
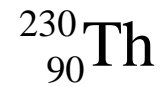
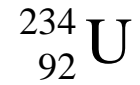
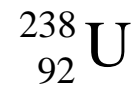
Si possono definire famiglie radioattive che sono successioni di atomi instabili

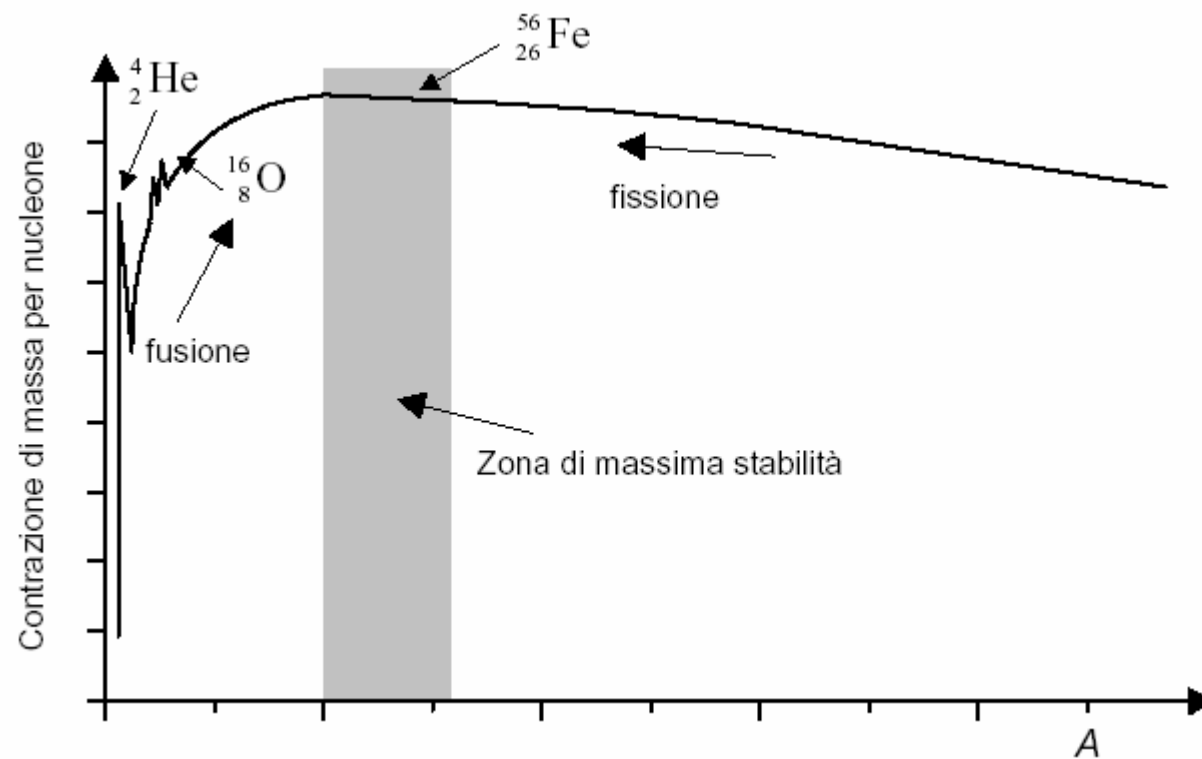
Le famiglie radioattive sono 5 e prendono il nome dall'atomo instabile capostipite





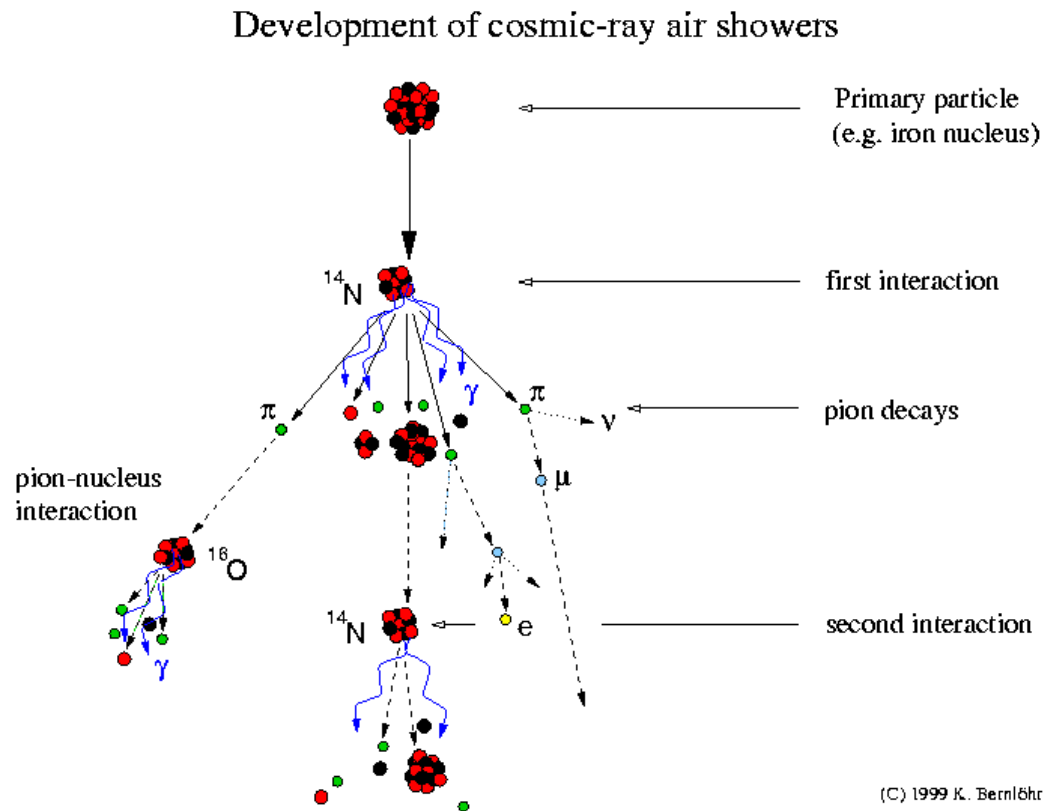
Famiglia del  $^{238}_{92}\text{U}$

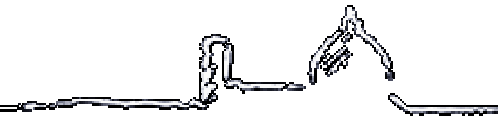






Protoni  
(particelle alfa e nuclei pesanti)





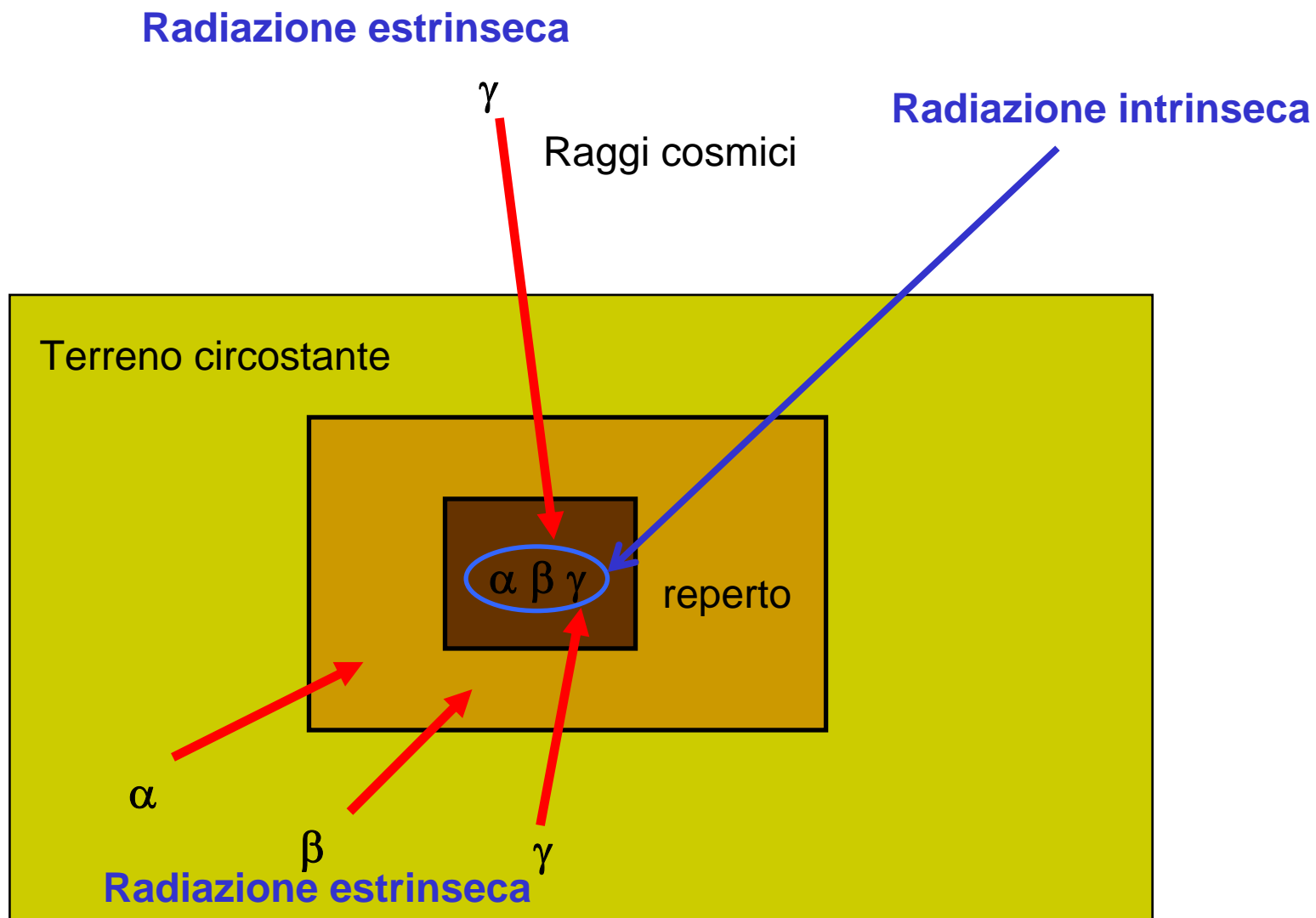
Sorgenti estrinseche

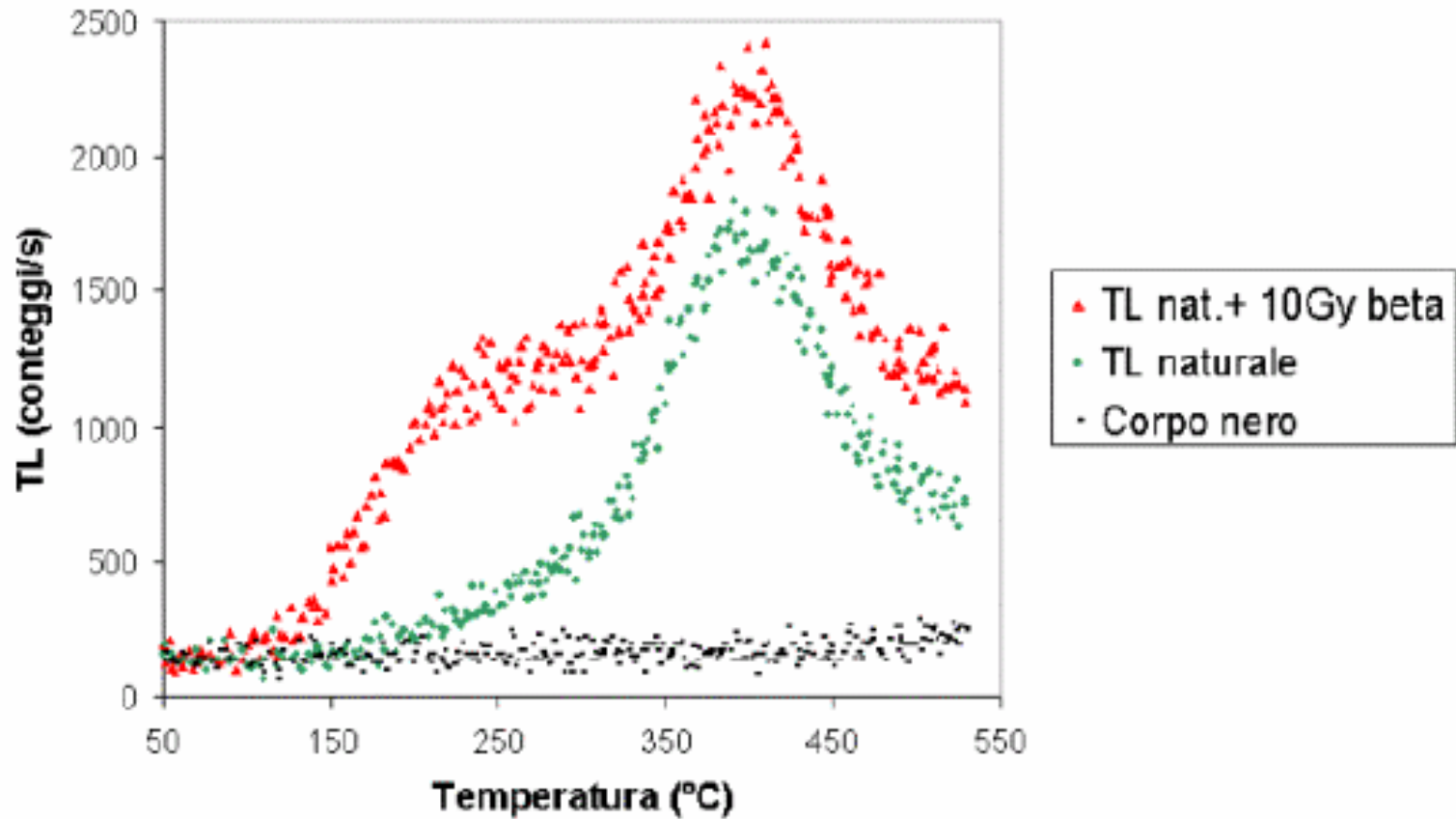
Sorgenti intrinseche

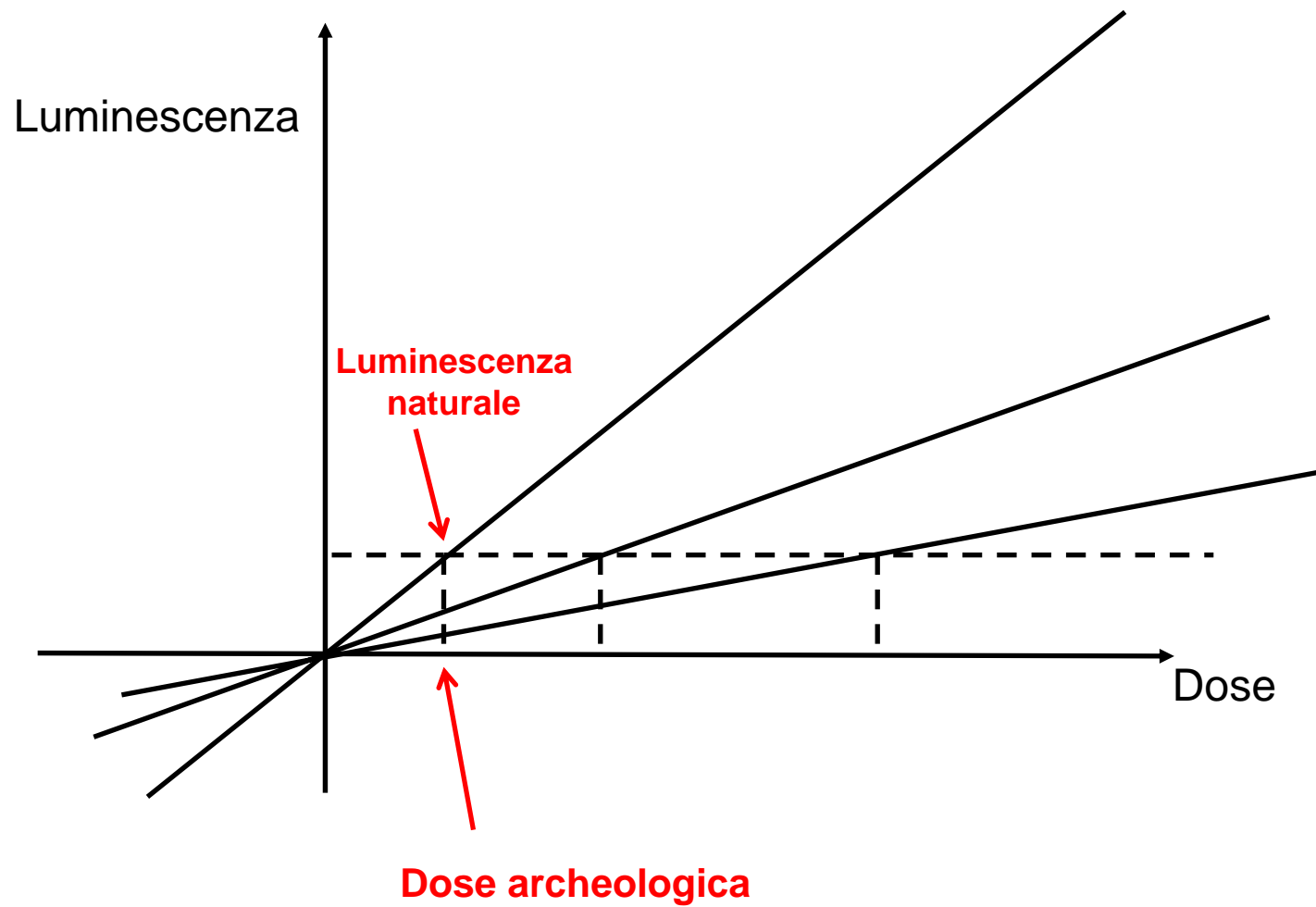
$$1 \text{ Gray} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ Kg}}$$

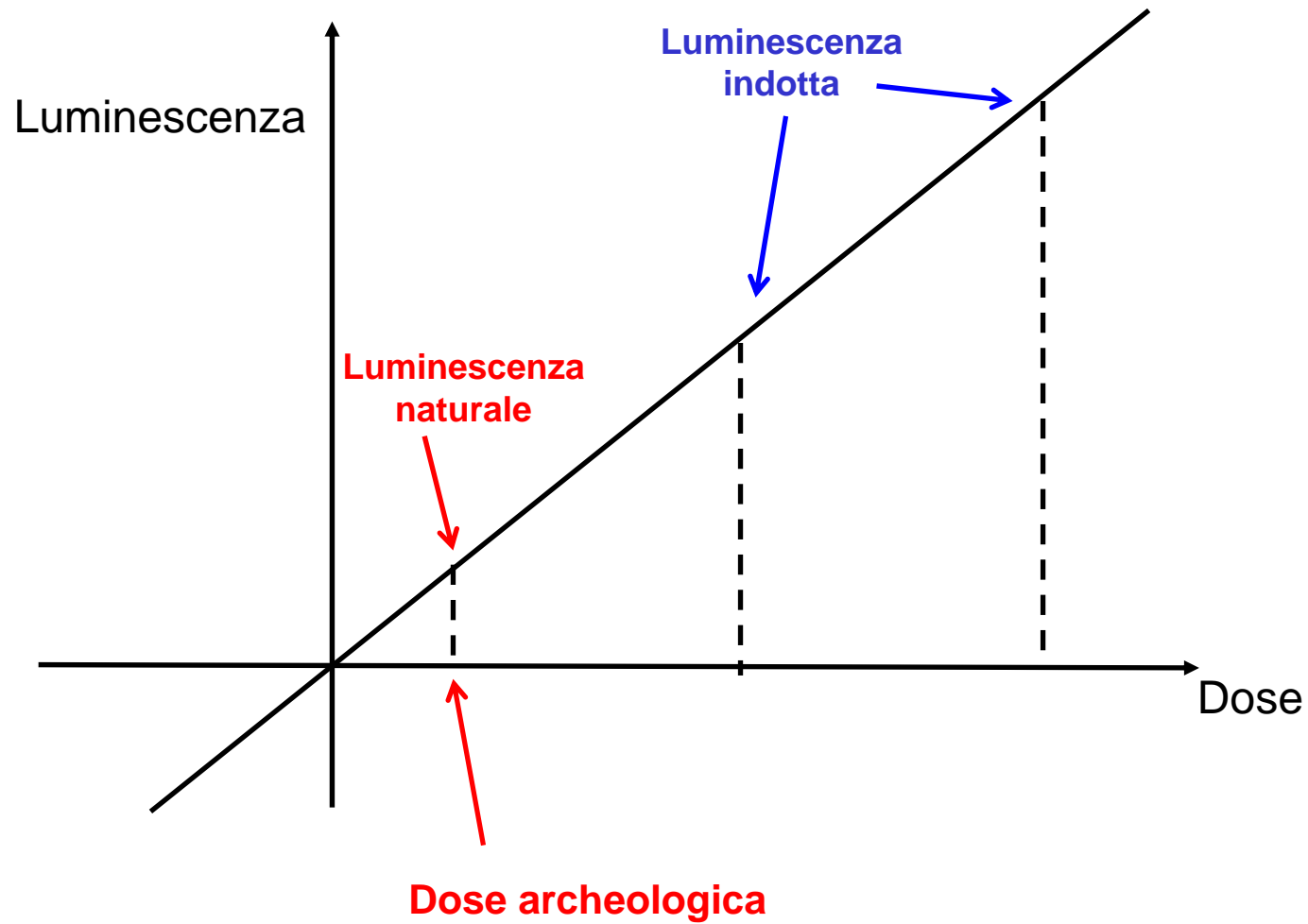
Ordine di grandezza della dose assorbita dall'ambiente 10mGy/y

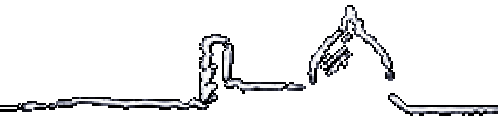
Radiografia: 1mGy











$$\text{Età} = \frac{\text{dose}}{\text{dose annuale}}$$

Dose annuale = Radioattività intrinseca + Radioattività estrinseca

Dosimetro  
TLD: ThermoLuminescence Dosimeter



Smorzamento anomalo (Anomalous Fading)

Disomogeneità del terreno

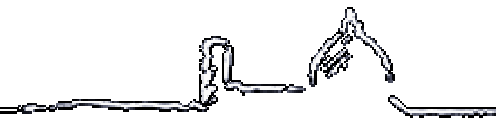
Presenza di acqua

Radon





Datazione dei legnami



## Campo di applicazione

Il campo di applicazione è attualmente ideale per età comprese tra i **20 e i 800 anni**. Il margine d'errore della datazione è mediamente di  $\pm 10$  **anni**, aumenta con l'età del campione e può raggiungere dopo i 800 anni di età un errore anche di  $\pm 50$  **anni**.

L'analisi spettroscopica riconosce la maggior parte dei tipi di legno comunemente impiegati

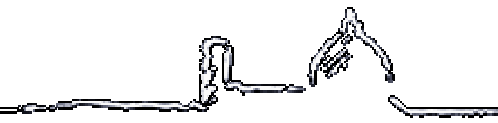
## Possibili problemi

Legni di oggetti esposti a prolungati **periodi di congelamento**, come le travi di ruderi in montagna, che rallentano i processi chimici d'invecchiamento, danno risultati che devono essere corretti.

**Legni di provenienza tropicale o equatoriale** che si trovano da molti anni in Europa o in altre zone con clima mite, danno risultati spettroscopici di un'età minore e debbono essere corretti.

**essenze** raramente utilizzate ed altre caratterizzate da composizioni chimiche particolarmente complesse.

La composizione chimica del legno viene modificata dal **tarlo** che consuma soprattutto alcune molecole specifiche.



Radiocarbonio

**Metodi nucleari**

Termoluminescenza

Altri isotopi

**Età della solidificazione delle rocce**

Risonanza magnetica

**Elettroni spaiati (10000 anni-1 milione di anni)**

Dendrocronologia

Astronomia

Archeomagnetismo

**Ferriti**

Racemizzazione

**Ossa capelli unghie (levogire → destrogire, temperatura)**

Idratazione delle ossidane

Spettroscopia molecolare

**Legno 20-800 anni ( $\pm 10$  anni)**