



Università della Terza Età "Cardinale  
Giovanni Colombo" - Milano

A. A. 2022 - 2023

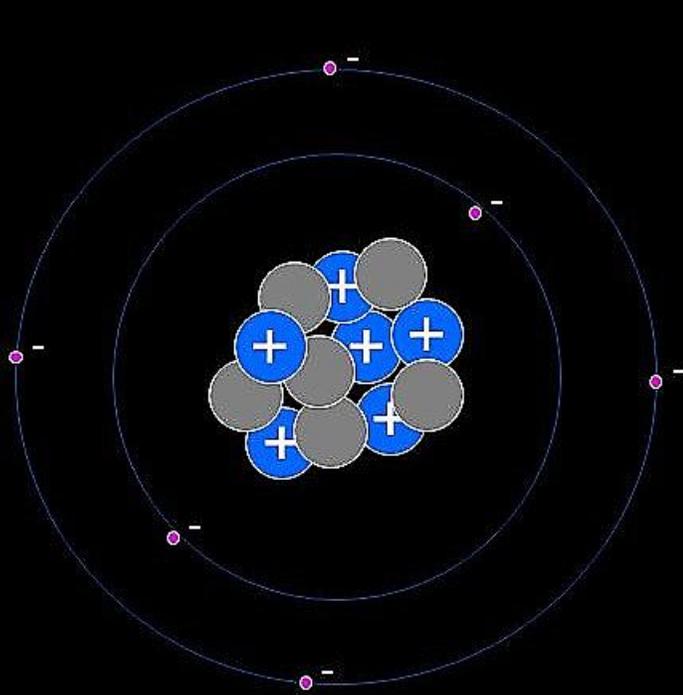
Corso di Archeoastronomia

Docente:

Adriano Gaspani

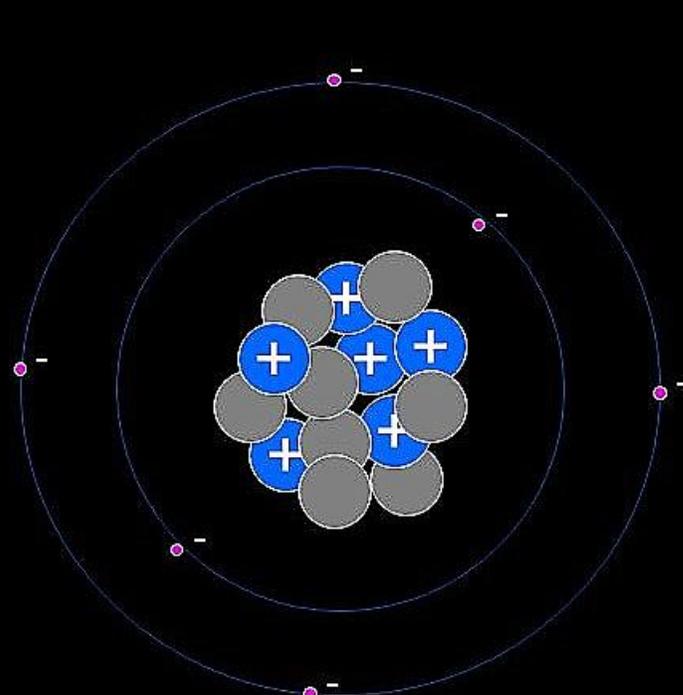
# La datazione dei reperti archeologici

# Principi generali della datazione radiometrica al C14



(carbonio 12)

**stabile**

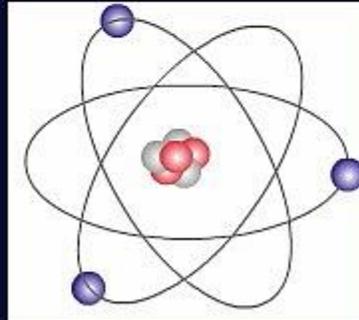


(carbonio 14)

**radioattivo**

La radioattività o ***decadimento radioattivo*** è la transizione di alcuni nuclei atomici instabili verso uno stato avente energia minore, attraverso l'emissione di una o più particelle.

L'atomo radioattivo si trasforma quindi in un altro atomo, che può essere a sua volta radioattivo oppure stabile.



Ogni atomo è formato da un nucleo contenente protoni e neutroni, e dagli elettroni, che «orbitano» attorno al nucleo.

Se il nucleo è *instabile* tende spontaneamente a decadere in una configurazione più stabile di minore energia, emettendo una o più particelle.

Molti isotopi esistenti in natura sono stabili, ma alcuni isotopi naturali e buona parte di quelli artificiali sono instabili. Gli isotopi instabili sono detti isotopi radioattivi o ***radionuclidi***.

Il momento esatto in cui un atomo instabile decadrà è assolutamente casuale.

Si osserva però che, dato un campione di un particolare isotopo, il numero di decadimenti rispetta una precisa legge statistica.

In media il numero di decadimenti in un intervallo di tempo  $\Delta t$  è proporzionale al numero  $N(t)$  di atomi presenti.

$N(t)$  = numero di atomi del campione di un isotopo all'istante  $t$ ;

$\lambda$  = costante di decadimento dell'isotopo = probabilità che un atomo dell'isotopo decada in un secondo.

Applichiamo la definizione di probabilità

$$\lambda = \frac{\textit{atomi decaduti in un secondo}}{N(t)}$$

da cui si ricavano

$$\textit{atomi decaduti in } \underline{\textit{un secondo}} = \lambda \cdot N(t)$$

$$\textit{atomi decaduti in } h \textit{ secondi} = h \cdot \lambda \cdot N(t)$$

$$\lambda = \frac{\textit{atomi decaduti in un secondo}}{N(t)}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \tau = \textit{vita media}$$

**Vita media  $\tau$  = tempo dopo il quale rimangono il 37 % dei nuclei (=1/e)**

**Periodo di dimezzamento  $T_{1/2}$  = tempo dopo il quale rimangono il 50 % dei nuclei**

## Calcolo del valore associato alla Vita media $\tau$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \tau = \text{vita media}$$

Vita media  $\tau$  = tempo dopo il quale rimangono il 37 % dei nuclei (=1/e)

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

Dopo un tempo  $t = \tau$

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

## Calcolo del valore associato alla Vita media $\tau$

$$\tau = \text{vita media}$$

Vita media  $\tau$  = tempo dopo il quale rimangono il 37 % dei nuclei  
(=1/e)

Dopo un tempo  $t = \tau$

$$N(\tau) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \tau} \quad -\lambda \cdot \tau = -1$$

$$N(\tau) = N_0 \cdot e^{-1}$$

$$N(\tau) = N_0 \cdot e^{-1}$$

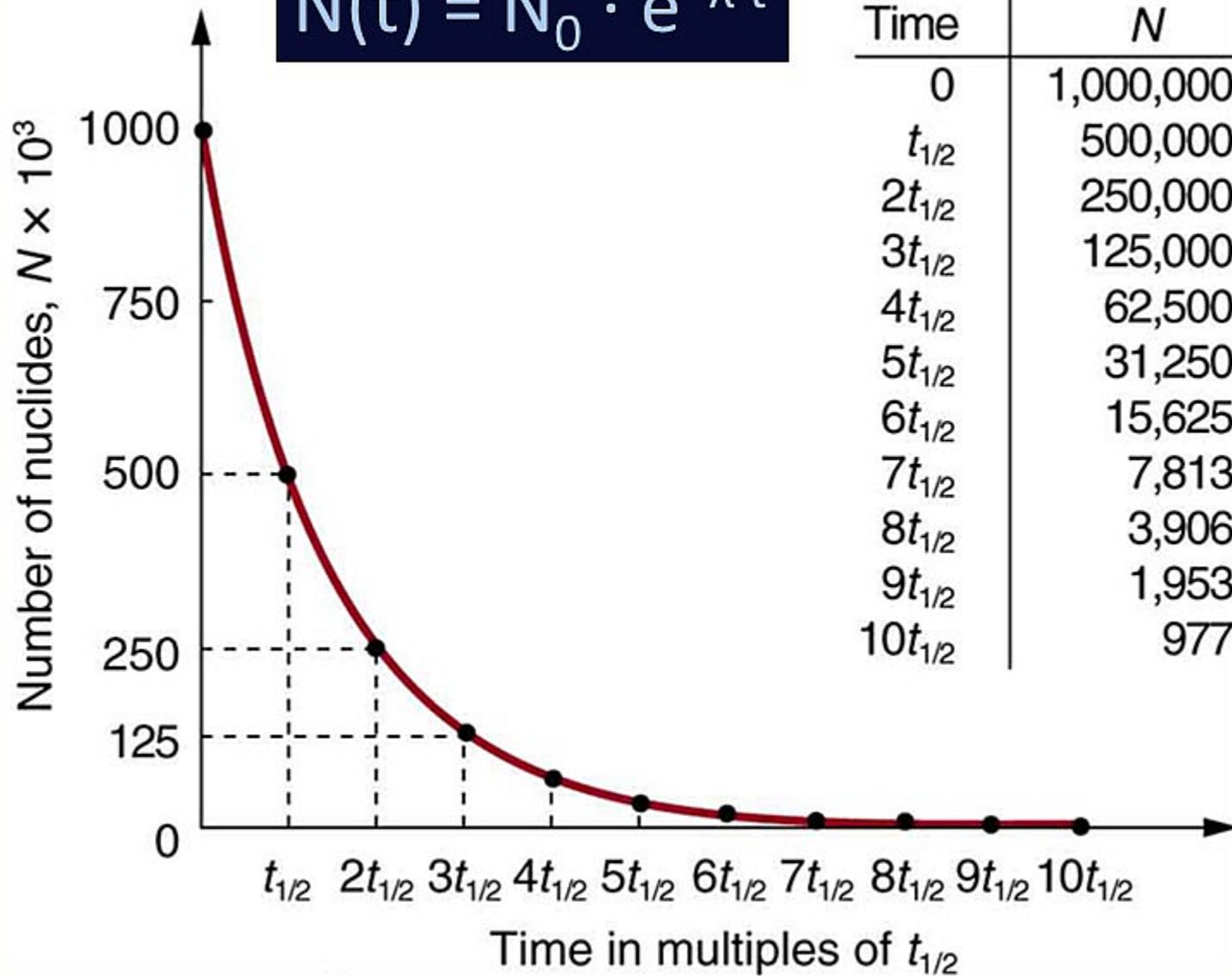
$$N(\tau) = \frac{N_0}{e}$$

$$\frac{N(\tau)}{N_0} = \frac{1}{e} = \frac{1}{2,71828} = 0,37$$

Indichiamo con  $N_0$  il numero di atomi presenti nel campione all'istante iniziale  $t = 0$ .

$N_0$  è una costante determinabile a partire dal campione dell'isotopo radioattivo preso in esame.

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



I radionuclidi hanno moltissime applicazioni  
in campo scientifico

*il carbonio-14* viene utilizzato per la datazione di  
fossili, rocce e reperti archeologici;

reperti organici...

Il metodo del  $^{14}\text{C}$  permette di datare reperti di origine organica (ossa, legno, fibre tessili, semi, carboni di legno) di età compresa tra i 100 e i 50.000 anni.

Fu ideato tra il 1945 e il 1955 dal chimico statunitense Willard Frank Libby, che per questa scoperta vinse il Premio Nobel nel 1960.



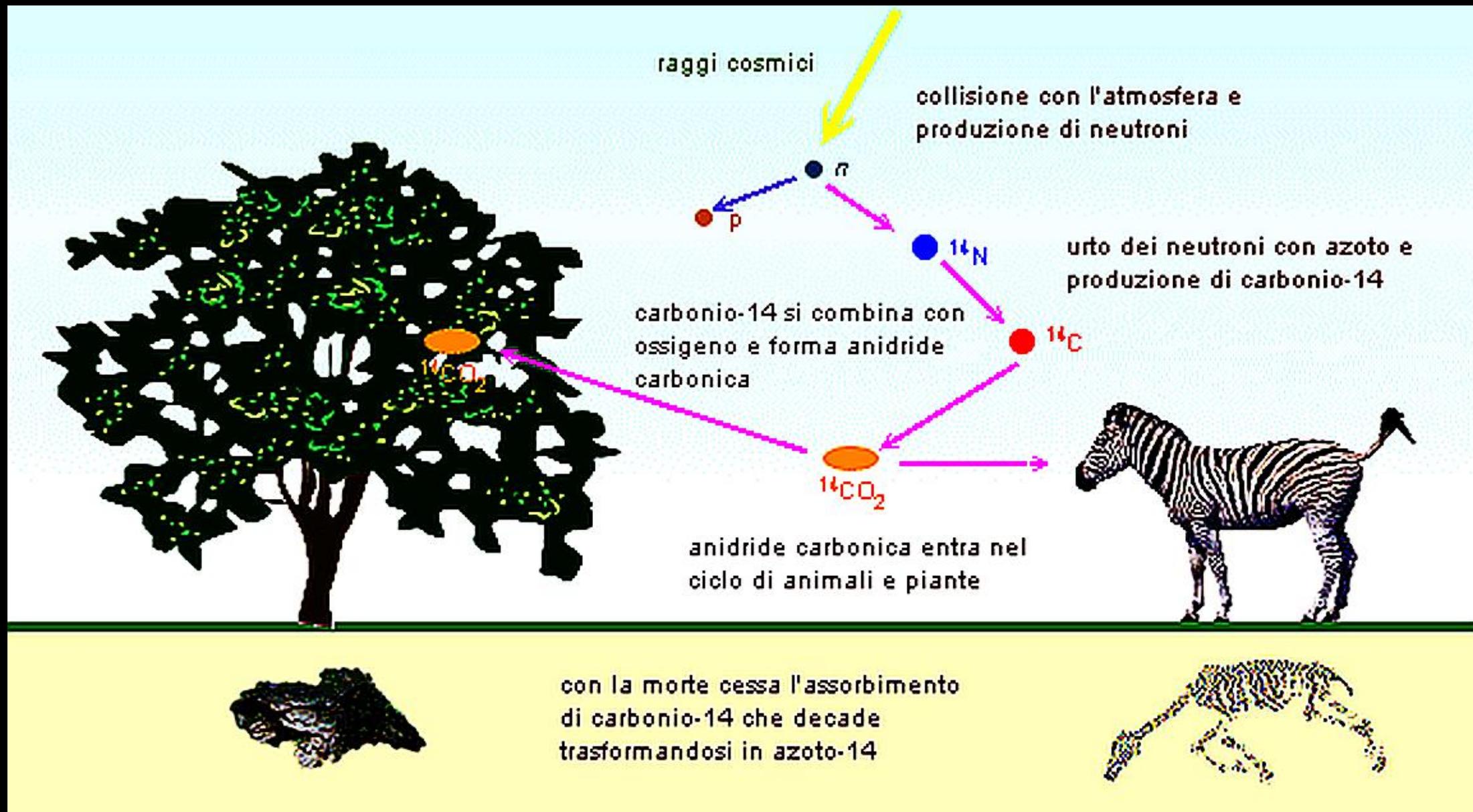
In natura l'isotopo del carbonio avente numero di massa 14 ( $^{14}\text{C}$ ) è instabile (ha 6 protoni e 8 neutroni), quindi decade radioattivamente: per questo motivo viene anche chiamato radiocarbonio

I due neutroni in eccesso decadono in un elettrone e in un protone ciascuno; i due elettroni di troppo vengono espulsi e l'atomo diventa stabile (7 protoni e 7 neutroni) , Azoto.

## Come si forma il $^{14}\text{C}$ ?

I neutroni prodotti dai raggi cosmici negli strati alti dell'atmosfera si combinano con l'azoto e producono  $^{14}\text{C}$ . Il radiocarbonio si combina con l'ossigeno e si muove liberamente nell'atmosfera sotto forma di anidride carbonica. In questo modo viene assorbito dalle piante e dai tessuti degli animali.

# processo di formazione del C14



Tutti gli organismi viventi scambiano continuamente carbonio con l'atmosfera attraverso processi di respirazione (animali) o fotosintesi (vegetali), oppure lo assimilano nutrendosi di altri esseri viventi o sostanze organiche. Mentre sono vivi, gli organismi mantengono un equilibrio tra il decadimento e l'assorbimento di nuovo  $^{14}\text{C}$ , la cui concentrazione è uguale a quella che si riscontra nell'atmosfera.

**Organismo vivo:  
assorbe C14 e parte  
di esso decade**

**Organismo morto: il  
C14 solamente  
decade**

Dopo la morte l'organismo non assorbe più  $^{14}\text{C}$ , così la quantità dell'isotopo  $^{14}\text{C}$  diminuisce nel tempo secondo la legge

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

il tasso di decadimento  $\lambda$  dell'isotopo  $^{14}\text{C}$  è una costante determinata sperimentalmente;

Dopo la morte l'organismo non assorbe più  $^{14}\text{C}$ , così la quantità dell'isotopo  $^{14}\text{C}$  diminuisce nel tempo secondo la legge

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

il tasso di decadimento  $\lambda$  dell'isotopo  $^{14}\text{C}$  è una costante determinata sperimentalmente;

il tempo iniziale  $t = 0$  coincide con la morte dell'organismo

$N_0$  = numero di atomi di  $^{14}\text{C}$  nell'organismo vivente

$N(t)$  = numero di atomi di  $^{14}\text{C}$  al giorno d'oggi (dopo  $t$  anni dalla morte dell'organismo).  $N(t)$  si misura a partire da un campione del reperto da datare.

Possiamo quindi determinare quanto tempo è  
intercorso dalla morte di un dato organismo.

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

L'incognita da determinare è  $t$

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

Possiamo quindi determinare quanto tempo è  
intercorso dalla morte di un dato organismo.

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

L'incognita da determinare è  $t$

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

L'incognita da determinare è  $t$

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

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

$$\ln[N(t)] = \ln N_0 + \ln(e^{-\lambda \cdot t})$$

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

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

$$\ln[N(t)] - \ln N_0 = -\lambda \cdot t \ln e$$

E poiché  $\ln e = 1$

$$\ln[N(t)] - \ln N_0 = -\lambda \cdot t$$

Da cui

$$\ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda \cdot t$$

$$-\lambda \cdot t = \ln \frac{N(t)}{N_0}$$

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N(t)}{N_0}$$

## Formula per la datazione con il metodo del $^{14}\text{C}$

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N(t)}{N_0}$$

Grazie a questa formula è possibile ricavare l'età di un dato resto organico misurando la quantità di  $^{14}\text{C}$  presente nel campione.

$$\tau = \text{vita media} \quad \tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N(t)}{N_0}$$

Grazie a questa formula è possibile ricavare l'età di un resto organico misurando la quantità di  $^{14}\text{C}$  presente nel campione.

Come si usa?

$\tau = \text{vita media}$

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

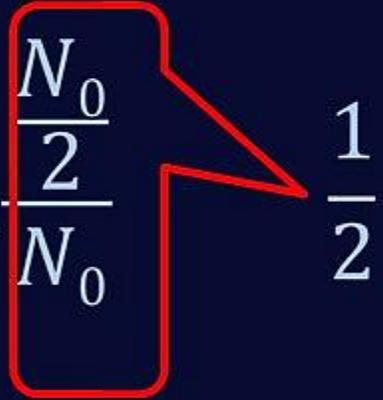
**Vita media  $\tau$  = tempo dopo il quale rimangono il 37 % dei nuclei (=1/e)**

**Periodo di dimezzamento  $T_{1/2}$  = tempo dopo il quale rimangono il 50 % dei nuclei**

Come si calcola il tempo di dimezzamento

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N(t)}{N_0}$$

$$N(t) = \frac{N_0}{2}$$

$$t\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\frac{N_0}{2}}{N_0} = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{2}$$


$$t\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{2} \quad 2^{-1}$$

$$t\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{\lambda} \ln(2^{-1})$$

$$t\left(\frac{1}{2}\right) = -(-1) \frac{1}{\lambda} \ln 2$$

$$t\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\lambda} \ln 2 \quad 0,693$$

$$t\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\lambda} \ln 2 \quad 0,693$$

$$t\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{0,693}{\lambda}$$

Periodo di dimezzamento,  $T_{1/2}$  = tempo dopo il quale rimangono il 50 % dei nuclei

$$T_{1/2} (^{14}\text{C}) = 5730 \text{ anni}$$

Si, ma ci sono dei problemi...  
pratici...

# La calibrazione delle misure di datazione al C14

## Unità di misura, emivita ed i motivi della calibrazione

Le misurazioni al radiocarbonio non calibrate sono di solito riportate in anni BP, dove 0 (zero) BP corrisponde al 1950 DC. BP significa "Before Present" (prima del presente) o "Before Physics" (prima della fisica). Tenere presente che il termine BP viene utilizzato anche in altre tecniche di datazione, ma ha valori differenti, come nel caso della datazione con termoluminescenza dove BP corrisponde all'anno 1980 DC.

È inoltre necessario notare che l'emivita utilizzata nei calcoli della datazione al carbonio corrisponde a 5568 anni, il valore elaborato dal chimico Willard Libby, e differisce dal valore più accurato di 5730 anni noto come emivita Cambridge. Anche se è meno preciso, l'emivita di Libby è stata mantenuta per evitare incongruenze o errori nella comparazione dei risultati con le analisi al carbonio-14 prodotte prima e dopo la derivazione dell'emivita Cambridge.

Le misurazioni al radiocarbonio si basano sul presupposto che la concentrazione atmosferica di carbonio-14 sia rimasta costante dal 1950 e che l'emivita del carbonio-14 sia di 5568 anni. La calibrazione dei risultati del radiocarbonio è necessaria per tenere conto delle variazioni nella concentrazione atmosferica di carbonio-14 nel corso del tempo. Tali modifiche sono state determinate da diversi fattori, tra cui, ma non solo, le fluttuazioni del campo geomagnetico terrestre, l'uso di combustibili fossili ed i test nucleari.

Il metodo più frequente e più utilizzato per la calibrazione è con la dendrocronologia.

# La Dendrocronologia

## **Dendrocronologia e datazione al carbonio**

La dendrocronologia si basa sul fenomeno della crescita degli alberi ad addizione di anelli, per questo il nome "datazione con gli anelli degli alberi". I dendrocronologi datano gli eventi e le variazioni negli ambienti del passato analizzando e comparando le strutture di crescita degli anelli degli alberi e del legno invecchiato. Possono determinare l'anno esatto in cui si è formato ogni anello.

I risultati della dendrocronologia hanno avuto un ruolo importante nei primi anni della datazione al radiocarbonio. Gli anelli degli alberi fornivano materiale di età realmente conosciuta per verificare l'accuratezza del metodo di datazione al carbonio-14. Verso la fine degli anni '50, diversi scienziati (in particolare l'olandese Hessel de Vries) confermarono la discrepanza tra le età radiocarboniche e le età in anni solari con risultati raccolti con la datazione al carbonio degli anelli degli alberi. Gli anelli furono datati con la dendrocronologia.

Gli anelli degli alberi vengono tuttora utilizzati per calibrare le misurazioni al radiocarbonio. Oggi sono disponibili numerosi archivi di anelli degli alberi di età differenti che forniscono informazioni sugli ultimi 11000 anni. Gli alberi più spesso utilizzati come riferimenti sono il pino dai coni setolosi (*Pinus aristata*) negli Stati Uniti e la quercia (*Quercus* sp.) in Irlanda e in Germania. Alcuni laboratori di datazione al radiocarbonio utilizzano dati provenienti da specie di alberi diverse.

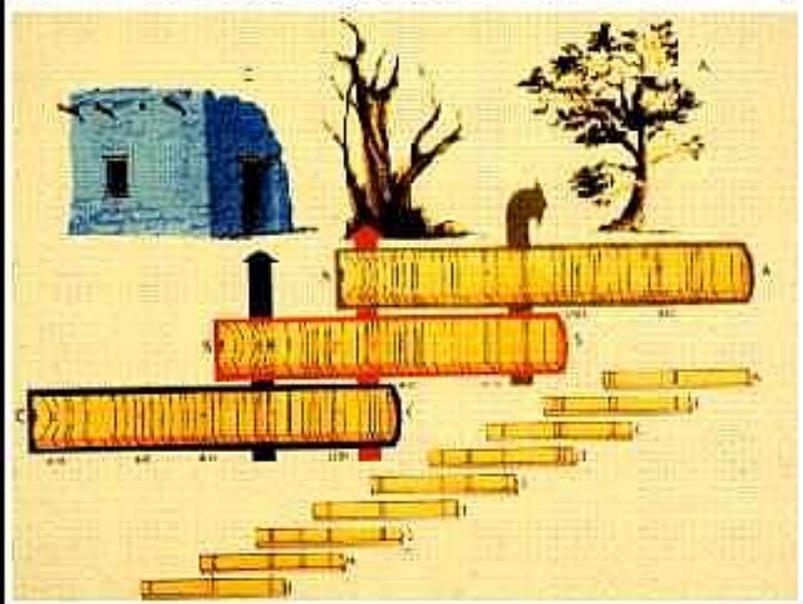
# Gli anelli di crescita degli alberi

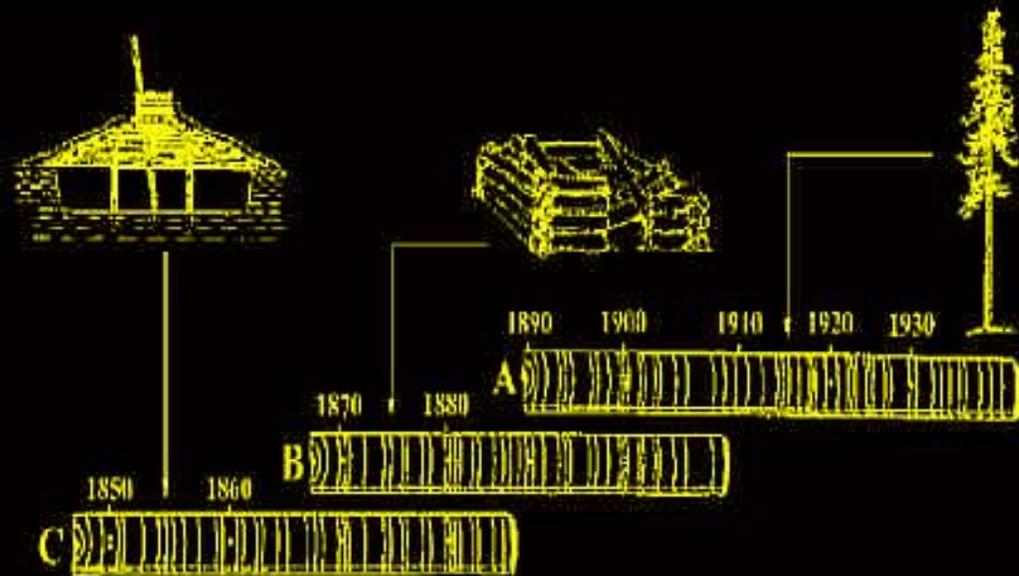
## **Calibrazione con gli anelli degli alberi – Radiocarbonio**

In linea di principio, l'età di un campione contenente carbonio può essere facilmente determinata confrontandone il contenuto di radiocarbonio con quello dell'anello di un albero di età nota (anni di calendario). Se un campione contiene, in proporzione, la stessa quantità di radiocarbonio dell'anello di un albero, è possibile concludere che abbiano la stessa età.

Nella pratica, la calibrazione con gli anelli degli alberi è difficoltosa a causa di molti fattori, il più importante dei quali è che le misurazioni effettuate sugli anelli e sul campione hanno una precisione limitata, che genera come risultato una serie di anni di calendario possibili.

I risultati della calibrazione sono spesso prodotti come fasce d'età e non come valore assoluto. Le fasce d'età vengono calcolate con i metodi dell'intercetta o delle probabilità, che necessitano di una curva di calibrazione.





Per datazioni dendrocronologiche non è necessario trovare un albero vivente; infatti in letteratura sono riportate le sequenze della quercia e del pino tedesco di 11.000 anni, della quercia irlandese fino al 5289 AC, del pino della California di 9.000 anni etc. costruite estendendo le sequenze degli alberi viventi ai legni archeologici.

Le curve di calibrazione così ottenute permettono di correggere la datazione in base alla concentrazione di  $^{14}\text{C}$  effettivamente presente risalendo sino a circa 12.000 anni fa.

# La curva di calibrazione

## Curve di calibrazione

La prima curva di calibrazione per la datazione al radiocarbonio era basata su una sequenza continua di anelli di alberi che risaliva fino a 8.000 anni fa. Questa sequenza, stabilita da Wesley Ferguson nel 1960, ha permesso a Hans Suess di pubblicare la prima curva di calibrazione utile. La curva di Suess, basata sul pino dai coni setolosi, utilizzava gli anelli degli alberi per l'asse del calendario.

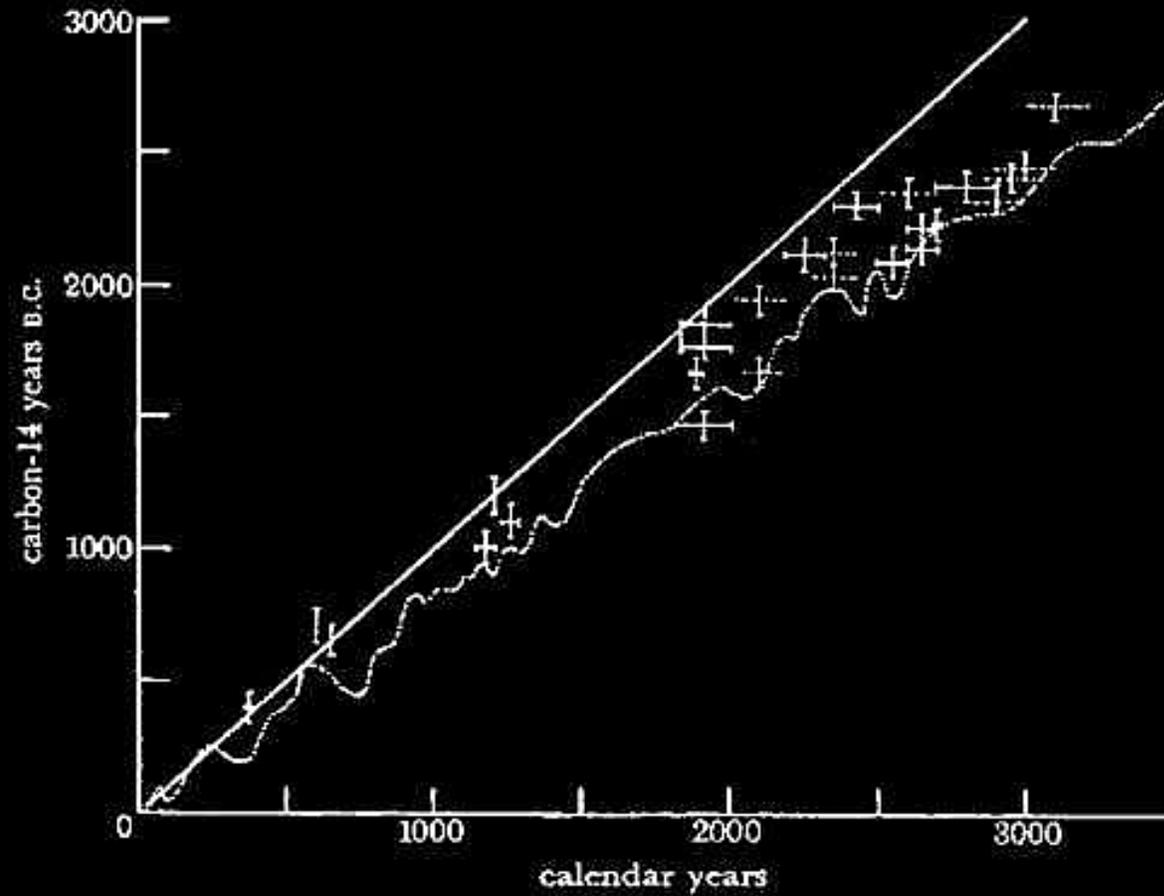
Dopo la curva di Suess sono state pubblicate molte altre curve di calibrazione, ma la loro proliferazione ha portato più problemi che soluzioni. Negli anni successivi, anche l'uso degli spettrometri di massa con acceleratore e l'introduzione delle datazioni al carbonio ad alta precisione ha portato alla creazione di nuove curve di calibrazione. Una curva di calibrazione del radiocarbonio ad alta precisione è stata pubblicata da un laboratorio di Belfast (Irlanda del Nord) utilizzando i dati dendrocronologici raccolti dalla quercia irlandese.

Ad oggi, le curve di calibrazione per gli anni di calendario internazionalmente accettate arrivano al 48000 AC (Reimer et. al., *INTCAL13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0 – 50000 yrs cal BP*, *Radiocarbon* 55(4), 2013). Per il periodo seguente al 1950, è disponibile una grande quantità di dati relativi alla concentrazione di radiocarbonio nell'atmosfera. Questi dati risultano molto utili, in alcuni casi, per rappresentare l'età di calendario di materiali molto recenti (Hua, et. al. *Atmospheric Radiocarbon for the period 1950-2010*, *Radiocarbon*, 55(4), 2013).

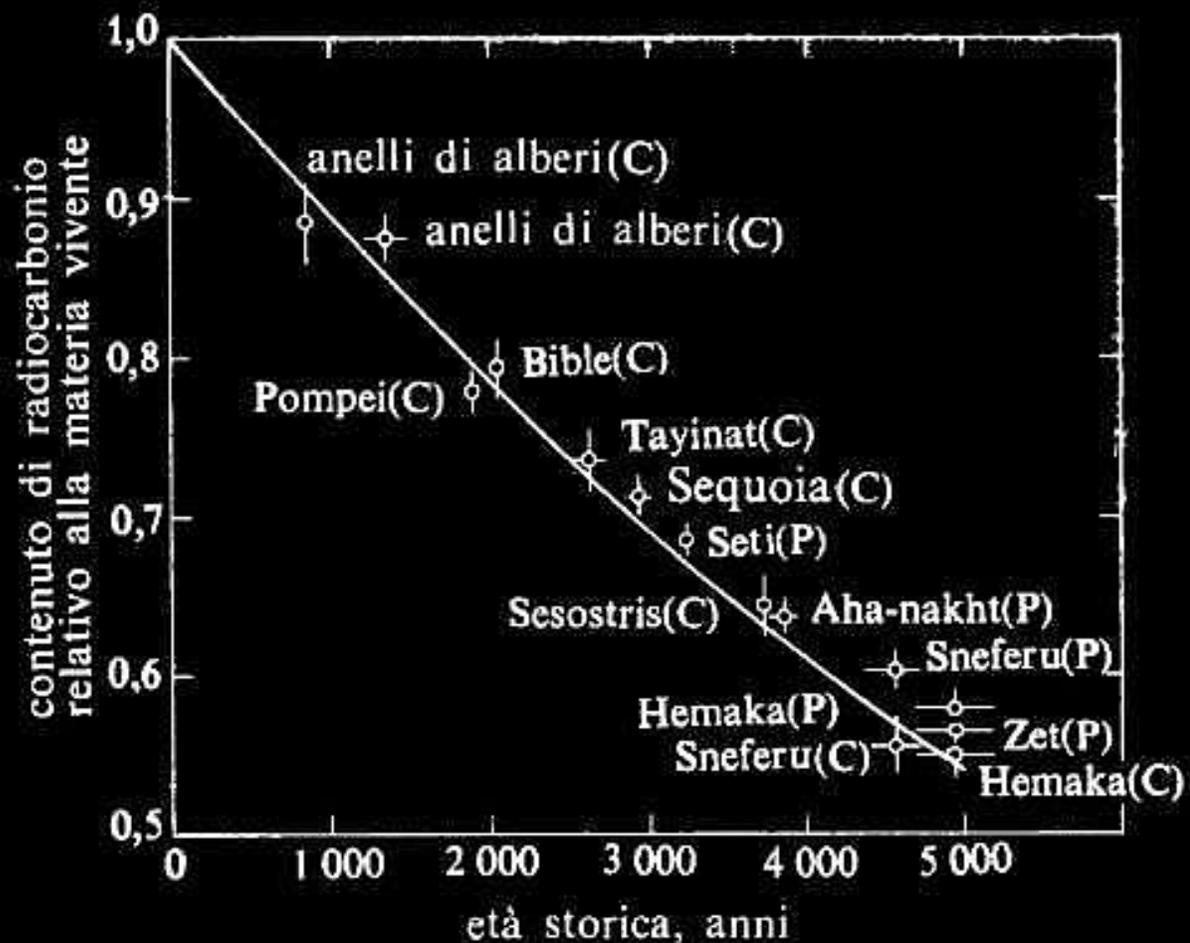
Una tipica curva di calibrazione per il carbonio-14 presenta una scala temporale dendrocronologica o agli anni solari sull'asse x (anni solari) e gli anni radiocarbonici riflessi sull'asse y.

# La curva di calibrazione

La figura riporta una curva di calibrazione ottenuta misurando campioni di età nota.

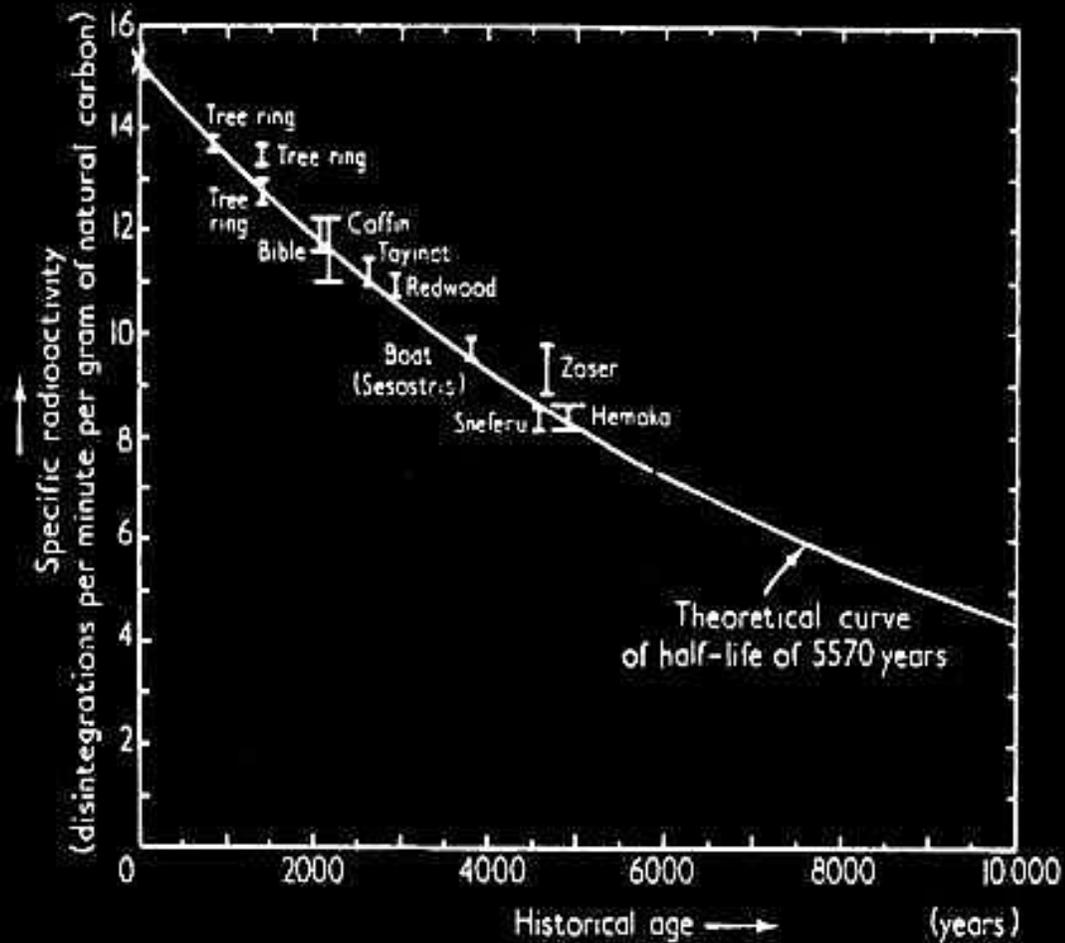


# La curva di calibrazione



curva di calibrazione del radiocarbonio

# La curva di calibrazione



curva di calibrazione del radiocarbonio

# Convenzioni e risultati

## **Convenzioni sulle calibrazioni**

L'uso degli anni cal AC e DC, o anche cal BP, rappresenta la convenzione consigliata per indicare i risultati della datazione al radiocarbonio dendrocronologicamente calibrati. I risultati della datazione al carbonio devono essere chiari, quindi non è sufficiente riportarli come AC, DC o BP. Gli anni cal AC e DC corrispondono esattamente ai normali anni storici, mentre cal BP indica il numero di anni prima del 1950.

## **Risultati della datazione al radiocarbonio**

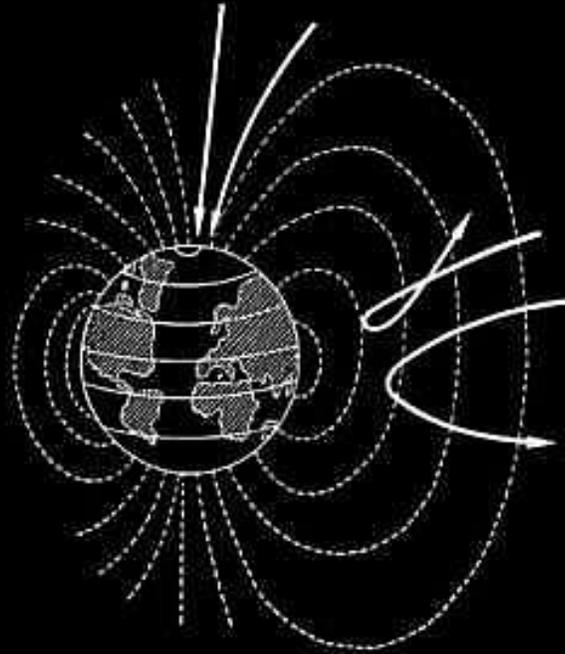
I risultati della datazione al carbonio devono includere i risultati non calibrati, la curva e il metodo di calibrazione utilizzati e le eventuali correzioni apportate al risultato originale prima della calibrazione. Deve inoltre essere incluso il livello di certezza corrispondente agli intervalli calibrati.

# Problemi...

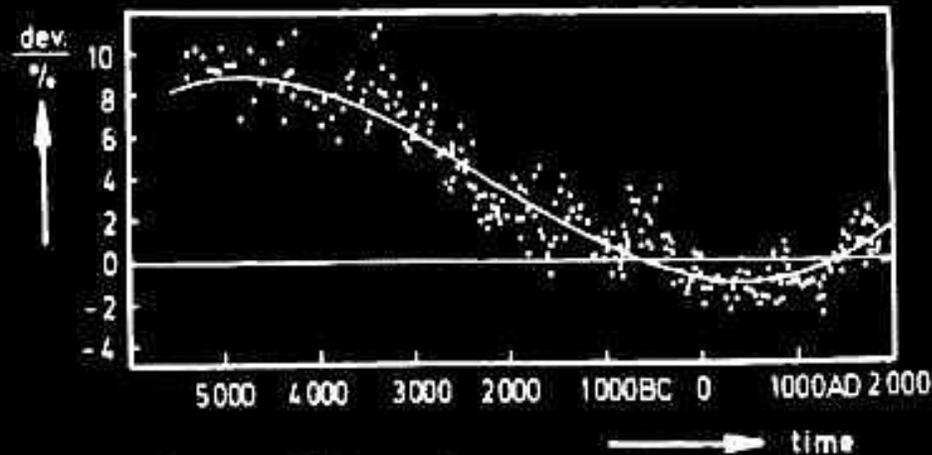
## Variazione del contenuto di $^{14}\text{C}$ nel serbatoio naturale.

Un volta risaliti, dalla attività specifica, alla età del campione, vanno quindi apportate delle correzioni dovute al fatto che per cause diverse il rate  $R$  di produzione di  $^{14}\text{C}$  e quindi la sua concentrazione nell'atmosfera non sono propriamente rimasti costanti nel tempo. Le cause principali sono elencate nel seguito.

- Variazione del flusso  $\Phi$  di raggi cosmici dovuta alla variazione del campo magnetico terrestre.



Questo fenomeno ha una periodicità di 8000 anni ed è stato valutato e quantificato mediante la misura del contenuto di  $^{14}\text{C}$  in vecchissimi alberi, quali le sequoie ed i pini aristata.

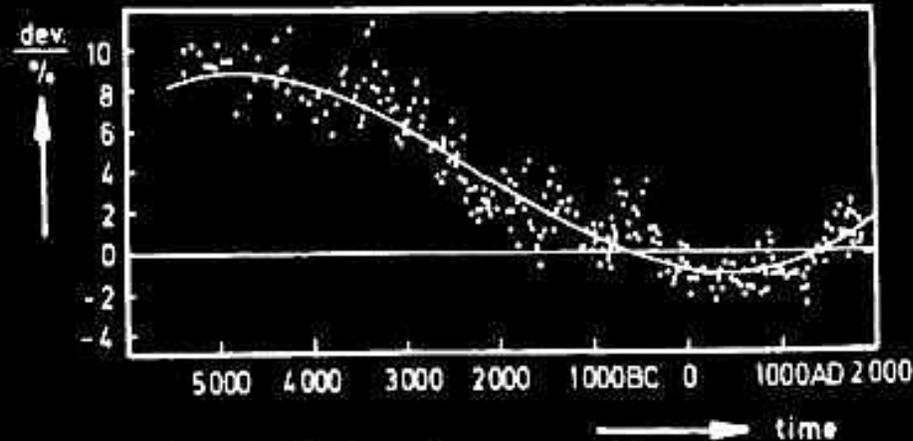


correzioni al metodo del  $^{14}\text{C}$  dovute alla variazione del flusso di raggi cosmici

- Si è misurata la concentrazione di  $^{14}\text{C}$  nei vari anelli di crescita dei tronchi e se ne è dedotto l'andamento temporale. Poiché un singolo albero non vive più di 4000-5000 anni, si è fatto ricorso a varie generazioni di alberi per ricoprire un periodo così lungo (12000 anni): gli uni rispetto agli altri sono stati "sincronizzati" tramite la misura dello spessore relativo dei vari anelli, funzione delle condizioni climatiche annuali.

- Variazione dovuta all'attività solare intensa.

Anche questo effetto è stato misurato ricorrendo ai pini aristata e alle sequoie. Si vede infatti che la curva del grafico precedente presenta una modulazione (di periodo pari a 200 anni) sovrapposta alla portante.



correzioni al metodo del  $^{14}\text{C}$  dovute alla variazione del flusso di raggi cosmici

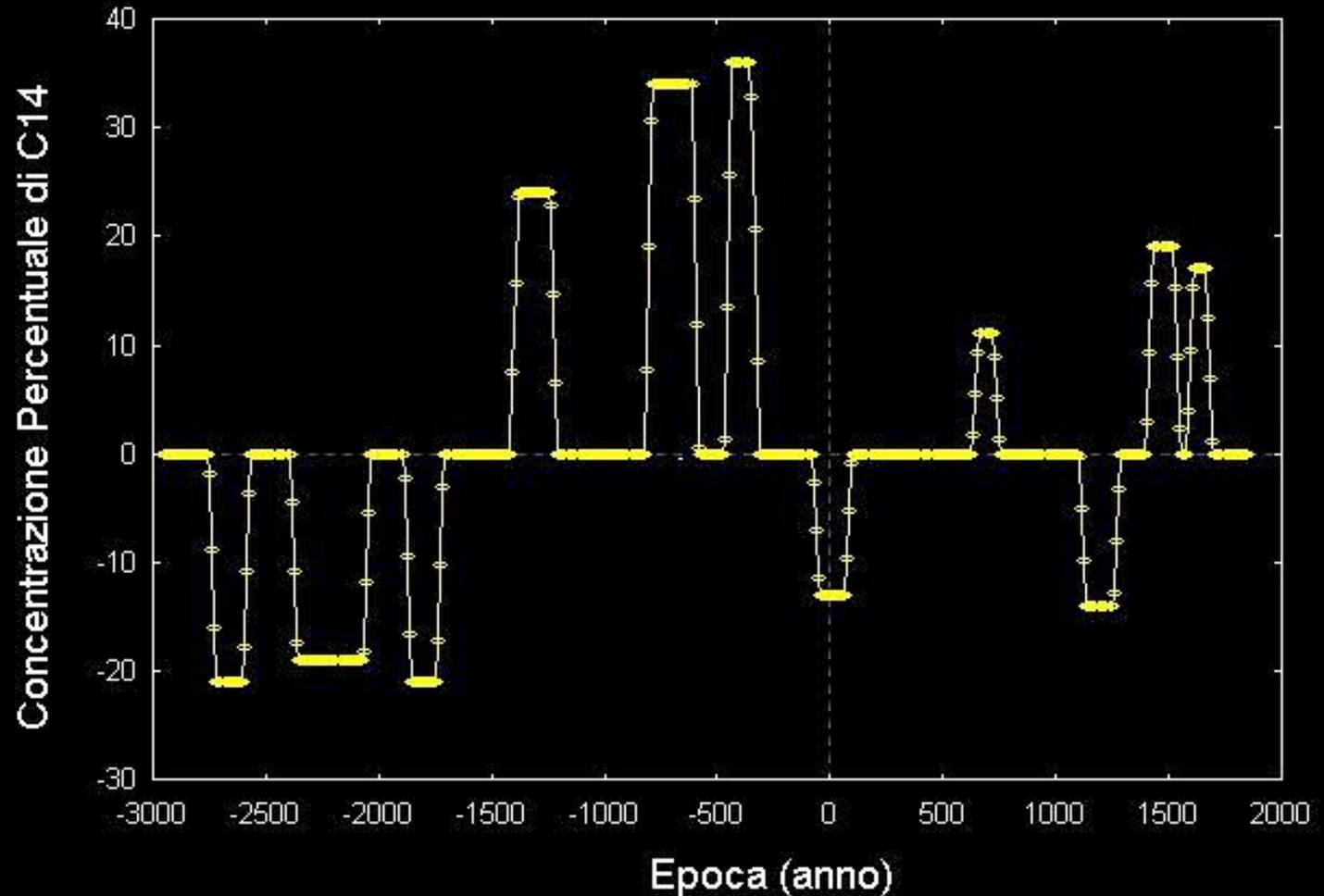
- variazione dovuta alle macchie solari meno intense.

Questo fenomeno periodico ( $T = 11$  anni) è stato osservato chiaramente, per esempio da una misura di concentrazione di  $^{14}\text{C}$  nei vini della Georgia.

## Periodo dell'attività solare: 11 anni

# Ricostruzione dell'antica attività solare utilizzando le misure di C14

Concentrazione percentuale di C14 nell'atmosfera della Terra dovuta alla variazione dell'attività solare

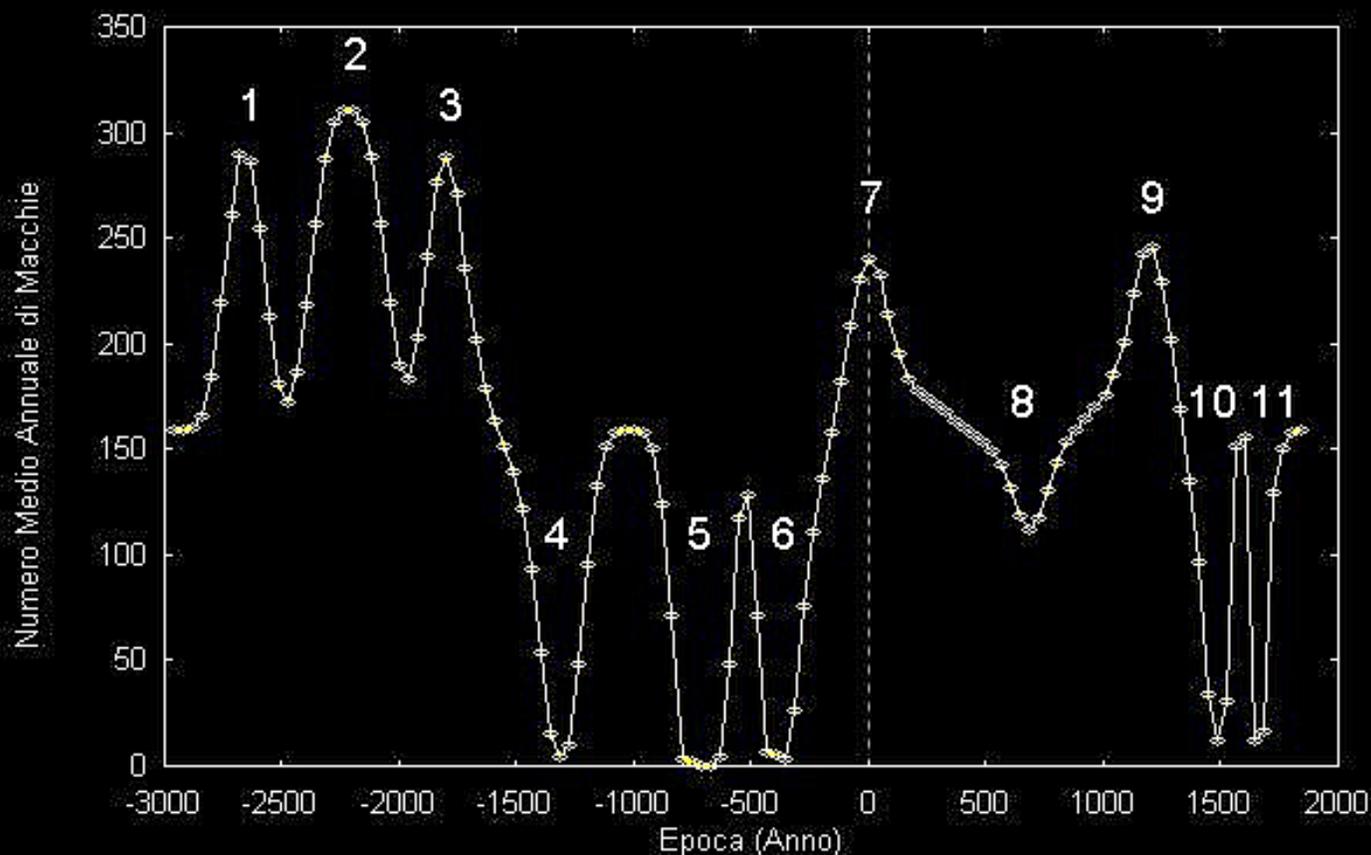


# Ricostruzione dell'andamento del numero delle macchie solari nell'antichità usando il C14



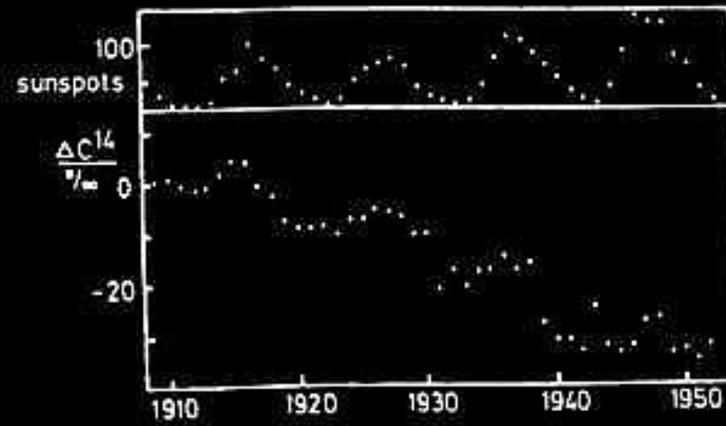
macchia solare visibile ad  
occhio nudo?  
(Valcamonica, 2500 a.C.)

- |                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| 1 : Massimo Sumerico       | 7 : Massimo romano     |
| 2 : Massimo delle Piramidi | 8 : Minimo medioevale  |
| 3 : Massimo di Stonehenge  | 9 : Massimo medioevale |
| 4 : Minimo egizio          | 10 : Minimo di Sporer  |
| 5 : Minimo omerico         | 11 : Minimo di Maunder |
| 6 : Minimo greco           |                        |

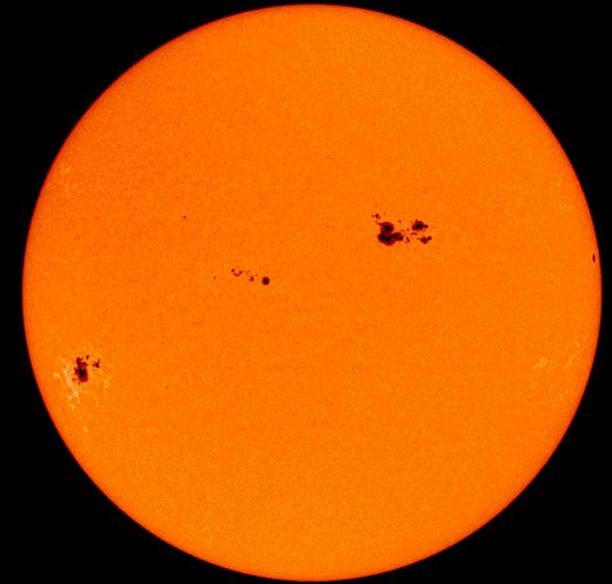


Andamento del Numero Medio di Macchie Solari nei Secoli

Nella figura è chiarissima la correlazione con l'intensità delle macchie solari.



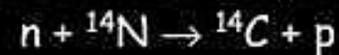
$^{14}\text{C}$  nei vini della Georgia - correlazione con le macchie solari



Vi sono poi altre due cause di variazione della concentrazione di  $^{14}\text{C}$  dovute all'uomo, che di fatto impediscono di utilizzare il metodo del radiocarbonio per la datazione di reperti posteriori al 1700 d.c. Questo comunque non rappresenta un problema per noi: lo sarà per i nostri discendenti se essi, tra 2÷3000 anni, volessero datare reperti del giorno d'oggi !

- Con l'avvento dell'era industriale, a causa dell'utilizzo sempre più diffuso del petrolio come combustibile, è stata immessa nell'atmosfera una enorme quantità di carbonio fossile, completamente privo di  $^{14}\text{C}$  ormai decaduto. Questo ha chiaramente rotto l'equilibrio secolare tra produzione e decadimento del  $^{14}\text{C}$  e la concentrazione di  $^{14}\text{C}$  è diminuita.

- Tra gli anni '50 e gli anni '60 sono state effettuate molti test di esplosioni nucleari. Come sappiamo, al meccanismo di fissione è associata la produzione di neutroni. Questi neutroni hanno a loro volta interagito con l'atmosfera e, attraverso la reazione:



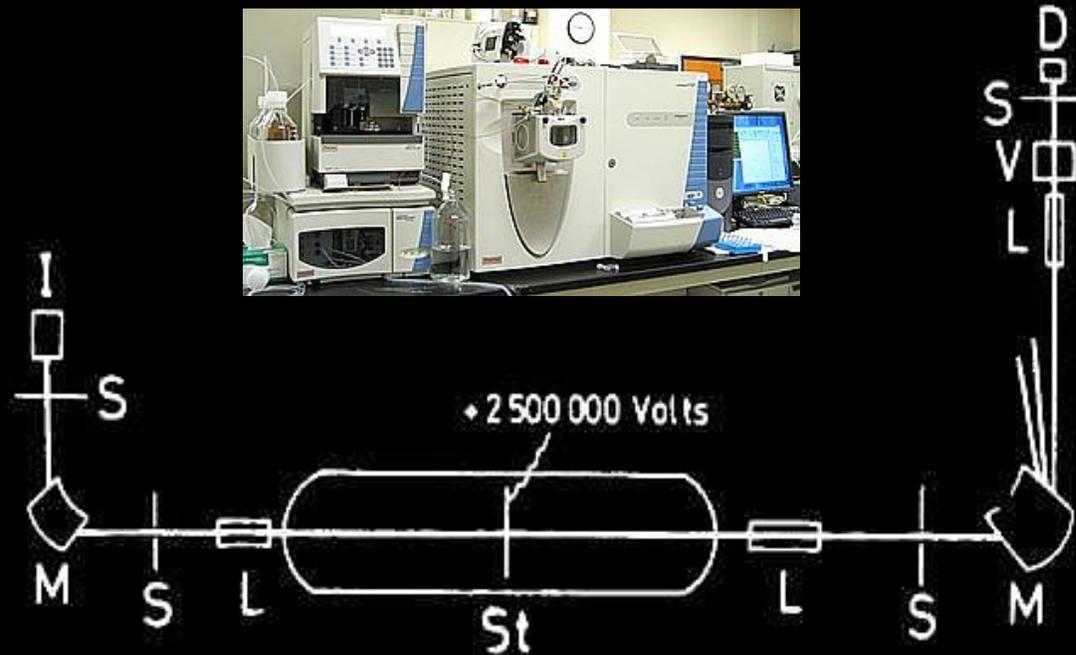
hanno prodotto un aumento di concentrazione di  $^{14}\text{C}$ , tra l'altro in maniera evidentemente non isotropa sulla terra. È stato calcolato che l'aumento globale medio di  $^{14}\text{C}$  in tutto il globo è dell'ordine di 0.5 tonnellate, cioè di qualche %. Localmente si sono verificate variazioni anche di un fattore due.

A partire dagli anni '60 si sono sviluppate svariate procedure di calibrazioni che utilizzano la dendrocronologia, metodo che analizza il contenuto di  $^{14}\text{C}$  nel legno degli anelli di accrescimento di un albero, lo studio dei coralli con il metodo dell'uranio-torio e la datazione delle varve.

# Spettrometria di massa

- Una tecnica più moderna e raffinata (ma anche più costosa e complicata) è quella della spettrometria di massa.

Il carbonio prelevato del campione da datare costituisce in questo caso la sorgente di un tandem. Il fascio prodotto conterrà quindi nuclei di  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  e  $^{14}\text{C}$ . In figura è riportato lo schema di funzionamento di una spettrometro di massa.



Lo spettrometro di massa usato per datazioni con il metodo del  $^{14}\text{C}$

Il fascio è emesso dalla sorgente I. Esso viene "analizzato" tramite i due magneti di analisi M, uno immediatamente dopo la sorgente, e l'altro dopo la sezione accelerante e successivamente dal filtro di velocità V posto immediatamente prima del rivelatore D.

Le slitte S e le lenti magnetiche L servono a focalizzare il fascio. I magneti filtrano le particelle con una assegnata massa e quindi separano  $^{14}\text{C}$  da  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ .

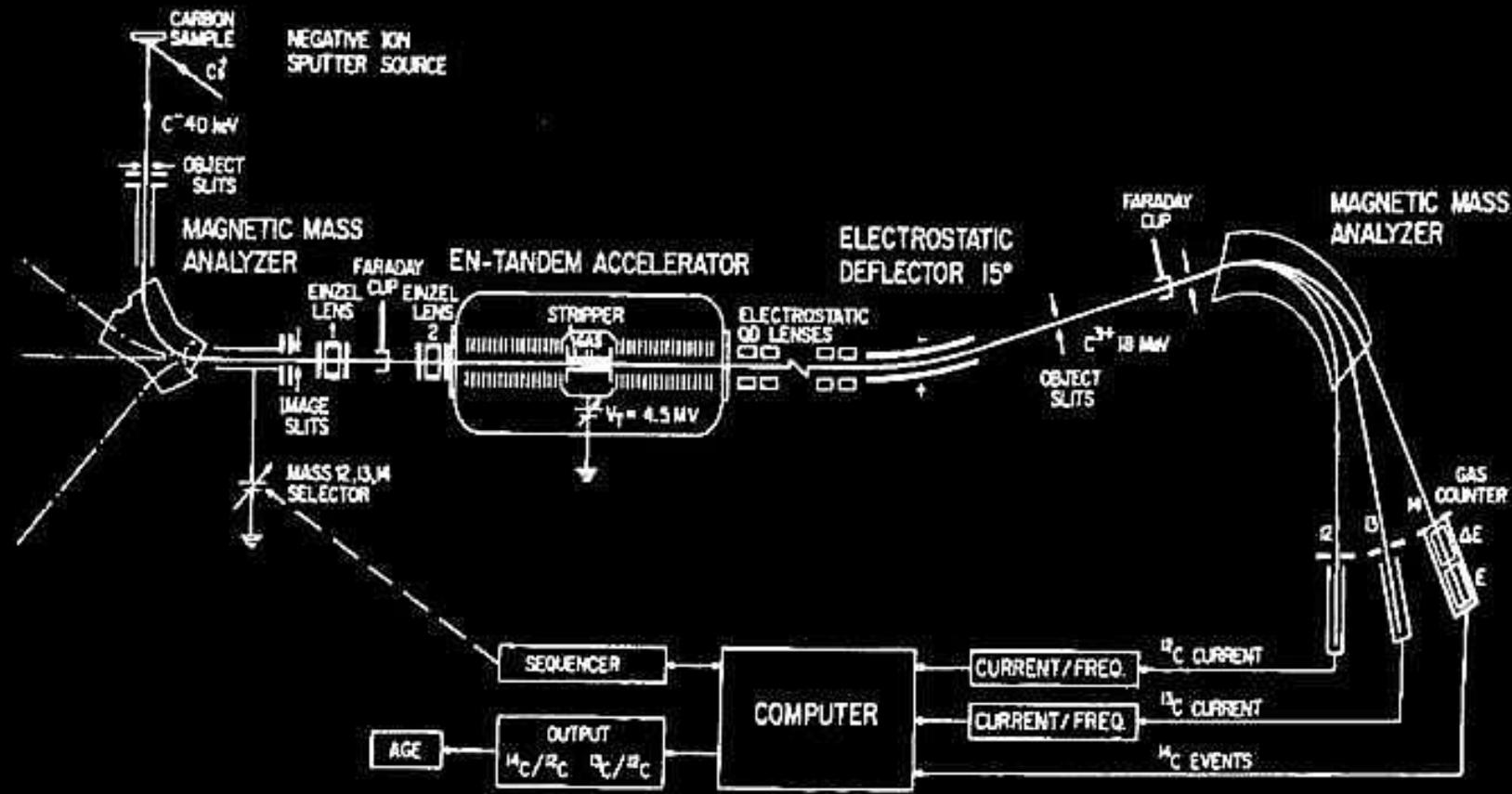
Il filtro di velocità (filtro di Wien) costituito da un campo elettrico E ed un campo magnetico B perpendicolari tra loro seleziona invece in base al rapporto  $e/m$  ed è quindi in grado di separare ulteriormente  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  e  $^{14}\text{C}$  dal fondo.

Variando opportunamente il campo nei magneti M si possono inoltre misurare le intensità  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  e  $^{14}\text{C}$  separatamente e quindi il loro rapporto.

Con lo spettrometro di massa si raggiungono elevate sensibilità, e si è in grado di misurare rapporti  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 10^{-16}$ .

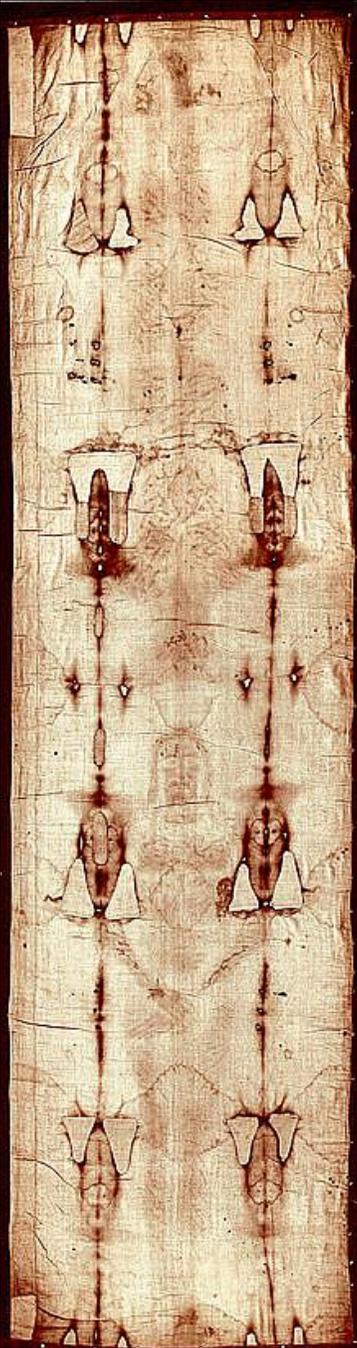
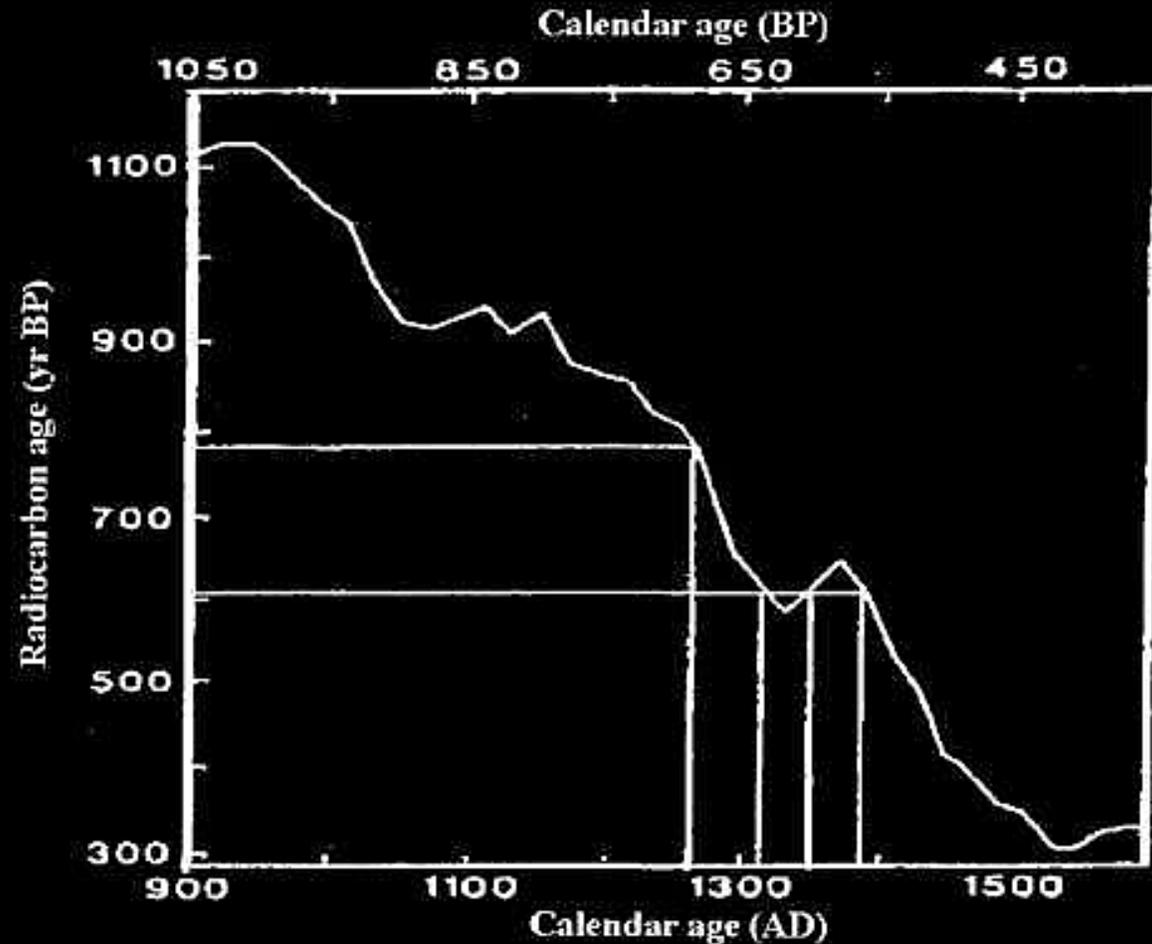
Fortunatamente non vengono accelerati alla sorgente del tandem ioni  $^{14}\text{N}$  negativi (lo ione  $^{14}\text{N}^-$  è infatti instabile e decade immediatamente), che avrebbero lo stesso valore di  $e/m$  e la stessa velocità degli ioni  $^{14}\text{C}$  e non potrebbero essere facilmente distinti.

# spettrometro di massa



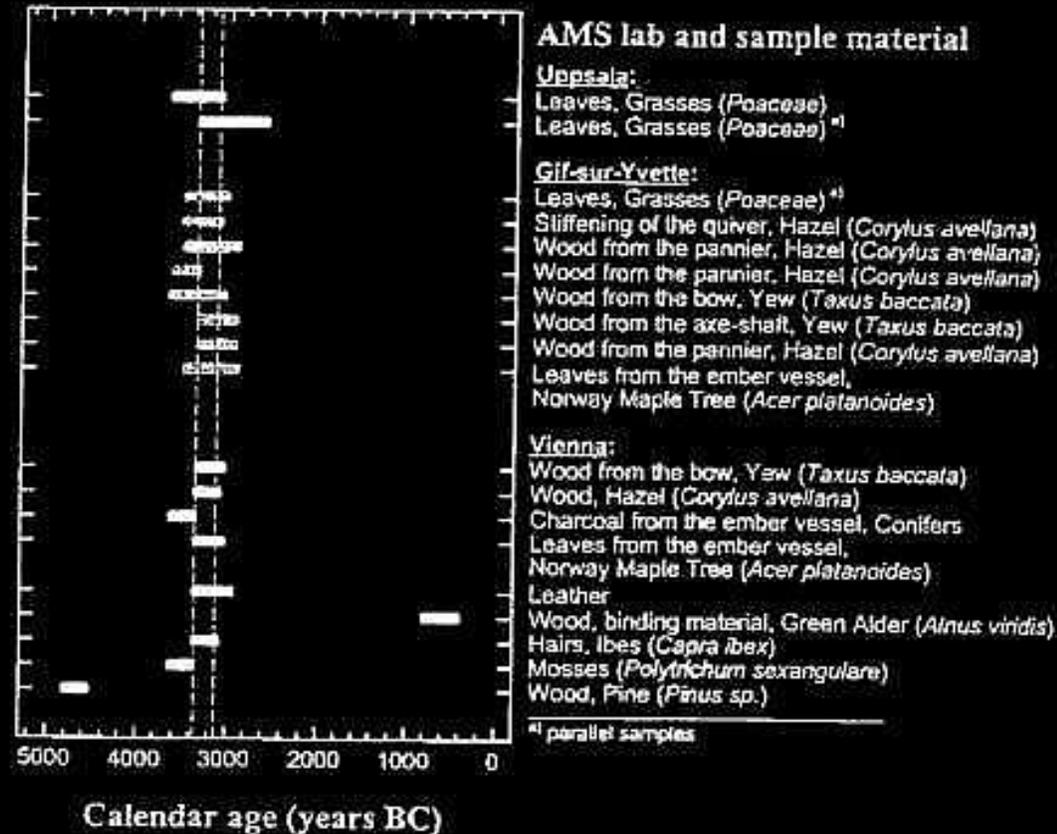
# Un interessante esempio

La datazione della Sindone

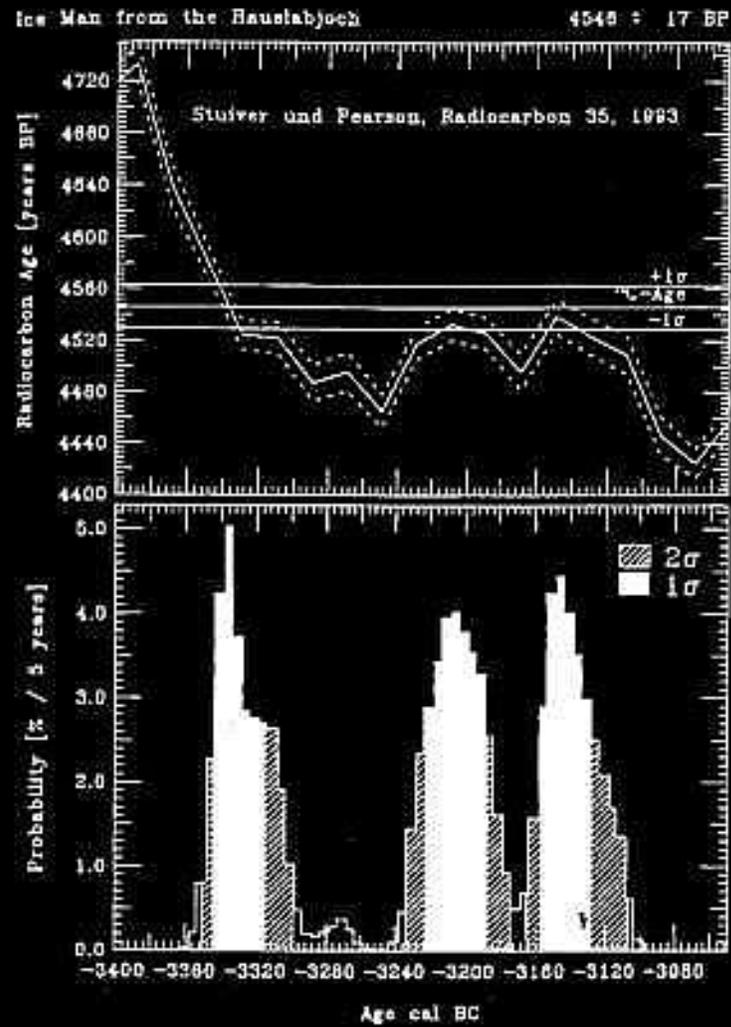


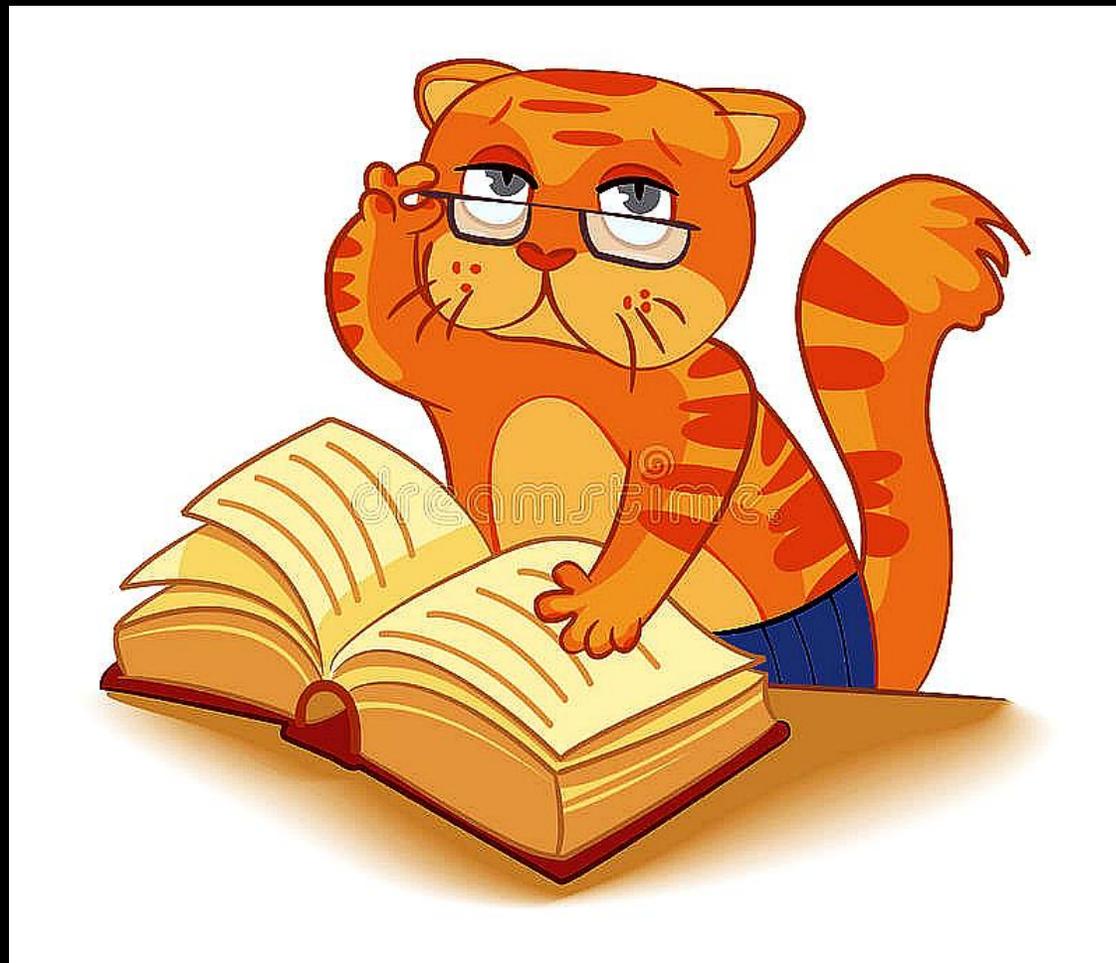
# Un altro esempio

La datazione di Ötzi, l'uomo di Similaun (vari oggetti del suo vestiario e del suo equipaggiamento)



## La datazione di Ötzi, l'uomo di Similaun





**Grazie per l'attenzione!!**