

Zeitschrift: Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

Herausgeber: Società Svizzera Ingegneri e Architetti

Band: - (2001)

Heft: 5

Artikel: Radioattività e datazione radiometrica

Autor: Romer, Sara

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-132227>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Radioattività e datazione radiometrica

Sara Romer *

Qual è l'età della Terra? A quale epoca risale la mummia «Ötzi» rinvenuta nel 1991 in Tirolo? Questo vaso romano è un reperto autentico?

Per trovare una risposta soddisfacente a queste domande è necessario sviluppare una valida tecnica di datazione per i reperti geologici e archeologici. Lo studio della storia della terra e dell'umanità abbisogna di date precise e assolute. In questo articolo le basi della datazione al carbonio radioattivo saranno presentate come esempio di un uso pratico della radioattività.

1. I decadimenti radioattivi

1.1 Alcune definizioni

Ogni atomo è formato da un nucleo, comprendente protoni e neutroni, e da una nube di elettroni che ruotano attorno a tale nucleo. La massa del protone è di $1.67252 \cdot 10^{-27}$ kg e quella del neutrone, leggermente maggiore, è di $1.67482 \cdot 10^{-27}$ kg. Gli elettroni invece sono molto più leggeri e la loro massa è 1836 volte inferiore rispetto a quella del protone. I protoni e gli elettroni possiedono una carica elettrica, positiva per i primi e negativa per i secondi. I neutroni invece sono privi di carica. Il numero di protoni è il numero atomico Z dell'atomo ed è uguale al numero degli elettroni. Il numero di neutroni è N e il numero totale di protoni e neutroni, $A = Z + N$, è chiamato numero di massa dell'atomo. Una particolare specie nucleare viene detta nuclide e viene in generale indicata come A_ZX . Due o più nuclidi con lo stesso numero Z , ma con un numero diverso di neutroni e pertanto con diversi valori di N e A , sono detti *isotopi*. Essi hanno quindi diverso numero di massa e uguale numero atomico. La parola «isotopo» proviene dal greco e significa stesso posto, poiché gli atomi con lo stesso numero atomico appartengono ad un elemento che occupa la stessa posizione nella tabella degli elementi. Gli isotopi hanno le stesse proprietà chimiche poiché queste dipendono solo dagli elettroni e non dalla composizione del nucleo.

1.2 Il tempo di dimezzamento

In natura non tutti i nuclei sono stabili. Un nu-

cleo non stabile è dunque destinato a decadere in un altro nucleo con minore massa mediante l'emissione di una radiazione è detto *radioattivo*. Il fenomeno della radioattività è stato scoperto ai primi del Novecento dalla coppia M. e P. Curie e da A. H. Becquerel (il nome «radioattività» proviene dall'elemento radioattivo «radio» scoperto dai Curie). Vi sono tre tipi di radioattività a seconda della radiazione emessa durante la trasformazione nucleare: il decadimento α , caratterizzato dalla liberazione di particelle alfa ossia nuclei di elio, il decadimento β^- (risp. β^+), caratterizzato dall'emissione di elettroni (risp. positroni), e il decadimento γ , caratterizzato da onde elettromagnetiche ad alta energia.

Il numero di particelle radioattive emesse da una sostanza nell'unità di tempo (e dunque il numero di nuclei instabili) non è costante nel tempo, bensì diminuisce *esponenzialmente*. Questa dipendenza esponenziale è caratteristica di tutti i fenomeni radioattivi. Sia N il numero di nuclei radioattivi presenti a un certo tempo t . Poiché il decadimento di un singolo nucleo è un evento casuale (statistico) ci aspettiamo che il numero di nuclei che decadono in un certo intervallo di tempo Δt sia direttamente proporzionale a N e a Δt . A causa di questi decadimenti, il numero N diminuirà e la sua variazione (negativa) ΔN sarà data da:

$$\Delta N = - \lambda N \Delta t \quad (1a)$$

rispettivamente:

$$dN = - \lambda N dt \quad (1b)$$

dove λ (in $[s^{-1}]$) è chiamata *costante di decadimento*. Risolvendo l'equazione (1) rispetto al numero di nuclei otteniamo la legge esponenziale (vedi anche Diagramma):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

N_0 è il numero di nuclei al tempo $t = 0$. Il numero di decadimenti radioattivi riferito all'unità di

tempo è chiamato *attività A*:

$$A = \lambda N = \Delta N / \Delta t \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (3a)$$

rispettivamente:

$$A = \lambda N = dN/dt \quad (3b)$$

L'inverso della costante di decadimento λ è chiamato *vita media* $\tau = 1/\lambda$. Dopo un tempo pari alla vita media τ il numero di nuclei radioattivi e l'attività del campione sono scesi al 37% del loro valore originale. Un altro parametro importante per la caratterizzazione di un nucleo radioattivo è il *tempo di dimezzamento* $t_{1/2}$, ossia il tempo impiegato dal numero di nuclei N_0 per ridursi a metà $N(t_{1/2}) = N_0/2$. Per esempio, se si parte con un grammo di sostanza radioattiva, dopo che sarà trascorso un tempo pari al suo tempo di dimezzamento resterà di quel radioisotopo solo mezzo grammo. Il tempo di dimezzamento è legato alla vita media da una semplice relazione: $t_{1/2} = \ln(2) \tau \approx 0.693 \tau$. L'unità SI (= sistema internazionale) di attività di una sostanza radioattiva è il becquerel (Bq) che è definito come un decadimento al secondo:

$$1 \text{ [Bq]} = 1 \text{ decadimento / s}$$

Un'unità storica è il curie (Ci):

$$1 \text{ [Ci]} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ [Bq]} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

Il curie è l'attività corrispondente 1 g di radio ($^{226}_{88}\text{Ra}$).

2. La datazione radiometrica

Una delle conseguenze più importanti della scoperta della radioattività è la *datazione radiometrica*, ossia un metodo attendibile per la determinazione dell'età di rocce, minerali e reperti archeologici contenenti isotopi radioattivi. Tutti i metodi di datazione radiometrica si basano sul fatto che una sostanza radioattiva impiega un determinato numero di anni a trasformarsi in un'altra sostanza. Come abbiamo visto prima questo tempo è il tempo di dimezzamento $t_{1/2}$. Determinando con opportune analisi la percentuale dell'isotopo radioattivo (= radioisotopo) ancora presente e quella dell'elemento «figlio» già prodotto, si può risalire all'età del campione in esame. Ad esempio se risulta che i due elementi sono presenti in uguale

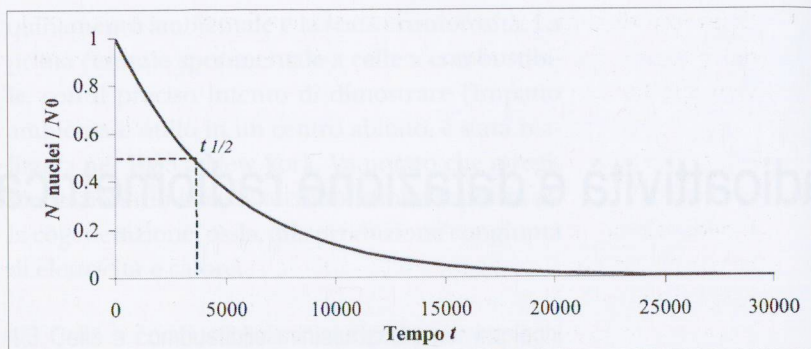


Fig. 1 – Diminuzione esponenziale con il tempo dei nuclei radioattivi

quantità se ne deduce che è trascorso esattamente un tempo pari al tempo di dimezzamento.

Per la datazione radiometrica l'equazione (2) non può essere usata, giacché il numero iniziale dei nuclei radioattivi N_0 non può essere determinato sperimentalmente. Al contrario, si può misurare il numero dei nuclei radioattivi ancora presenti al giorno d'oggi, $N(t)$. Anche il numero dei nuclei generati dal decadimento, $D(t)$, nel tempo t può essere determinato sperimentalmente. La relazione tra $N(t)$ e $D(t)$ è data da:

$$D(t) = N_0 - N(t) = N(t) (e^{\lambda t} - 1) \quad (4)$$

Usando l'equazione (4) e i valori sperimentali per $N(t)$ e $D(t)$, si trova poi il tempo (geologico) trascorso dalla formazione del reperto sotto analisi (equazione dell'età):

$$t = 1/\lambda \cdot \ln[(N(t) + D(t)) / N(t)] \text{ [s]} \quad (5)$$

Nella seguente tabella sono riportati alcuni dei principali isotopi radioattivi usati per la datazione (vedere anche Fig.1). Altri isotopi radioattivi che appaiono in natura non vengono usati o perché sono presenti in quantità minime o perché hanno un tempo di dimezzamento non adeguato.

Elemento progenitore	Presenza dell'isotopo in %	$t_{1/2}$ in anni	Elemento «figlio»
$^{87}_{37}\text{Rb}$	27.85	47'000 milioni	$^{87}_{38}\text{Sr}$
$^{232}_{90}\text{Th}$	100	13'900 milioni	$^{208}_{82}\text{Pb}$
$^{238}_{92}\text{U}$	99.27	4'510 milioni	$^{206}_{82}\text{Pb}$
$^{40}_{19}\text{K}$	0.012	1'270 milioni	$^{40}_{18}\text{Ar}$ (11%) e $^{40}_{20}\text{Ca}$ (89%)
$^{235}_{92}\text{U}$	0.72	713 milioni	$^{207}_{82}\text{Pb}$
$^{14}_6\text{C}$	-	5730	$^{14}_7\text{N}$

Tab 1 – Isotopi radioattivi per la datazione di reperti

Il rubidio (Rb), il torio (Th) e i due isotopi dell'uranio (U) vengono usati per datare rocce vecchie

di milioni di anni. Nel caso della trasformazione del $^{238}_{92}\text{U}$ in $^{206}_{82}\text{Pb}$, l'equazione (5) per il tempo t diventa pertanto:

$$t = 1/\lambda_{U^{238}} \cdot \ln[(N(t)_{U^{238}} + D(t)_{Pb^{206}}) / N(t)_{U^{238}}]$$

Il decadimento del potassio (K) in argon (Ar) ha invece un campo di impiego più ampio. Infatti, anche se il suo tempo di dimezzamento è piuttosto elevato, recenti tecniche hanno reso possibile misurazioni di piccolissime quantità di argon in rocce aventi un'età di solo 50'000 anni. Non viene usata invece la trasformazione in calcio (Ca) poiché è estremamente difficile distinguere il calcio prodotto dalla reazione nucleare da quello primario presente in grandi quantità nella crosta terrestre. Per datare eventi ancora più recenti ci si basa sul carbonio ^{14}C che ha un tempo di dimezzamento di appena 5730 anni e che dunque può essere usato per datare avvenimenti della storia dell'uomo. Il carbonio radioattivo ^{14}C permette infatti di determinare l'età di reperti in un intervallo di tempo tra 1000 e 50'000 anni. Con l'introduzione di nuove tecniche, come l'uso di uno spettrometro di massa (vedere paragrafo 4), sembra possibile che in futuro tale intervallo temporale verrà esteso ulteriormente. Comunque in un campione con un'età superiore ai 60'000 anni diventa molto difficile trovare degli atomi di carbonio radioattivo non ancora decaduti. Resta pertanto impossibile la datazione con il carbonio di reperti molto vecchi. Per esempio, reperti provenienti dal pianeta Marte e risalenti dunque a circa 4 miliardi di anni fa (formazione del sistema solare) devono venire caratterizzati con altri isotopi. Anche per i campioni più giovani si hanno alcune limitazioni tecniche. In generale, in un laboratorio non si hanno problemi a datare con il carbonio reperti risalenti agli ultimi 1000 anni. Il lavoro diventa un po' più difficile tra i secoli 1700 ed 1900 a causa delle fluttuazioni più marcate nella concentrazione del carbonio radioattivo nell'atmosfera. Invece per reperti dopo l'anno 1950 una datazione diventa quasi impossibile a causa dell'uso di bombe atomiche con la conseguente produzione incontrollata di elementi radioattivi, tra cui il carbonio ^{14}C .

Il metodo di datazione con il carbonio è stato proposto per la prima volta nel 1946-47 dal chimico W. F. Libby e dal suo gruppo di ricerca. Per tale scoperta Libby ha ricevuto il premio Nobel per la chimica nel 1960. Nel caso del metodo al carbonio non viene misurato l'elemento figlio, l'azoto ($^{14}_7\text{N}$), ma si misura il rapporto tra il carbonio radioattivo ^{14}C ed il suo isotopo stabile ^{12}C . Come verrà spiegato nei seguenti paragrafi, esistono due metodi sperimentali per determinare tale rapporto.

Riassumendo, nella scelta di radioisotopi da usare nella datazione di reperti bisogna tenere conto che:

Il tempo di dimezzamento deve essere opportuno rispetto all'età da misurare. Se esso è troppo lungo la concentrazione dell'elemento figlio sarà troppo bassa per essere misurata, se è troppo corto sarà già completamente decaduto.

Il radionuclide si deve distinguere da altri nuclidi presenti nel reperto alla sua formazione.

Non ci devono essere durante tutta la storia del reperto né perdite del radioisotopo né del prodotto figlio.

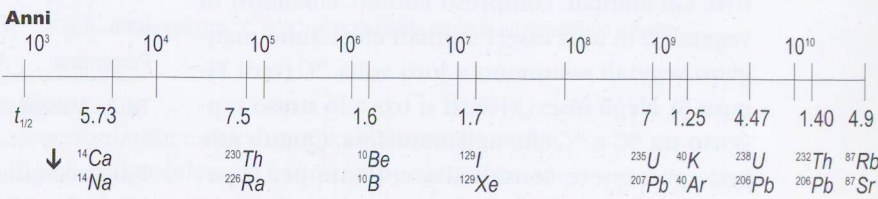


Fig 2 – Alcuni decadimenti usati nella datazione radiometrica

Nella seguente tabella sono riportate le ere geologiche ed i rispettivi intervalli di tempo. Possiamo così paragonare questa scala alla scala temporale coperta dalla datazione radiometrica:

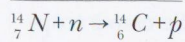
Era geologica	Scala cronologica (milioni di anni)
Neozoico (quaternario)	2-oggi
Cenozoico (terziario)	65-2
Mesozoico (secondario)	245-65
Paleozoico (primario)	530-245
Archeozoico (precambriano)	4600-530

Tab. 2 – Le ere geologiche

3. Il carbonio ^{14}C

Il carbonio è l'elemento costituente fondamentale di tutti i materiali di origine organica e dunque degli organismi viventi. In natura si trovano mescolati fra loro tre isotopi del carbonio: il carbonio ^{12}C , il carbonio ^{13}C e il carbonio ^{14}C . I primi due isotopi sono stabili e appaiono nella proporzione media convenzionale di 98.9% e 1.1% di atomi. Il terzo carbonio, più raro, è invece radioattivo e si forma nell'atmosfera terrestre. Nell'alta atmosfe-

ra i raggi cosmici producono neutroni, n , che nella bassa atmosfera partecipano alla seguente reazione nucleare:



dove un atomo di azoto ${}^{14}\text{N}$ viene trasformato nel carbonio radioattivo ${}^{14}\text{C}$, anche detto radiocarbonio naturale, con emissione di un protone p . L'azoto è il costituente principale dell'aria (circa 80%). I nuclei di ${}^{14}\text{C}$ non appena formati si combinano con l'ossigeno dell'aria per formare anidride carbonica radioattiva ${}^{14}\text{CO}_2$ che si mescola poi uniformemente con la normale ed inattiva anidride carbonica dell'atmosfera. Perciò tutti i vegetali incorporano durante la *fotosintesi* carbonio radioattivo. Gli animali, compreso l'uomo, cibandosi di vegetali o di altri esseri animali che hanno mangiato vegetali assumono a loro volta ${}^{14}\text{C}$ (vedi Figura 3). Negli esseri viventi si trova lo stesso rapporto tra ${}^{14}\text{C}$ e ${}^{12}\text{C}$ che nell'atmosfera. Questo rapporto può essere considerato costante per il periodo di tempo che copre la storia dell'uomo, ed ha un valore di circa $1.2 \cdot 10^{-12}$, ossia per un bilione di atomi di carbonio ${}^{12}\text{C}$ si ha un po' di più di un atomo di carbonio ${}^{14}\text{C}$. Nel carbonio estratto dagli alberi l'attività del ${}^{14}\text{C}$ è di 227 Bq/kg. In un uomo normale, tra i 20-30 anni ed un peso di 70 kg, l'attività del ${}^{14}\text{C}$ è di circa 3800 Bq.

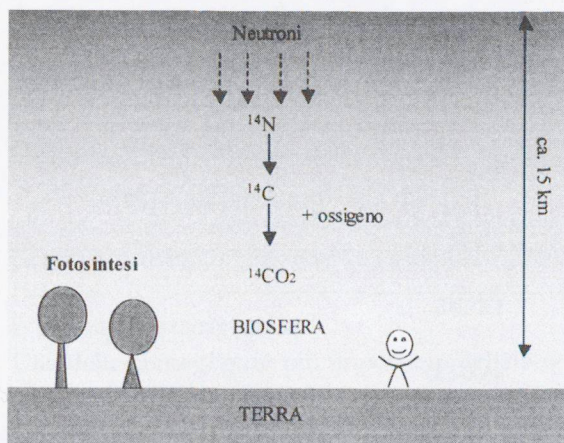


Fig. 3 – Produzione e distribuzione del carbonio radioattivo ${}^{14}_6\text{C}$

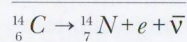
Con la morte dell'uomo, dell'animale o della pianta, il carbonio radioattivo che lo impregna diminuisce sempre di più con il passare del tempo, poiché decadendo non viene più compensato con un apporto esterno. Cambia così il rapporto tra ${}^{14}\text{C}$ e ${}^{12}\text{C}$. La datazione con il carbonio ${}^{14}\text{C}$ permette dunque la determinazione della data di morte dell'organismo e può essere applicata a svariati reperti contenenti carbonio, come fram-

menti di legno, tessuti, ossa. La datazione al ${}^{14}\text{C}$ è solo possibile se il materiale sotto analisi è appartenuto ad un corpo vivente o è venuto in contatto con un essere vivente. In generale oggetti come sassi, metalli, ceramiche non possono venire datati direttamente a meno che non siano stati a contatto con materiale organico che ha lasciato dei residui. La tabella 3 presenta alcuni materiali comuni che si lasciano datare con il carbonio radioattivo:

Materiale	Organismo	Evento datato
Ossa	Animale	Gli ultimi anni di vita dell'animale
Legno	Albero	Crescita degli anelli dell'albero
Carbonella	Albero	Crescita degli anelli dell'albero
Tela di lino	Pianta del lino	La crescita del lino
Lana	Pecora	L'anno della tosatura
Pergamena	Animale	L'anno di morte dell'animale

Tab.3 – Materiali che possono venire datati con il carbonio radioattivo

Più precisamente il decadimento del carbonio si lascia descrivere come (Figura 4):



La formazione di un nucleo di azoto è accompagnata pure dall'emissione di due particelle elementari: un elettrone, e , e un anti-neutrino, $\bar{\nu}$, ossia una particella senza carica elettrica e una massa piccolissima o addirittura nulla (decadimento β^-).

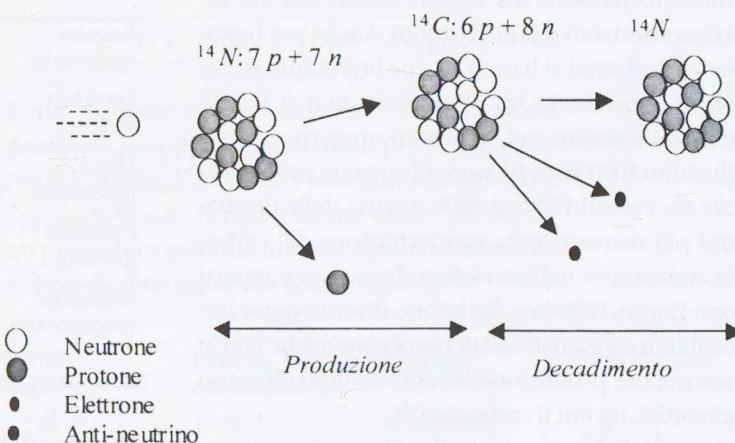


Fig. 4 – Le reazioni nucleari per la formazione ed il decadimento del carbonio radioattivo

4. I metodi sperimentali

Come si fa a determinare il rapporto tra ^{14}C e ^{12}C in un reperto?

Due sono i metodi che vengono usati:

La datazione convenzionale al carbonio ^{14}C che misura l'attività di tale elemento radioattivo

L'uso di uno spettrometro di massa che misura direttamente le quantità di ^{14}C e ^{12}C

4.1 La datazione convenzionale al ^{14}C

Dal campione sotto studio viene estratto, con metodi chimici idonei, il carbonio (stabile e radioattivo) che viene poi trasformato in anidride carbonica. Quest'ultima viene analizzata con un rivelatore di particelle (Geiger-Müller). L'energia, liberata dal decadimento del carbonio radioattivo, viene misurata ed il relativo segnale viene trasformato in un impulso elettrico. Il numero di impulsi elettrici per unità di tempo rappresenta l'attività A del ^{14}C nel campione. Per esempio, usando l'equazione (3) ed assumendo che in un campione di carbonio con un rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ di $1.2 \cdot 10^{-12}$ e con una massa di 1 g si hanno $6 \cdot 10^{10}$ atomi di ^{14}C , si trova un'attività di 13.8 decadimenti al minuto. Nel metodo di datazione l'equazione (3) viene invece usata al contrario, per la determinazione del numero assoluto di nuclei ^{14}C nel reperto, $N = A / \lambda$, conoscendo i valori sperimentali dell'attività e della costante di decadimento ($\lambda_{^{14}\text{C}} = \ln(2)/t_{1/2} = 1/8267 \text{ y}^{-1}$). Conoscendo la massa del carbonio totale, si trova infine il rapporto tra ^{14}C e ^{12}C presente nel sistema sotto analisi.

Per determinare con alta precisione l'attività di un campione è necessario studiare un elevato numero di decadimenti. Infatti se si misurano 100 decadimenti si ha un errore statistico del 10%; per raggiungere un errore di solo 1% bisogna misurare 10'000 eventi! Lo svantaggio della datazione convenzionale al carbonio ^{14}C è quindi la necessità di lunghe misurazioni (anche a causa del lungo tempo di dimezzamento) e molto materiale. Nel caso di reperti «giovani» (con un'età inferiore ai 2000 anni) e presenti in grande quantità, la precisione del metodo è molto elevata: ± 40 anni. Per campioni più vecchi l'imprecisione aumenta. Grazie al confronto con reperti standard ben caratterizzati la qualità di ogni misurazione viene tenuta sotto controllo.

4.2 Spettrometro di massa

Uno spettrometro di massa è un apparecchio che permette di determinare la massa di atomi o molecole. Condizione necessaria è che le particelle

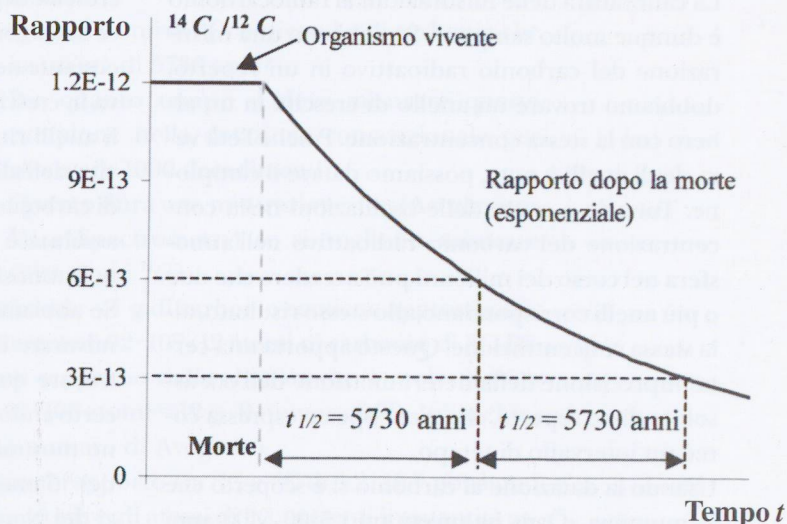


Fig. 5 - Il rapporto tra ^{14}C e ^{12}C nel corso della storia di un organismo vivente

siano ionizzate e che dunque abbiano una carica. Si può così accelerarle in un campo elettrico e separarle in un campo magnetico secondo la loro massa. Non è comunque facile rilevare singoli atomi di ^{14}C tra bilioni di atomi di ^{12}C . Gli spettrometri attuali sono stati resi ancora più efficienti e si basano su di una tecnica ancora più sofisticata, l'AMS (Accelerator Mass Spectrometry), introdotta per la prima volta alla fine degli anni 1970. Al Politecnico di Zurigo si dispone di una tale apparecchiatura. Essa permette per un campione con $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1.2 \cdot 10^{-12}$ di misurare 50 atomi di ^{14}C al secondo. Per misurare con un'alta precisione l'età di 1 g di carbonio avente un rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ di $1.2 \cdot 10^{-12}$ si abbisognano circa 160'000 eventi, ossia circa 50 minuti di misurazione AMS. Con la datazione convenzionale sono invece necessari, tenendo conto dell'attività sopra calcolata, $(160'000 \text{ decadimenti}) / (13.8 \text{ decadimenti/minuto}) \cong 8$ giorni! Il vantaggio dell'uso di uno spettrometro di massa rispetto alla datazione convenzionale è la diretta determinazione del rapporto tra ^{14}C e ^{12}C in un reperto. Non si abbisogna inoltre di grandi quantità di materiale: 0.5 mg di carbonio sono sufficienti. Il tempo di misurazione non oltrepassa di solito i 30 minuti (per la datazione convenzionale si misura per giorni fino a settimane).

Una volta che il rapporto tra ^{14}C e ^{12}C è stato determinato, con uno dei due metodi sopra descritti, si utilizza un calcolo standardizzato per trasformare questo rapporto in una concentrazione del carbonio ^{14}C e in una così detta età radiometrica. Usando gli anelli di crescita degli alberi (vedere anche paragrafo 5) si può poi attribuire questo valore ad una vera età (quella del calendario).

La calibratura delle misurazioni al radiocarbonio è dunque molto semplice. Se abbiamo una misurazione del carbonio radioattivo in un reperto, dobbiamo trovare un anello di crescita in un albero con la stessa concentrazione. Poiché l'età vera degli anelli è nota, possiamo datare il campione. Tuttavia a causa delle oscillazioni nella concentrazione del carbonio radioattivo nell'atmosfera nel corso dei millenni può accadere che due o più anelli corrispondano allo stesso risultato, alla stessa concentrazione. Questo apporta una certa imprecisione della determinazione dell'età assoluta di un reperto, che viene spesso espressa come un intervallo di tempo.

Usando la datazione al carbonio si è scoperto che la mummia «Ötzi» ha un'età tra i 5100-5400 anni (vedi figura 6)! La Sacra Sindone di Torino, considerata il lenzuolo mortuario di Gesù Cristo, è un altro e controverso esempio dell'uso della datazione al carbonio. Negli anni 1980 l'arcivescovo di Torino ha permesso ad un gruppo di ricercatori di prelevare alcuni piccoli campioni che sono poi stati analizzati in tre differenti laboratori: a Tucson (USA), a Oxford (UK) e a Zurigo. I risultati, consistenti tra di loro, forniscono una data tra il 1260-1390 (d.c). Questo suggerirebbe che il reperto risalga al Medioevo e non ai tempi di Gesù. Bisogna comunque sempre tenere conto tutte le possibili fonti di errore, quali la qualità del reperto ed eventuali contaminazioni nel corso dei secoli.



Fig. 6 – La mummia «Ötzi»

5. I limiti del metodo

La datazione al ^{14}C si basa in *prima approssimazione* sull'ipotesi che, almeno durante gli ultimi 50'000 anni, il flusso dei raggi cosmici sia restato costante. Da questo si può dedurre che anche il tenore di carbonio radioattivo non sia variato. Di conseguenza si può ritenere che, nel passato come nel presente, il rapporto tra ^{14}C e ^{12}C nell'atmosfera sia rimasto costante ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1.2 \cdot 10^{-12}$).

La *dendrocronologia*, cioè lo studio degli anelli di

crescita degli alberi, può essere usata per verificare se la concentrazione di ^{14}C sia davvero rimasta costante nel tempo. In molti tipi di albero si osserva la crescita di un anello per anno. Il legno di tali anelli rimane poi invariato nel corso di tutta la vita dell'albero. Determinando la concentrazione di carbonio radioattivo in anelli la cui età è nota ed assoluta, è possibile risalire al rapporto tra ^{14}C e ^{12}C nell'atmosfera al tempo della crescita dell'anello. Se abbiamo un albero che ha 500 anni, possiamo misurare il radiocarbonio in 500 anelli e dunque trovare quale concentrazione corrisponde ad un certo anno. Le misurazioni di anelli di crescita hanno mostrato che 10'000 anni fa la concentrazione del ^{14}C era più elevata (circa 10%) di quella agli inizi del Novecento. Circa 1000 anni fa tale concentrazione era bassa ma poi è di nuovo lievemente risalita. Si pensa che tali oscillazioni siano dovute all'attività del sole che cambia e che dunque influenza i raggi cosmici. Inoltre con l'inizio dell'industrializzazione e dell'uso di carbone come fonte energetica la concentrazione del ^{14}C è nuovamente diminuita. Infatti il carbone bruciato libera grandi quantità di carbonio stabile e quindi non radioattivo giacché esso è già da lungo completamente decaduto. Con la costruzione e l'uso di bombe atomiche, negli ultimi 50 anni l'uomo ha prodotto numerosi isotopi radioattivi, tra cui carbonio. Questo ha portato negli anni 1960 ad un valore di ^{14}C doppio rispetto agli anni precedenti gli esperimenti atomici.

Dunque ritenere che il rapporto tra ^{14}C e ^{12}C nell'atmosfera sia rimasto costante è solo un'approssimazione e per una datazione più precisa è dunque necessario tenere conto con adeguate calibrature (per esempio con gli anelli degli alberi) del suo cambiamento.

La datazione al carbonio ^{14}C viene ulteriormente complicata nel caso che il carbonio non abbia seguito la via più diretta per arrivare all'organismo e quindi al reperto. Esempi comuni sono:

- *Contaminazione*: materiale del suolo o materiale usato per la conservazione viene incorporato nel reperto causando un miscuglio di carbonio con differente contenuto di radiocarbonio. Con adeguati trattamenti chimici tali contaminazioni possono venire eliminate.
- *Effetto serbatoio*: questo accade se per esempio una parte del carbonio raggiunge il reperto attraverso gli oceani. Giacché la composizione del carbonio nei mari è differente da quella dell'atmosfera, questo porta a risultati sbagliati. Misure dell'isotopo stabile permettono di scoprire tale effetto poiché anche la concentrazione dell'isotopo stabile è diversa nei mari rispetto all'atmosfera.

Un'ultima fonte di errore è l'imprecisione nel tempo di dimezzamento del ^{14}C . Per convenzione viene ancora usato il valore trovato originariamente da Libby, $t_{1/2} = 5568$ anni, che è inferiore al valore determinato con tecniche moderne e più accurate ($t_{1/2} = 5730$ anni).

6. Esempi

Esercizio 1

Qual è l'età di un campione che contiene una concentrazione di ^{14}C quattro volte inferiore di quella di un essere vivente?

Soluzione – Se il campione ha una concentrazione di carbonio radioattivo quattro volte inferiore a quella di un essere vivente, tale concentrazione è stata dimezzata 2 volte. Dopo il primo dimezzamento si hanno $N(t1) = N_0/2$ nuclei e dopo il secondo dimezzamento si hanno $N(t2) = N(t1)/2 = N_0/4$ nuclei, ossia 4 volte meno. Per ogni dimezzamento si abbisognano 5730 anni. L'età del campione è dunque di $2 \cdot 5730 = 11'460$ anni

In generale dopo n tempi di dimezzamento, il numero di nuclei radioattivi e l'attività del campione diminuiscono di un fattore $(1/2)^n$.

Esercizio 2

Un osso contenente 200 g di carbonio ha un'attività di 400 decadimenti al minuto. Quanto è vecchio l'osso?

Soluzione – Usiamo dapprima un calcolo approssimato. Se l'osso provenisse da un organismo vivente per il quale si ha un rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1.2 \cdot 10^{-12}$, ci aspettiamo un'attività di [vedere anche paragrafo 4]:

$A = (13.8 \text{ decadimenti al minuto per } 1 \text{ g}) \cdot 200 \text{ g} = 2760 \text{ decadimenti al minuto}$. Poiché il rapporto $400/2760 = 0.145$ vale circa $1/7$, il campione deve essere vecchio di quasi 3 tempi di dimezzamento, ossia $3 \cdot 5730 = 17'190$ anni. 3 tempi di dimezzamento riducono infatti l'attività di un fattore $1/8$. Per trovare l'età del reperto con maggiore precisione usiamo l'osservazione generale presentata nell'esercizio 1: dopo n tempi di dimezzamento l'attività è diminuita di un fattore $(1/2)^n$. n può essere ricavato dall'espressione:

$$(1/2)^n = (400/2760), \text{ cioè } 2^n = 6.9$$

Usando il logaritmo troviamo:

$$n \cdot \ln(2) = \ln(6.9) \text{ e infine } n = 2.79$$

L'età dell'osso è pertanto

$$t = 2.79 \cdot t_{1/2} = 2.79 \cdot 5730 = 15'987 \text{ anni}$$

Esercizio 3

- Quanti atomi di ^{14}C contiene 1 g di carbonio che ha un'età di 5730 anni?
- Per quanto tempo si deve misurare questo campione nella datazione convenzionale per osservare 1000 decadimenti?
- Quanto dura una misurazione AMS (Accelerator Mass Spectrometry) se si vogliono misurare 1000 atomi ^{14}C ?

Soluzione – 1 g di carbonio contiene approssimativamente $6.02 \cdot 10^{23}/12$ atomi di carbonio di ^{12}C . Di fatti sappiamo dalla chimica che 1 mole di $^{12}\text{C} = 6.02 \cdot 10^{23}$ atomi = 12 g. Il numero $6.02 \cdot 10^{23}$ si chiama numero di Avogadro.

Con il rapporto tra ^{12}C e ^{14}C di $1.2 \cdot 10^{-12}$ possiamo poi trovare gli atomi di ^{14}C , presenti in quantità assai minori. Tuttavia il campione ha 5730 anni e perciò esso contiene solo la metà di carbonio radioattivo rispetto ad un campione odierno. Troviamo dunque:

$$N = (6 \cdot 10^{23}/12) \cdot (1.2 \cdot 10^{-12})/2 = 3 \cdot 10^{10} \text{ atomi di } ^{14}\text{C}$$

L'attività del campione è:

$$A = 3 \cdot 10^{10} \cdot \lambda_{^{14}\text{C}} = 3 \cdot 10^{10} / 8267 \text{ decadimenti all'anno} = 6.9 \text{ decadimenti al minuto}$$

Pertanto per 1000 decadimenti bisogna misurare durante circa **145 minuti**.

Una misurazione AMS permette per un campione con $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1.2 \cdot 10^{-12}$ di misurare 50 atomi di ^{14}C al secondo. Per un campione che ha un'età di 5730 anni e dunque la metà degli atomi di carbonio radioattivo si deve misurare durante $t = 1000/50 \cdot 2 = 40$ secondi per osservare 1000 atomi ^{14}C .

Referenze

1. http://www.digilander.iol.it/alexio/carbonio_14.htm
La datazione radiometrica
2. <http://www.educeth.ethz.ch/physik/leitprog/radio/additum.html>
Breve riassunto sulla datazione al ^{14}C con parecchi esempi
3. <http://www.c14dating.com/k12.html>
La datazione al ^{14}C
4. <http://webmuseen.de/14C.html>
Breve riassunto ad immagini sulla datazione al ^{14}C
5. <http://www.radiocarbon.org>
Elenco dei più importanti laboratori nel mondo che usano la tecnica del ^{14}C e presentazione di programmi di calibratura
6. *Spektrum der Wissenschaft*, Dossier Nr. 1/97: Radioaktivität, pag. 40-45
I limiti della datazione al ^{14}C
7. <http://www.uni-kiel.de/leibniz>
Il laboratorio Leibniz all'università di Kiel offre un servizio di datazione al ^{14}C (con il metodo tradizionale o con lo spettrometro di massa)