

## LE TECNICHE PIU' DIFFUSE DI RADIODATAZIONE

## TRATTAZIONE TEORICA

Il **decadimento radioattivo** è un fenomeno attraverso cui un nucleo atomico si trasforma in un nucleo di un elemento diverso, con emissione di particelle, come elettroni o nuclei di elio, e radiazioni. La materia è composta da atomi, ciascuno dei quali possiede un proprio numero atomico che indica il numero di protoni presenti nel nucleo dell'atomo. Degli elementi possono esistere diversi **isotopi**, ovvero gli atomi di uno stesso elemento possono differire per massa atomica, quindi per numero di neutroni presenti nel nucleo. Determinati isotopi di un elemento sono chiamati **nuclidi**, alcuni di questi sono **instabili** (radioattivi) e ad un tempo casuale possono decadere, trasformandosi in un isotopo più stabile, anche di un altro elemento; esempi di isotopi instabili sono il  $^3\text{H}$  (idrogeno-3, detto anche “trizio”) e il  $^{14}\text{C}$  (carbonio-14).

La **disintegrazione di un nucleo radioattivo** è un fatto statistico, non è, infatti, possibile in nessun modo sapere quando un nucleo radioattivo si disintegrerà. Tuttavia, anche in presenza di pochi milligrammi di una sostanza, si hanno sempre a disposizione milioni, se non miliardi di atomi, per cui è possibile statisticamente sapere con buona precisione quanti di essi si disintegreranno in un certo intervallo di tempo. Si definisce **radioattività** o attività di una sorgente radioattiva il numero di disintegrazioni che avvengono nell'unità di tempo. L'unità ufficiale di radioattività è il Becquerel, che corrisponde ad una disintegrazione per secondo.

Esistono diverse **tipologie di decadimento radioattivo**:

- **Decadimento  $\alpha$** , in cui un nucleo di numero atomico  $Z$  e numero di massa  $A$  emette una particella  $\alpha$ , ovvero un nucleo di elio, e si trasforma in un nucleo di numero atomico  $Z-2$  e numero di massa  $A-4$ . 
$${}_{92}^{238}\text{U} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{90}^{234}\text{Th}$$
- **Decadimento  $\beta$** , in cui il nucleo emette una particella  $\beta^-$  (o  $\beta^+$ ), cioè un elettrone e un neutrino (o positrone e antineutrino), e si trasforma in un nucleo avente numero atomico  $Z+1$  (o  $Z-1$ ) e stesso numero di massa. 
$${}_{90}^{234}\text{Th} \longrightarrow {}_{91}^{234}\text{Pa} + e^-(\beta^-) + \bar{\nu}$$
- **Decadimento  $\gamma$** , derivante da una diseccitazione nucleare, in cui il nucleo eccitato emette un raggio  $\gamma$ , ossia un fotone energetico, portandosi a un livello di energia minore, senza però mutare la natura dell'elemento. 
$${}_Z^AX \longrightarrow {}_Z^AX + \text{fotoni } \gamma$$

Nonostante un isotopo instabile possa decadere in qualunque momento, gran parte degli isotopi decade seguendo la **legge del decadimento radioattivo** ad un tasso di decadimento espresso dal **tempo di dimezzamento**. Dopo un tempo pari all'emivita, metà degli isotopi radioattivi presenti in una campione sono decaduti. Molte sostanze radioattive decadono da un isotopo fino ad un isotopo stabile attraverso una serie di passaggi conosciuta come catena di decadimento. Gli isotopi utili per la datazione radiometrica sono quelli con vita media da poche migliaia di anni fino a miliardi di anni. La vita media di un isotopo è **costante nel tempo**, non è infatti influenzata da fattori esterni quali la temperatura, i processi chimici, la presenza di campi magnetici o elettrici. In qualsiasi materiale contenente un nuclide radioattivo, il rapporto tra la quantità di isotopi originari e la quantità di prodotti di decadimento (figlio) evolve nel tempo in modo prevedibile man mano che gli isotopi instabili decadono. Questa prevedibilità permette di utilizzare la quantità di determinati nuclidi in un campione per conoscere la quantità dei nuclidi originaria, permettendo così di datare un fossile che contiene l'isotopo, sfruttando la legge del decadimento radioattivo per calcolare l'**età esatta**. La legge si ottiene come segue:

$N(t)$  è il numero (molto grande) di nuclei radioattivi di un certo isotopo instabile. Dopo un breve intervallo di tempo  $\Delta t$ , una parte di quei nuclei è decaduto, sarà quindi sopravvissuto un numero di nuclidi  $N(t + \Delta t) < N(t)$ . La quantità di nuclei che si è disintegrata è pari a:

$$\Delta N = N(t + \Delta t) - N(t)$$

L'attività del radioisotopo, cioè il numero di nuclei che si sono disintegrati nell'unità di tempo, è data dal rapporto:

$$R = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t}$$

Se  $\Delta t$  tende a 0, quindi l'intervallo di tempo considerato diventa piccolissimo, è necessario calcolare il limite di  $R(t)$ , ottenendo così l'attività di quell'isotopo radioattivo. Questo rapporto è il **rapporto incrementale** di  $N(t)$ , e il suo limite per  $\Delta t$  tendente a 0, è la **derivata** di  $N$  rispetto al tempo (con segno negativo perché la quantità di nuclidi è in diminuzione):

$$R(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(N(t + \Delta t) - N(t))}{\Delta t} = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Qualunque sia la natura dell'isotopo, il numero di atomi che decadono è direttamente proporzionale al numero  $N$  di atomi inizialmente presenti all'istante  $t$ . Per questo si esprime normalmente la radioattività riferita all'unità di materia.

Quindi:

$$R(t) = \lambda N$$

$\lambda$  è una costante di proporzionalità detta costante di disintegrazione, che ha come dimensioni fisiche l'inverso del tempo ( $s^{-1}$ ). Confrontando le uguaglianze otteniamo un'**equazione differenziale**:

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

$$dN = -\lambda N dt$$

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

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt$$

$N_0$  è il numero di nuclei dell'isotopo all'istante  $t = 0$ ;

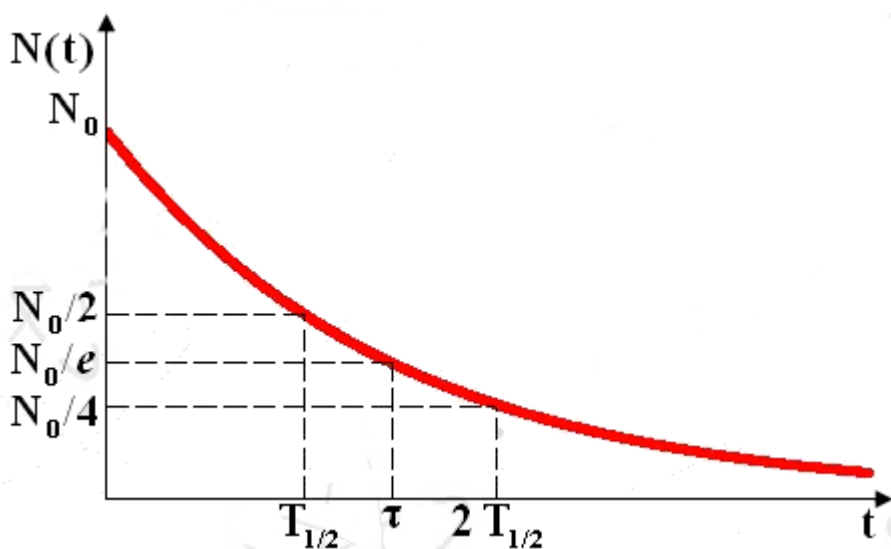
$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

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

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

Si ottiene quindi la **legge del decadimento radioattivo**. Essa esprime che il numero di nuclei non ancora disintegrati **decresce esponenzialmente nel tempo**.

Grafico della funzione



$$e^{-\lambda t} = \frac{1}{2}$$

**Emivita o tempo di dimezzamento:**

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

## APPLICAZIONI TECNOLOGICHE

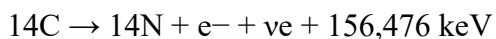
È quindi possibile sfruttare il decadimento radioattivo per **datare** reperti archeologici e fossili, a partire dall'osservazione della quantità di un isotopo radioattivo presente all'interno del materiale. È importante, tuttavia, non attribuire ai metodi di radiodating una certezza assoluta che sicuramente non possiedono.

I metodi più diffusi di datazione radiometrica si dividono in metodi a decadimento e metodi ad accumulo:

**Metodi a decadimento:** Interessano l'utilizzo di radionuclidi naturali, che hanno un tempo di decadimento breve in confronto all'età della Terra e che esistono solo in quanto continuamente formati dall'azione dei raggi cosmici sulle molecole presenti nell'alta atmosfera. Proprio per il loro **corto periodo di decadimento**, la datazione dei reperti con questi metodi interessa più campi come l'archeologia.

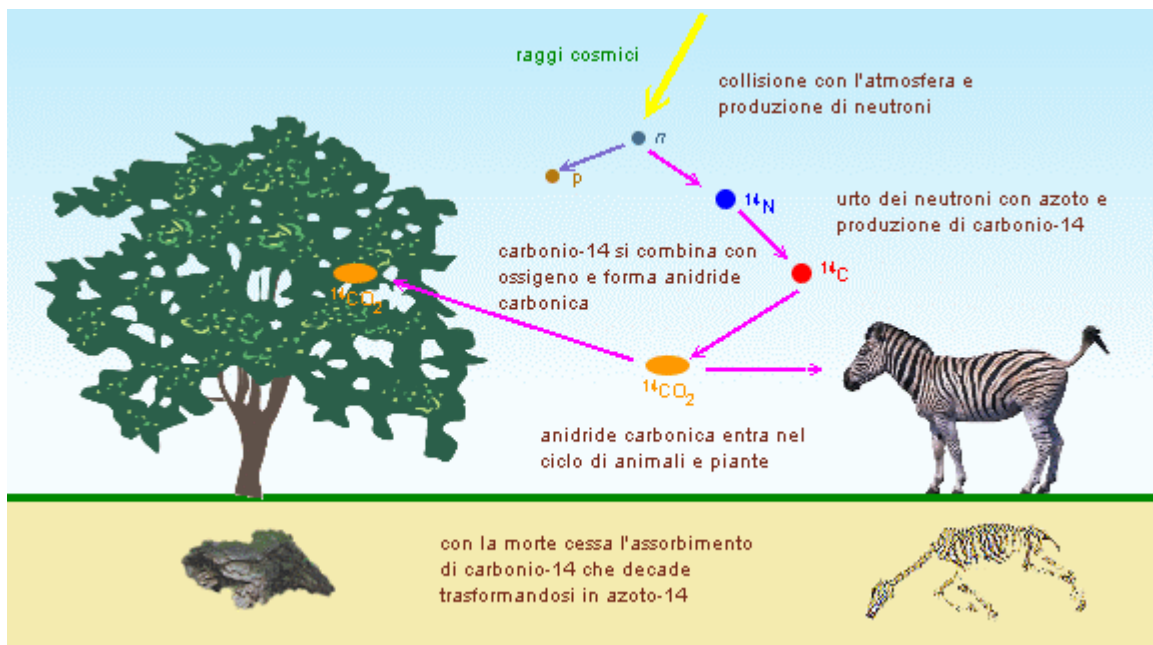
### **Metodo del radiocarbonio 14C**

Il carbonio-14 o radiocarbonio, è un isotopo di carbonio **debolmente radioattivo** ed è un cronometro isotopico. Esso decade secondo la **modalità beta-**, al termine del processo il nucleo si trova con un neutrone in meno ed un protone in più, cioè con 7 protoni e 7 neutroni. In seguito alla disintegrazione, il 14C si trasforma perciò in 14N (azoto-14, stabile e non radioattivo).



Venne scoperto il 27 febbraio 1940 dal chimico statunitense Willard Frank Libby, che per questa scoperta ottenne il Premio Nobel nel 1960. Esso ha un'emivita di 5730 anni. Il carbonio-14 si forma continuamente nell'alta atmosfera, per effetto dei neutroni dei raggi cosmici sugli atomi di azoto-14. Si ossida rapidamente nell'aria per formare anidride carbonica. Tutti gli **esseri viventi**, nel corso della loro vita, **assimilano carbonio-14** dall'anidride carbonica, che viene scambiata continuamente con l'atmosfera attraverso processi di respirazione, fotosintesi oppure viene assimilata mediante la nutrizione a base di sostanze organiche. Finché un organismo è vivo, il rapporto tra la sua

concentrazione di  $^{14}\text{C}$  e quella degli altri isotopi di carbonio si mantiene costante e uguale a quella che si riscontra nell'atmosfera. Alla morte dell'organismo questi processi hanno fine, l'organismo non scambia più carbonio con l'esterno e la **quantità di carbonio-14 inizia a diminuire**, ad un tasso determinato dalla **legge del decadimento radioattivo**. Conoscendo quindi l'**emivita** dell'isotopo, è possibile risalire alla **datazione di un reperto**. La datazione al radiocarbonio è un metodo progettato anche per misurare la radioattività residua.



### Esercizio esplicativo:

Il numero di nuclei instabili ancora presenti dopo un tempo  $t = 5,00$  anni è  $N$ , mentre il numero inizialmente presente è  $N_0$ . Determina il rapporto  $N/N_0$  per il  $^{14}\text{C}$  di emivita  $T_{1/2} = 5730$  y.

Utilizzo la legge del decadimento radioattivo

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

Applico la formula, calcolando il valore di  $\lambda$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{5730 \text{ y}}$$

Calcolo il valore del rapporto

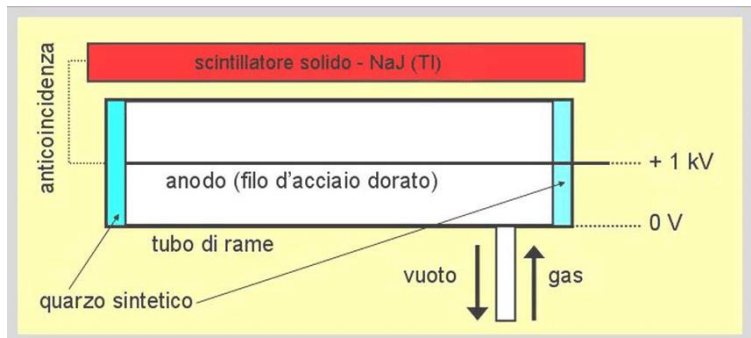
$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda 5,00 \text{ y}} = 0,99$$

Per datare un campione occorre confrontare la sua radioattività specifica oppure il rapporto  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  in un campione. Esistono quindi due modalità:

- Contare la radioattività residua dovuta al  $^{14}\text{C}$  (**metodo radiometrico**)

- **Mediante un contatore**

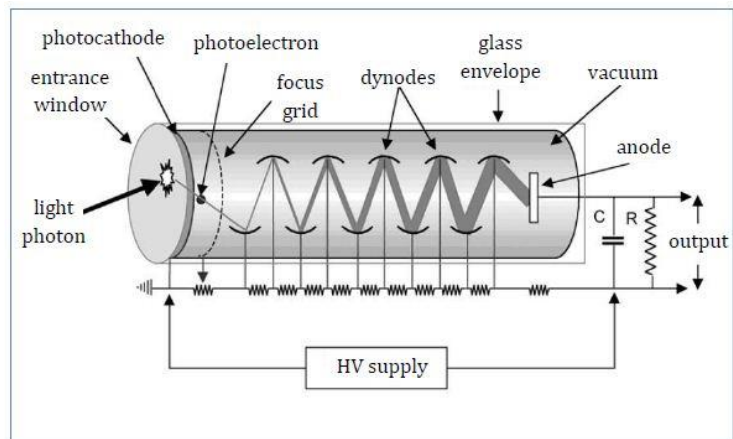
**proporzionale a gas:** una tecnica di datazione radiometrica convenzionale che **conteggia le particelle beta** emesse da un campione. Le particelle beta sono prodotti del decadimento del



radiocarbonio. Con questo metodo, il carbonio del campione viene convertito in anidride carbonica gassosa prima della misurazione nel contatore proporzionale a gas.

- **Mediante scintillazione liquida (LSC):**

una tecnica di datazione radiometrica convenzionale che **conteggia** anch'essa le particelle beta emesse da un campione. Il campione in forma liquida viene aggiunto all'interno di uno scintillatore. Questo produce un lampo di luce quando interagisce



con una particella beta, prodotta dal decadimento dell'isotopo. Una provetta contenente il campione viene passata tra due fotomoltiplicatori ed il conteggio avviene solo quando entrambi i dispositivi registrano il lampo di luce.

Nel metodo radiometrico, che misura la radioattività, il  $^{14}\text{C}$  residuo viene rilevato solo quando decade beta con l'emissione di particella beta. Solamente pochi, però, degli atomi di  $^{14}\text{C}$  decadono in un tempo ragionevole e l'efficienza di conteggio non è mai preciso al 100%, comportando una **scarsa sensibilità** del metodo. Per accumulare un conteggio statisticamente accettabile, occorre avere a disposizione un sufficiente numero di atomi di  $^{14}\text{C}$  e "contarli" per un **tempo abbastanza lungo**. Occorrono, infatti, **grammi di sostanza** e tempi di conteggio di ore, giorni o settimane. In compenso il metodo è relativamente **economico**.

- Ricavare il **rapporto  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$**  mediante **spettrometria di massa con acceleratore (AMS)**:

Il metodo moderno di datazione al radiocarbonio, il più utilizzato e più efficiente di misurare il contenuto di radiocarbonio di un campione. Questo metodo non prevede il conteggio delle particelle beta, ma del numero di atomi di carbonio presenti nel campione. Con uno **spettrometro di massa**, uno strumento che sfrutta un campo magnetico per separare particelle aventi stessa carica e velocità, ma massa diversa, utile quindi a misurare la percentuale di ogni isotopo dentro un campione, si determina la **quantità di  $^{14}\text{C}$**  contenuta in un reperto archeologico organico (ad es. un reperto di osso) **in rapporto al  $^{12}\text{C}$** , un isotopo stabile del carbonio. In base alla differenza tra il rapporto registrato con questo metodo e il rapporto tra  $^{12}\text{C}$  e  $^{14}\text{C}$  in atmosfera (uguale in un organismo vivente), è possibile datare il campione analizzato.

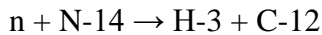


Il metodo AMS registra tutti gli atomi di carbonio, nonostante l'**efficienza** di conteggio non è mai del 100% anche in questo caso, la **sensibilità dello strumento** è circa 1.000-10.000 volte maggiore del precedente. Bastano frazioni di milligrammi di carbonio puro e l'analisi dura pochi minuti. L'apparecchiatura necessaria ha, però, un **costo** enormemente maggiore.

La datazione al radiocarbonio è applicabile solo per alcuni materiali organici e inorganici (non per i metalli) e ha trovato applicazione in campi come la geologia, la scienza atmosferica, l'oceanografia, la paleoclimatologia ed anche la biomedicina. Esistono, però, situazioni in cui applicare questo metodo è impossibile, per esempio nella datazione dei tessuti, essi, infatti, assorbono sporcizia dai corpi con i quali vengono a contatto, e ciò altera in modo significativo la percentuale di carbonio-14 in essi contenuto, e quindi anche la loro età presunta. Normalmente con il metodo del radiocarbonio, si ottengono datazioni con un margine di **errore compreso tra il 2 e il 5 %** e fino ad **un'età massima di circa 50.000 anni**. Per campioni più antichi, la concentrazione di  $^{14}\text{C}$  è troppo bassa per poter essere misurata con sufficiente precisione. Uno dei reperti datati attraverso questo metodo è stata la mummia di Otzi, scoperta nel 1991 sulle Alpi Venoste. Nel 2008, la datazione al radiocarbonio gli attribuì un'età compresa tra 5300 e 5200 anni.

## Metodo del trizio

Il Trizio (H-3) è l'**isotopo più pesante dell'idrogeno**, esso possiede un nucleo molto instabile composto da un protone e due neutroni. Come per il C-14, esso viene prodotto dai raggi cosmici per interazione con l'azoto nell'alta atmosfera, secondo la reazione:



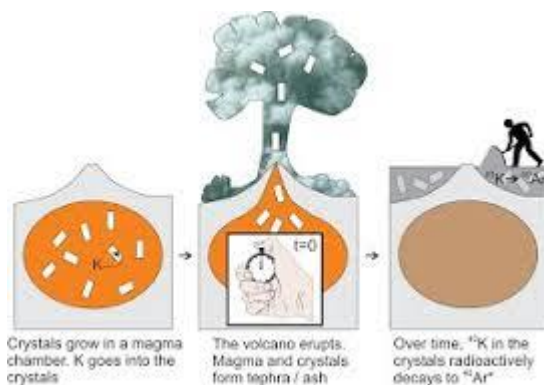
Il trizio si scioglie nel vapore atmosferico entrando così a far parte del ciclo geochimico dell'acqua. Nel 1949 Faltings e Haetech e, indipendentemente, Willard F. Libby, misurarono la quantità di trizio prodotto dalla radiazione cosmica, valutandola in 30 atomi per centimetro quadro al minuto. Esso decadeva con periodo di 12,5 anni emettendo radiazioni  $\beta$  con energia di 19 KeV e trasformandosi in Elio-3 (He-3). A causa della ricaduta del materiale radioattivo, come conseguenza degli esperimenti termonucleari russi e americani, il valore di trizio nell'atmosfera si è elevato. Dal 1962, dopo la cessazione degli esperimenti termonucleari nell'atmosfera, questa quantità artificialmente prodotta va decadendo con un **tempo di dimezzamento variabile tra i 12 e i 26 anni**. A causa di queste implicazioni, il trizio è di notevole interesse per la meteorologia, l'oceanografia e per lo studio degli spostamenti di masse d'acqua e sorgenti, mentre non ha alcun interesse per le misure di età.

## Metodi ad accumulo

Sono i più importanti metodi utilizzati in geologia. Si avvalgono dell'utilizzo di alcuni radionuclidi naturali aventi **tempi di dimezzamento molto lunghi** e quindi presenti già al momento della formazione della Terra. Tali metodi vengono detti "ad accumulo" poiché il decadimento radioattivo, nel tempo, fa aumentare il prodotto del decadimento.

## Metodo potassio-argon

Il metodo sfrutta il decadimento di potassio-40 in argon-40. Il potassio in natura è presente con tre isotopi: il 39K, il 40K e il 41K, il potassio 40K è instabile e decade in modalità beta. L'isotopo radioattivo naturale del potassio può subire un duplice decadimento: per l'89% gli atomi di 40K si trasformano in 40Ca per decadimento  $\beta^-$ ; per il restante 11% gli atomi di 40K si trasformano in 40Ar per cattura elettronica (assorbendo un elettrone), emettendo un fotone gamma da 1460 KeV. **Il processo di decadimento del 40K in 40Ar** è utilizzato in **geologia** come misura del tempo geologico



sulla base del rapporto 40K/40Ar. Il metodo è simile a quello del radiocarbonio, conoscendo il tempo di decadimento 40K (con emivita di 1,3 miliardi di anni) e svolgendo una misurazione della quantità di 40Ar contenuta in un campione di roccia, si è in grado di fornire una stima della data di formazione della roccia. Il calcio, nonostante sia il prodotto di decadimento più



comune, essendo molto presente nella crosta terrestre, non è utilizzabile per la datazione. L'argon, al contrario, oltre ad essere meno presente in natura, è anche un gas nobile, ovvero non reagisce facilmente con altri elementi. Viene utilizzato per datare **rocce, principalmente vulcaniche**, risalenti a centinaia e anche migliaia di milioni di anni fa, con un **errore di circa 10%**.

### Metodo uranio-piombo

Il metodo sfrutta il **decadimento dell'uranio-235 in piombo-207** con un'emivita di circa 700 milioni di anni e quello **dell'uranio-238 in piombo-206** con un'emivita di circa 4,5 miliardi di anni. Ideato da B. B. Boltwood nel 1907 e permette di datare rocce che si sono formate e cristallizzate da un milione a oltre 4,5 miliardi di anni fa con una precisione nell'ordine dello 0,1-1% di errore. Benché possa essere usato per diversi materiali, questo metodo di datazione è solitamente **utilizzato sul minerale zircone**. Lo zircone incorpora gli atomi di uranio nella sua struttura cristallina, sostituendoli allo zirconio, respingendo però il **piombo**. Si può quindi ritenere che tutto il piombo riscontrato in un dato cristallo di zircone sia radiogenico, cioè sia stato interamente prodotto da un processo di decadimento radioattivo verificatosi dopo la formazione del minerale. In questo modo, si può utilizzare il **rapporto tra piombo e uranio** presente nel minerale per determinare l'età di quest'ultimo. Il metodo si basa su due diverse catene di decadimento, la serie dell'uranio dall'  $^{238}\text{U}$  al  $^{206}\text{Pb}$ , con un periodo di dimezzamento di circa 4,5 miliardi di anni, e la serie dell'attinio dal  $^{235}\text{U}$  al  $^{207}\text{Pb}$ , con un periodo di dimezzamento di circa 710 milioni di anni.

### Metodo del piombo

Oltre ad utilizzare i rapporti tra uranio e piombo, è possibile considerare solamente gli isotopi di quest'ultimo elemento. Il **piombo** è presente in natura sotto forma di **4 isotopi stabili**, aventi massa 204, 206, 207 e 208. Tra questi, l'unico che non è prodotto da decadimento radioattivo è il Piombo-204. Tenendo conto ipoteticamente che il Piombo-204 sia rimasto sempre in quantità costante, col passare del tempo la quantità degli altri isotopi del piombo è invece andata sempre più aumentando. Si è verificato cioè un **aumento del valore dei rapporti esistenti in natura** (prima dell'inizio del decadimento degli isotopi diversi dal piombo-204)  $\text{Pb-206}/\text{Pb-204}$ ,  $\text{Pb-207}/\text{Pb-204}$ ,  $\text{Pb-208}/\text{Pb-204}$ . Questi rapporti possono essere usati per stabilire l'età dei minerali, dal momento che si **conoscono i periodi di decadimento che li hanno prodotti**. Misurando la composizione isotopica del piombo, è quindi possibile ottenere, tramite il rapporto  $\text{Pb-radiogenico}/\text{Pb-204}$  naturale, l'età della roccia o del minerale, in quanto rapporti isotopici più alti appartengono a rocce più vecchie e viceversa.



Questi ultimi due metodi sono utili per datare materiali come travertini, concrezioni, carbonatiche, stalattiti e stalagmiti.

**Esercizio esplicativo:**

Il tempo di dimezzamento per il decadimento  $\alpha$  del  $^{238}\text{U}$  è di  $4,47 \cdot 10^9$  anni. Determina l'età in anni di un campione di roccia che contiene il 60% del numero originario di atomi di  $^{238}\text{U}$ .

$N=60\% \text{ } ^{238}\text{U}$

Applico la formula e calcolo il valore di  $\lambda$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{4,47 \cdot 10^9 \text{y}} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{y}^{-1}$$

Applico la legge del decadimento radioattivo e svolgo i calcoli, ricavando il valore del tempo  $t$

$$\frac{60}{100} N_0 = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$0,6 = e^{-1,6 \cdot 10^{-10} \text{y}^{-1} t}$$

$$\ln 0,6 = -1,6 \cdot 10^{-10} \text{y}^{-1} t$$

$$t = \frac{\ln 6}{-1,6 \cdot 10^{-10} \text{y}^{-1}} = 3,3 \cdot 10^9 \text{y}$$

**Sitografia:** [fmboschetto.it](http://fmboschetto.it); [treccani.it](http://treccani.it); [unicam.it](http://unicam.it); [radiocarbon.com](http://radiocarbon.com); [gmpe.it](http://gmpe.it); [sbai.uniroma1.it](http://sbai.uniroma1.it); [radiospada.org](http://radiospada.org)