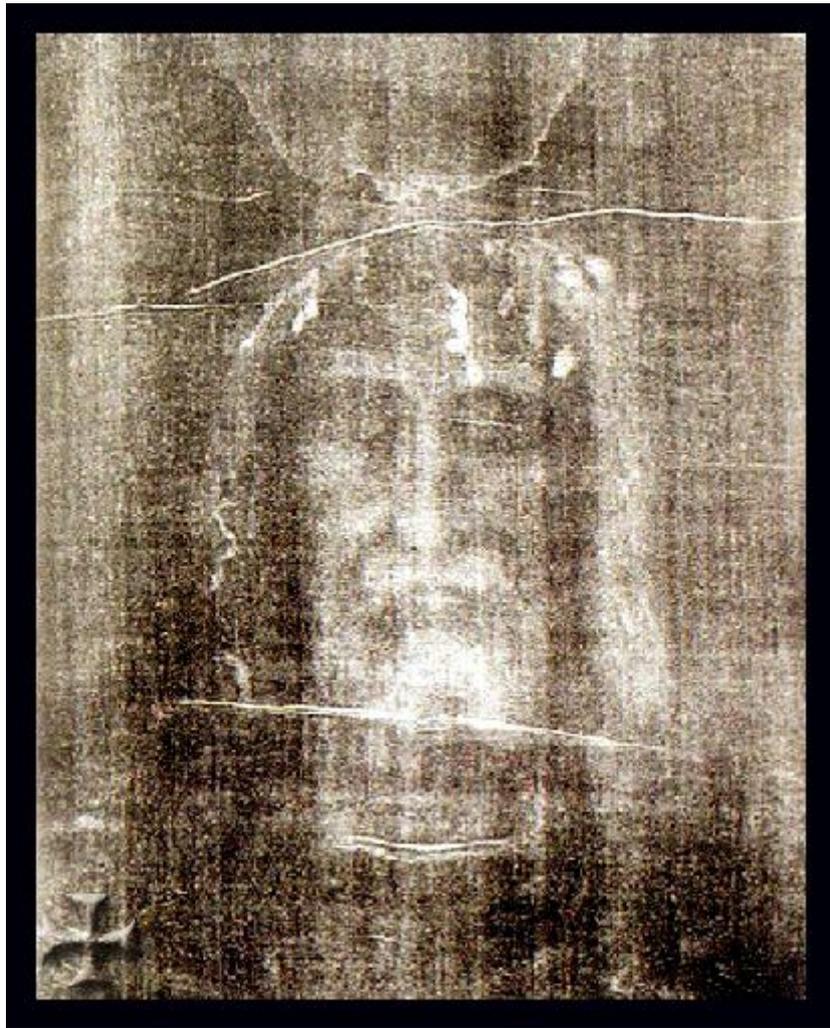


Quando?

Metodi fisici per la datazione archeologica



Matteo Veglianti

Indice

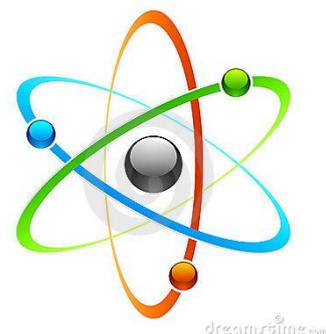
- Capitolo I: Datazione relativa: la stratigrafia
 1. Importanza della datazione
 2. Prime idee sulla stratigrafia
 3. Metodo stratigrafico: unità stratigrafica
 4. Datazione relativa: rapporti cronologici tra le diverse unità stratigrafiche
 5. Datazione assoluta: elementi datanti e misure fisiche

- Capitolo II: Datazione assoluta: il metodo del carbonio 14
 1. Storia e basi del metodo
 2. Isotopi del carbonio
 3. Decadimento radioattivo: caso del carbonio 14
 4. Formule utili
 5. Ciclo del carbonio 14
 6. Calcolo della data convenzionale
 7. Correzione col carbonio 13
 8. Effetti di contaminazione
 9. Altre correzioni
 10. Esempio 1: l'uomo di Similaun
 11. La misurazione del carbonio 14
 12. Misure di attività del campione
 13. Misure di spettrometria di massa
 14. Affidabilità delle datazioni radiocarboniche
 15. Dendrocronologia
 16. Esempio 2: la Sacra Sindone
 17. Critiche del metodo

- Capitolo III: Datazione assoluta: altri metodi fisici
 1. Termoluminescenza
 2. Risonanza di spin elettronico
 3. Datazione delle rocce
 4. Altri metodi

- Conclusioni

- Bibliografia



Capitolo I

Datazione relativa: la stratigrafia

1. Importanza della datazione

Tutti gli esseri umani hanno un'esperienza del tempo. Un individuo compie direttamente l'esperienza di un periodo di vita di circa 80 anni e può indirettamente avere esperienza di una o due generazioni precedenti attraverso i ricordi dei genitori o dei nonni. Tuttavia l'unico modo per conoscere eventi accaduti molti anni or sono è appellarsi alla storia, che ha proprio il compito di studiare documenti, testimonianze e reperti archeologici e descrivere gli eventi accaduti nelle varie epoche.

Anche se può sorprendere, per studiare il passato non è sempre indispensabile conoscere esattamente quanti anni fa sia accaduto un particolare avvenimento. Per esempio, il più grande risultato di Thomsen e Worsaae nel XIX secolo fu stabilire la tripartizione degli strumenti prodotti nell'antichità in base alle materie prime utilizzate: pietra, bronzo e ferro [1]; gli scavi confermarono il valore cronologico di questa sequenza: i manufatti in pietra comparvero prima di quelli in bronzo che a loro volta comparvero prima di quelli in ferro. Anche se non si sapeva quanto fosse durata l'età della pietra, l'età del bronzo e quella del ferro, gli archeologi potevano comunque affermare con esattezza che un reperto in pietra era più antico di uno in bronzo che a sua volta era più antico di uno in ferro. Questo modo di fare storia si basa sull'assunzione che se uno strato è coperto da un altro strato, il primo è più antico del secondo, questa idea è alla base della stratigrafia archeologica.

2. Prime idee sulla stratigrafia

La stratigrafia archeologica ha ricavato inizialmente e per un certo periodo i suoi principi dalla stratigrafia geologica.

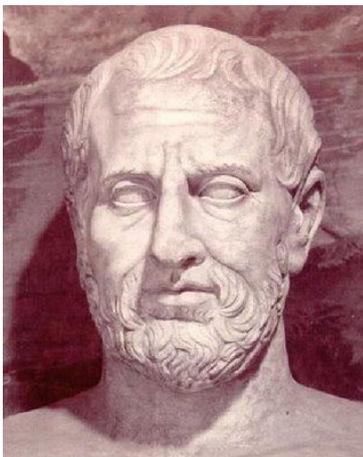


Figura 1: Teofrasto (371-287 a.C.), allievo e successore di Aristotele alla guida del liceo.

L'idea che studiando i resti nel sottosuolo si possa ricostruire la storia della Terra e dell'umanità è molto antica. Nel VI secolo a.C. si scoprono i primi resti fossili e si danno spiegazioni su questo fenomeno. Nel III secolo a.C. Eratostene spiega il fenomeno dei fossili supponendo che i continenti si muovano, sempre in quel periodo Teofrasto (figura 1), allievo e successore di Aristotele alla guida del Liceo, scrive un libro sulla pietrificazione, oggi perduto (le testimonianze sono di Plinio il vecchio) [2]. La cosa sorprendente è che dopo di lui non si

scrive più alcuna riga a riguardo. Solo nel 1669 Agostino Scilla e, indipendentemente, il vescovo Nicolò Stenone, sostengono le seguenti tesi:

- a) I fossili hanno un'origine animale

- b) Tra i fossili e le rocce che li contengono si può individuare una cronologia relativa
- c) Tra i vari strati di rocce si può individuare una cronologia relativa, nel senso che gli strati più in alto sono in genere più recenti di quelli sottostanti.

Il fatto che queste idee, dimenticate per 19 secoli, nascono contemporaneamente e indipendentemente nella mente dei due uomini citati sopra suggerisce che entrambi avevano letto la stessa opera, oggi ignota; inoltre, poiché queste idee non circolavano più in occidente da 19 secoli, la fonte di Scilla e Stenone dovrebbe essere molto vecchia e/o orientale [3].

Dal XVIII secolo ad oggi ci furono chiaramente ulteriori sviluppi, soprattutto sulle tecniche stratigrafiche. È soltanto durante l'ultima generazione che l'archeologia stratigrafica è riuscita a emanciparsi dalla geologia e dalla paleontologia per autodefinirsi come disciplina storica particolare. Da pochi anni, infine, si utilizzano anche metodi fisici per datare i reperti archeologici (vedremo in dettaglio questi metodi nei prossimi capitoli).

3. Metodo stratigrafico: unità stratigrafica



Figura 2: Si distinguono le diverse unità stratigrafiche, ciascuna identificata con un numero univoco all'interno dello scavo

Quando si effettua uno scavo archeologico, si individuano entità omogenee per composizione, consistenza e colore che rappresentano un "momento" particolare dell'evoluzione del sito e prendono il nome di Unità Stratigrafiche (US). Ad ogni US viene assegnato un numero progressivo (univoco all'interno dello scavo), eventuali reperti vengono conservati in contenitori (sacchetti, scatole) identificati dal numero della US di appartenenza (figura 2).

In realtà ogni US rappresenta un momento di distruzione del sito, mentre la superficie separante due US rappresenta un momento di vita, ossia un livello d'uso del sito. Facciamo questo esempio, inventato ma plausibile: in un certo periodo storico si distrusse un tempio pagano per fare posto ad una chiesa cristiana, allora i calcinacci del tempio furono spianati e su di essi venne costruita la chiesa. Supponiamo che in un momento storico successivo, a seguito di qualche catastrofe naturale, per esempio un terremoto, oppure a seguito di una guerra, la chiesa fu distrutta. Allora di nuovo i calcinacci della chiesa furono spianati e su di essi fu costruito un palazzo che oggi, per le stesse ragioni, è distrutto. Allora sul sito si possono individuare il livello d'uso odierno e subito sotto i resti del palazzo, che costituiscono la prima unità stratigrafica del sito (che possiamo numerare: US 1). Tolti tutti i calcinacci del palazzo si individua il livello d'uso dell'epoca in cui il palazzo era in piedi. Al di sotto di esso si ritroveranno i resti della chiesa, questo strato costituisce un'altra unità stratigrafica (US 2)

al di sotto delle macerie si può individuare il livello d'uso dell'epoca in cui la chiesa era ancora in piedi. Infine, sotto tale livello, si ritroveranno i resti del tempio pagano (US 3) con il relativo livello d'uso.

4. Datazione relativa: rapporti cronologici tra le diverse unità stratigrafiche

Si possono così studiare rapporti stratigrafici (o sequenze stratigrafiche) che possono essere del tipo: anteriore a ..., posteriore a ..., coevo a ...; la stratigrafia archeologica fornisce in ogni caso solamente datazioni relative, indicando in quale ordine si sono verificati gli eventi, senza dirti tuttavia "quando" questi hanno avuto luogo.

Per avere delle datazioni assolute occorre quindi poter datare almeno alcune tra le varie US individuate: quelle comprese cronologicamente tra due US datate, anche in assenza di una loro datazione specifica, avranno comunque un intervallo temporale entro il quale essere collocate.

5. Datazione assoluta: elementi datanti e misure fisiche



Figura 3: Monete bizantine rinvenute in uno scavo ad Ugento (LE) risalenti all'XI secolo [4]

Una datazione assoluta può essere fatta grazie ai cosiddetti "elementi datanti" contenuti negli strati. La regola generale assicura che una US viene datata grazie al più recente degli elementi datanti stratigraficamente affidabili presenti in essa (bisogna quindi prestare attenzione ad eventuali oggetti residui o intrusi). Tra gli elementi datanti possiamo citare le monete (dato il loro breve periodo di validità), le fibule ed altri ornamenti (visto che seguivano la moda), le ceramiche tipiche di un periodo (per lo stesso motivo), le armi, e così via.

Infine, a partire dalla metà del XX secolo, sono state approntate delle tecniche di datazione assoluta basate su misure fisiche, che

permettono da una parte di verificare datazioni effettuate con altri criteri dall'altra di poter collocare cronologicamente strati e/o strutture prive di elementi datanti. Tra queste tecniche le più diffuse sono quelle basate direttamente sul fenomeno della radioattività (tra cui la tecnica del carbonio 14, che verrà descritta nel prossimo capitolo); ci sono poi altre tecniche fisiche quali la termoluminescenza, la risonanza di spin elettronico e altre (che verranno descritte nel capitolo III).

Per esempio, se uno strato contenesse una moneta circolante nell'XI secolo o un tipo di calzatura dello stesso secolo, allora tutti gli oggetti appartenenti alla stessa unità

stratigrafica saranno datati all'XI secolo, ovviamente dopo aver effettuato le dovute verifiche come l'autenticità della moneta, oppure che essa e/o gli altri oggetti dello strato non siano stati aggiunti posteriormente (figura 3).

Può capitare, invece che in uno strato si trovi un cocciò di epoca sconosciuta e non si ha a disposizione alcun elemento per datare l'unità stratigrafica; a quel punto si può stimare l'età del cocciò con dei metodi fisici, così da poter datarlo, insieme a tutti gli altri oggetti appartenenti allo stesso strato.

Capitolo II

Datazione assoluta: il metodo del carbonio 14

1. Storia e basi del metodo

La tecnica del radiocarbonio (^{14}C o carboio-14) permette di datare qualsiasi materiale di origine organica, cioè che derivi da qualcosa che sia stato vivo, come ossa, legno, stoffa, carta, semi, polline, pergamena e pellame in genere, carboni, tessuti e fluidi biologici, risalendo così all'epoca della morte dell'individuo da cui proviene il campione, purché non siano passati più di 50-60 mila anni (dopo tale periodo, il carbonio-14 residuo è talmente esiguo da non permettere misure attendibili neppure con le tecniche più sofisticate).



Figura 4: Willard Libby (1908 - 1980) in una foto dei primi anni '60

Il metodo si basa sul lento decadimento del ^{14}C (isotopo radioattivo del carbonio), che costituisce quindi un ottimo "orologio" archeologico; tale metodo fu messo a punto e pubblicato tra il 1947 e il 1949 da un team di chimici dell'Università di Chicago diretti da Willard Libby (figura 4), che per questo ebbe il premio Nobel nel 1960. Libby e collaboratori datarono un campione dei legno di acacia proveniente dalla tomba del faraone Zoser (2700-2600 a.C.) e le loro previsioni sulla quantità di ^{14}C presente nel pezzo di legno furono confermate dalla misura sperimentale.

Le prime datazioni radiocarboniche si ebbero perciò a partire dal 1950. Nonostante che col passare del tempo ci si sia reso conto che i presupposti su cui si basava il metodo di Libby (che esamineremo più in dettaglio nei prossimi paragrafi) erano veri solo in prima approssimazione, la comunità scientifica ha comunque deciso di continuare ad eseguire le datazioni secondo tali assunti, si ottiene così una "datazione radiocarbonica convenzionale" (o *Conventional Radiocarbon Age, CRA*), che deve essere poi sottoposta a calibrazione al fine di ottenere una datazione calibrata.

La CRA è normalmente espressa in anni BP (*Before Present*, calcolati a ritroso a partire dal 1950); mentre la data calibrata è espressa come data di calendario in anni BC (*Before Christ*, avanti Cristo) o AD (*Anno Domini*, dopo Cristo).

2. Isotopi del carbonio

Ogni elemento si distingue da un altro per il numero di protoni nel suo nucleo (che è identico in tutti gli atomi di quell'elemento), detto anche numero atomico "Z", così, tutti gli atomi di idrogeno hanno un protone nel nucleo, tutti quelli di carbonio ne hanno sei, tutti quelli di ossigeno ne hanno otto e così via. Il numero di neutroni, invece, può variare da atomo ad atomo dello stesso elemento: varia così il numero totale di particelle nel nucleo,

o nucleoni, definito come numero di massa "A", mentre ovviamente resta immutato il numero di protoni.

Gli atomi di uno stesso elemento che differiscono solo per il numero di massa si chiamano isotopi, in quanto occupano lo stesso posto nella classificazione degli elementi: gli isotopi di un elemento, infatti, sono chimicamente indistinguibili tra loro (in realtà esiste una piccola differenza nella velocità di reazione, fenomeno che, come vedremo, conduce in alcuni casi al cosiddetto "frazionamento isotopico"). Per ogni elemento esiste un isotopo più abbondante, che comprende la maggior parte degli atomi, mentre gli altri sono rappresentati in piccole quantità (figura 5).

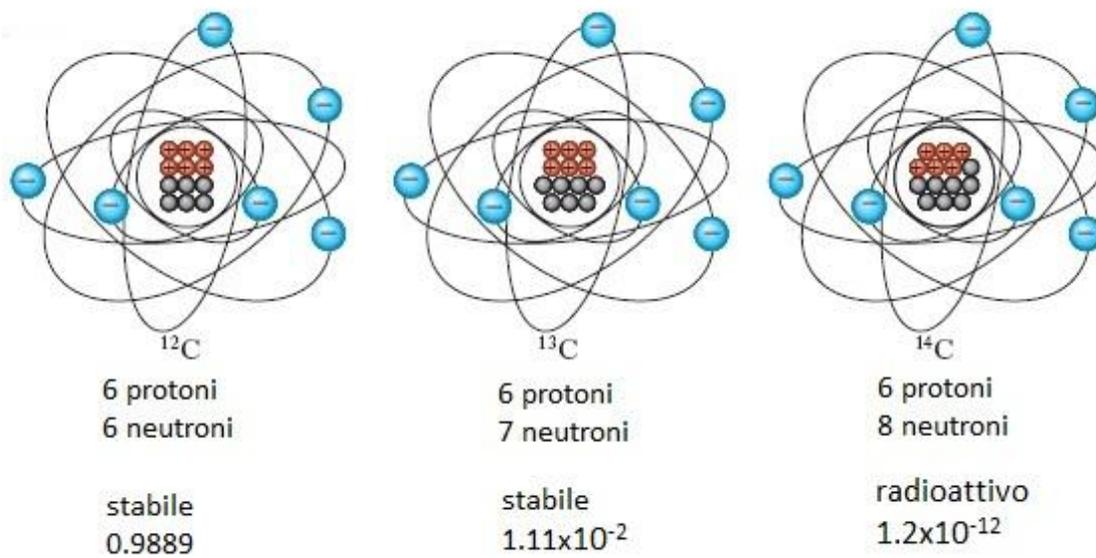


Figura 5. Isotopi del carbonio con relativo numero di protoni e neutroni, stabilità e frazione in natura [5]

3. Decadimento radioattivo: caso del carbonio-14

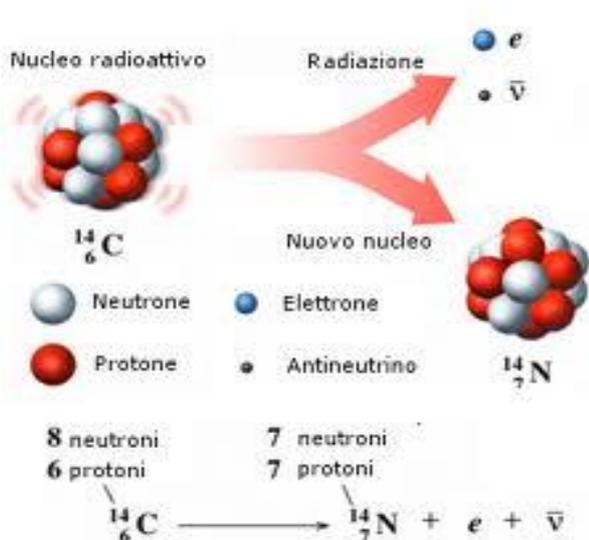


Figura 6: Decadimento β^- del carbonio-14

Alcuni isotopi sono stabili, altri no, ovvero tendono spontaneamente a raggiungere la stabilità modificandosi, emettendo radiazione e/o particelle. Un atomo del genere si dice instabile, o radioattivo (questo termine deriva dal fatto che il primo elemento ad essere così classificato fu il radio). I modi in cui gli elementi radioattivi possono modificarsi sono molteplici: decadimento α , decadimento β^- , decadimento β^+ , cattura elettronica, emissione γ .

Trascuriamo adesso gli altri metodi e approfondiamo il decadimento β^- poiché il ^{14}C decade proprio in questo modo.

Nel decadimento β^- un atomo modifica un neutrone del proprio nucleo trasformandolo in un protone ed emettendo un elettrone ed un antineutrino elettronico: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Un elemento A_ZX , quindi, a seguito di un decadimento β^- , subirà la seguente trasformazione: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta^- + \bar{\nu}$ [5].

Il carbonio-14, subisce quindi la seguente trasformazione: ${}^{14}_6C \rightarrow {}^{14}_7N + \beta^- + \bar{\nu}$. L'azoto-14 è stabile e quindi non decade ulteriormente (figura 6).

4. Formule utili [5]

In questo paragrafo richiamiamo alcune formule utili per i calcoli dei paragrafi successivi.

- Innanzitutto ricordiamo la **legge del decadimento radioattivo**:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ dove:}$$

$N(t)$ rappresenta il numero di atomi al tempo t ($t > 0$)

N_0 rappresenta il numero di atomi all'istante $t=0$

λ è chiamata "costante di decadimento" e rappresenta la probabilità di decadimento per unità di tempo.

- Si definisce poi "**attività**" il numero di decadimenti subiti nell'unità di tempo:

$$a(t) = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right|, \text{ definita positiva.}$$

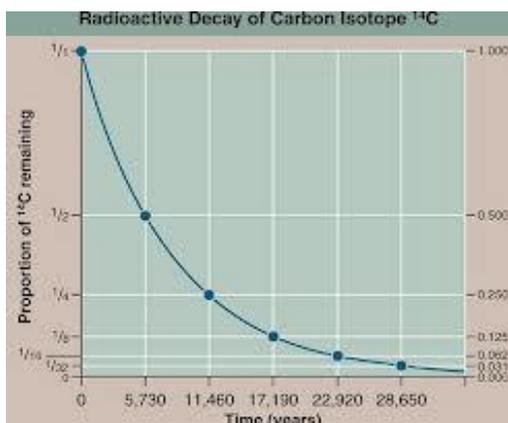
$$\text{Risulta immediato: } a(t) = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t).$$

L'unità di misura nel S.I. è il Becquerel (Bq); un Becquerel corrisponde ad un decadimento al secondo. Molto spesso però si utilizza l'unità di misura storica: il Curie (Ci); un Curie corrisponde all'attività di un grammo di ${}^{226}Ra$.

$$1Ci = 3.7 \cdot 10^{10} Bq ; 1Bq = 2.7 \cdot 10^{-11} Ci.$$

- Si definisce "**vita media**" (τ) il reciproco della costante di decadimento $\tau = \frac{1}{\lambda}$ e rappresenta il tempo dopo cui il numero di atomi radioattivi, così come la loro attività, si riduce di un fattore e , circa 3; infatti $N(\tau) = N_0 e^{-1} = \frac{N_0}{e}$.

- Infine, si definisce "**tempo di dimezzamento**" ($T_{1/2}$) il tempo dopo cui il numero di atomi



radioattivi, così come la loro attività, si è dimezzato.

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

$$a(T_{1/2}) = \lambda N(T_{1/2}) = \lambda \frac{N_0}{2} = \frac{a_0}{2}.$$

$$\text{Da ciò deriva: } e^{-\lambda T_{1/2}} = 2^{-1} \rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \sim \frac{0.693}{\lambda} =$$

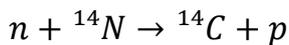
$$0.693\tau.$$

Figura 7: Decadimento radioattivo del carbonio-14

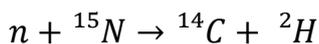
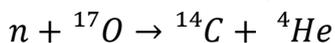
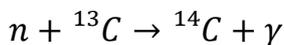
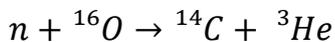
Nel caso del carbonio-14 il tempo di dimezzamento è di 5730 ± 30 anni (figura 7).

5. Ciclo del carbonio-14

Salvo fluttuazioni di cui occorrerà tener conto in fase di calibrazione, la frazione di carbonio-14 nell'atmosfera terrestre è pressoché costante. Dunque, visto che esiste un decadimento, deve necessariamente esistere un meccanismo di produzione di radiocarbonio. Esso infatti si genera a causa del bombardamento dei raggi cosmici, questi, interagendo con l'atmosfera, producono neutroni che reagiscono con gli elementi in essa presenti. La reazione di gran lunga più importante, sia per la sezione d'urto (1.7 barn) [5], sia per l'abbondanza dell'elemento bersaglio, è la seguente:



Altre reazioni che avvengono sono:



Conoscendo le sezioni d'urto σ_i e le abbondanze N_i dei vari elementi dell'atmosfera e noto il flusso Φ di neutroni è possibile calcolare la velocità di produzione dei nuclei di ${}^{14}\text{C}$: $R = \Phi \sum_i \sigma_i N_i = 1.0 \cdot 10^{19} \text{s}^{-1}$, pari a circa 7.5Kg/anno[5].

Sapendo che siamo in condizione di equilibrio secolare, cioè i meccanismi di produzione compensano il decadimento, deve essere $\frac{dN}{dt} = R - \lambda n = 0$, da cui si ricava la **quantità**

totale di carbonio-14 presente nell'atmosfera: $n = \frac{R}{\lambda} = 2.6 \cdot 10^{30}$ atomi, che equivalgono a 60 tonnellate. Un grammo di carbonio naturale contiene $N = 5 \cdot 10^{22}$ atomi di carbonio e quindi $N' = \frac{N}{1.2 \cdot 10^{-12}} = 6 \cdot 10^{10}$ atomi di ${}^{14}\text{C}$, pertanto la sua attività specifica vale $a = N' \lambda = 0.23 \text{ Bq/g}$ [5] (abbiamo evidenziato la quantità e l'attività del radiocarbonio presente nell'atmosfera perché questa conoscenza è utile per i nostri scopi, come vedremo).

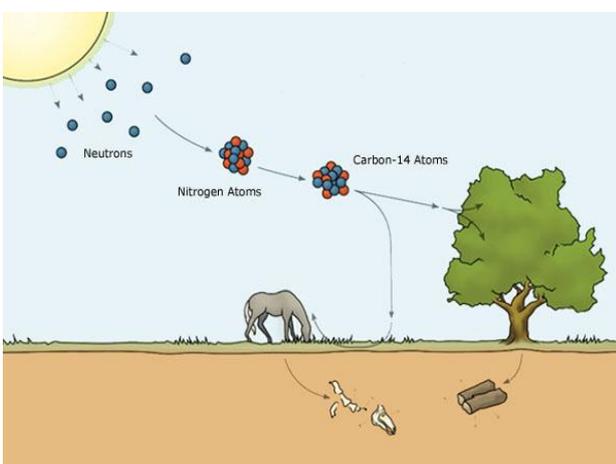


Figura 8: Ciclo del carbonio-14

Il carbonio-14 così formato è rapidamente ossidato in ${}^{14}\text{CO}_2$ ed entra nelle piante attraverso la fotosintesi e negli animali attraverso la catena alimentare (figura 8). Finché un individuo è vivo, scambia continuamente materia (e quindi anche carbonio) con l'esterno per questo motivo esiste un equilibrio tra la frazione di ${}^{14}\text{C}$ presente nell'atmosfera e quella presente negli esseri viventi, ossia finché un individuo

è vivo, la quantità di radiocarbonio presente al suo interno è pari a quella di ^{14}C presente nell'atmosfera.

Quando un individuo muore, se non ci sono inquinamenti, non scambia più carbonio con l'ambiente, per cui il ^{14}C presente al suo interno comincia a diminuire (con un ritmo noto) a causa del decadimento radioattivo. Misurando la quantità di radiocarbonio residua all'interno del reperto e stimando la quantità di ^{14}C atmosferico, che è la stessa presente nell'individuo al momento della sua morte, è possibile calcolare l'intervallo di tempo trascorso dalla morte dell'individuo a oggi.

6. Calcolo della data convenzionale [6]

Per il calcolo della data convenzionale di un reperto si fanno i seguenti assunti (veri solo in parte), che risalgono direttamente a Libby:

- La frazione di ^{14}C nell'atmosfera è costante ed è rimasta inalterata durante i passati millenni.
- La frazione di ^{14}C negli esseri viventi è la stessa di quella atmosferica a causa dello scambio di carbonio tra individui e ambiente circostante.
- Quando un individuo muore non scambia più carbonio con l'esterno e il suo ^{14}C comincia a diminuire per decadimento radioattivo secondo un ritmo noto.
- Il tempo di dimezzamento del ^{14}C è $T_{1/2} = 5568$ anni, a cui corrisponde una vita media $\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = 8033$ anni.

Pertanto, misurando la quantità di ^{14}C residua nel reperto $N(t)$ o la sua attività residua $a(t)$ e misurando la quantità di ^{14}C presente oggi in un individuo o la sua attività attuale (il termine attuale, in realtà, si riferisce al 1950!), supponendo che essa sia uguale a quella del reperto al momento della sua morte (N_0 o a_0), dalla legge esponenziale del decadimento radioattivo si può ricavare il tempo trascorso dal momento della morte dell'individuo ad oggi:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow \frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t} \rightarrow t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N(t)}{N_0} = -\tau \ln \frac{N(t)}{N_0} \sim 8033 \ln \frac{N_0}{N(t)} \quad (1)$$

$$a(t) = a_0 e^{-\lambda t} \rightarrow \frac{a(t)}{a_0} = e^{-\lambda t} \rightarrow t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{a(t)}{a_0} = -\tau \ln \frac{a(t)}{a_0} \sim 8033 \ln \frac{a_0}{a(t)} \quad (2)$$

Chiaramente entrambe le misure sono accompagnate da un errore, in questo caso dato dalla statistica di Poisson [7]:

$$\sigma_t = \tau \frac{\sigma_{N(^{14}\text{C}, t)}}{N(^{14}\text{C}, t)}$$

con $\sigma_{N(^{14}\text{C},t)} = \sqrt{N(^{14}\text{C},t)}$ se si misura direttamente la quantità di ^{14}C residua, o $\sigma_{N(^{14}\text{C},t)} = \frac{\tau}{\Delta t} \sqrt{\Delta N(^{14}\text{C},t)}$ nel caso in cui si effettua una misurazione dell'attività del campione (ΔN è il numero di disintegrazioni contate nell'intervallo di tempo Δt di durata della misura).

La data così ottenuta si discosta da quella reale poiché gli assunti non sono del tutto esatti; per questo motivo questa data viene detta "data convenzionale" e deve essere calibrata (vedremo nei prossimi paragrafi come). In realtà un errore viene corretto istantaneamente in laboratorio ed è quello dovuto al frazionamento isotopico, che tratteremo nel prossimo paragrafo.

7. Correzione col carbonio-13

Sappiamo che gli isotopi di un elemento sono chimicamente indistinguibili tra loro, nel senso che reagiscono allo stesso modo, dando luogo agli stessi prodotti; tuttavia, a causa della diversa massa dei loro nuclei, presentano lievi differenze nella velocità di reazione.

Poiché durante le trasformazioni biochimiche (fotosintesi, metabolismo) che hanno luogo negli esseri viventi reagisce solo una certa percentuale di atomi, fino al raggiungimento dell'equilibrio chimico, accade che nei prodotti della reazione tende a crescere la concentrazione degli isotopi più veloci a reagire a discapito di quelli più lenti.

Questo fenomeno, noto come "frazionamento isotopico", porta quindi ad una variazione della frazione di ^{14}C negli esseri viventi rispetto all'atmosfera. Se non si tiene conto di ciò, la datazione risulta lievemente falsata, poiché nel reperto da analizzare la frazione dei radiocarbonio non è determinata solo dal tempo trascorso dopo la morte dell'individuo (decadimento radioattivo), ma anche dall'entità del frazionamento isotopico.

Fortunatamente è possibile correggere questo errore misurando la frazione di ^{13}C nel campione da datare: essendo tale isotopo stabile, una sua variazione rispetto al valore atteso è dovuta soltanto al frazionamento isotopico, che può essere così quantificato.

Si utilizza a tale scopo la grandezza δ_{C13} , definita come:

$$\delta_{C13} = \left(\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{campione}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \cdot 1000$$

Il δ_{C13} è chiaramente misurato in per mille (‰) [8].

Tenendo presente il background e l'effetto dovuto al decadimento radioattivo e altri piccoli effetti, si può misurare il δ_{C14} , ma la formula risulta, chiaramente molto complessa; il calcolo del δ_{C14} , fortunatamente è più facile, in quanto esso è circa il doppio del δ_{C13} .

L'errore indotto dal frazionamento isotopico è spesso abbastanza piccolo (minore al 5‰), anche se è giusto correggerlo.

La datazione così corretta costituisce quella che viene detta "datazione convenzionale" e deve essere ancora calibrata tenendo conto di altri piccoli errori.

8. Effetti di contaminazione

Ogni essere vivente è in equilibrio con la sua "riserva" ambientale, che normalmente è costituita dall'atmosfera, dove il ^{14}C è distribuito in maniera omogenea a causa dei continui rimescolamenti meteorologici. Tuttavia esistono anche reperti che provengono da esseri vissuti in ambienti acquatici (mari, fiumi o laghi) dove la "riserva" di carbonio ha una composizione isotopica diversa da quella atmosferica. In particolare l'ambiente acquatico può essere la causa di "invecchiamento" o di "ringiovanimento" dei campioni in quanto l'acqua può sciogliere i materiali organici e quindi il carbonio presente all'interno del campione diminuisce non solo per effetto del decadimento, ma anche per effetto della "diluizione" da parte dell'acqua oppure può essere ricca di ^{14}C e quindi un organismo vissuto in tale ambiente ha una concentrazione di radiocarbonio superiore alla norma (effetto serbatoio). Gli errori dovuti a tale contaminazione possono arrivare fino a 500 anni in più o in meno rispetto alla data reale. Per correggere questo errore è stata introdotta la grandezza $\delta_{\pm R}$, dove il doppio segno sta ad indicare rispettivamente un "invecchiamento apparente" o un "ringiovanimento apparente" del campione. L'algoritmo per il calcolo del $\delta_{\pm R}$ è molto complesso in quanto richiede la conoscenza di molti fattori, fortunatamente sono stati creati dei database con le informazioni necessarie a stimarlo, tali archivi sono disponibili anche online (uno di questi lo si trova al sito: <http://calib.qub.ac.uk/marine/>).

Altre contaminazioni possono avvenire durante il campionamento, per evitare questo, ogni reperto deve essere sigillato in appositi contenitori e si deve evitare di metterlo a contatto con acqua o altre sostanze organiche che possono modificare il contenuto di carbonio del campione. Inoltre può essere disastrosa l'attività della fotosintesi, per questo motivo i reperti devono essere inscatolati al buio.

Infine non è da sottovalutare un'eventuale errore nella stima dell'età del campione da parte del laboratorio, per esempio nel corso di uno studio comparativo lo stesso campione è stato sottoposto a datazione da 30 laboratori diversi. La maggior parte di essi ha fornito la datazione con un margine di errore apprezzabile, alcuni però non sono riusciti a fare altrettanto, un laboratorio ha addirittura fornito datazioni affette da errori sistematici dell'ordine di 200 anni. Per questo motivo i laboratori devono dare una garanzia all'archeologo del fatto che il loro lavoro sia affetto il meno possibile da errori. Alcuni laboratori sono consapevoli dei propri errori sistematici (magari dovuti all'errata taratura degli strumenti usati) e quindi forniscono all'archeologo tutti i dati necessari per ricalibrare la data.

9. Altre correzioni

Una volta calcolata la data convenzionale (come visto nel paragrafo 6) essa deve essere calibrata, ovvero devono essere corretti tutti gli errori sistematici dovuti agli errati assunti di Libby. Infatti sappiamo che:

- Il ritmo con cui il ^{14}C decade ($t_{1/2} = 5730 \text{ anni}$) è leggermente diverso da quello stimato da Libby ($t_{1/2} = 5568 \text{ anni}$) ed usato per la datazione radiocarbonica convenzionale.
- La frazione di ^{14}C nelle "riserve" acquatiche si discosta da quella terrestre ("effetto serbatoio").
- La frazione di ^{14}C nell'atmosfera ha subito vistose fluttuazioni durante i passati millenni. Le cause principali sono: la variazione del flusso di raggi cosmici dovuta alla variazione del campo magnetico terrestre (fenomeno con periodicità 8000 anni); variazioni dovute all'attività solare (figura 9) che può essere più intensa o meno intensa. Vi sono poi altre due cause di variazione della concentrazione di ^{14}C dovute all'uomo: l'immissione di notevoli quantità di carbonio nell'atmosfera dovuto alle industrie e l'immissione di neutroni a causa delle esplosioni nucleari i reagiscono con il

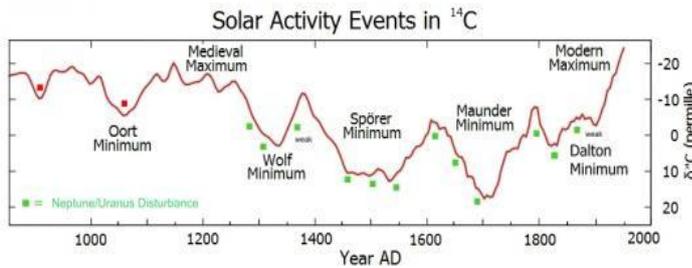
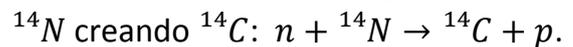


Figura 9: Grafico dell'attività solare dall'anno 1000 ad oggi: si può osservare un'attività molto irregolare.



Per correggere questi effetti sono state introdotte delle curve di calibrazione, ottenute datando reperti di epoca nota e/o utilizzando legno ricavato da tronchi datati mediante la dendrocronologia (vedi paragrafo 15).

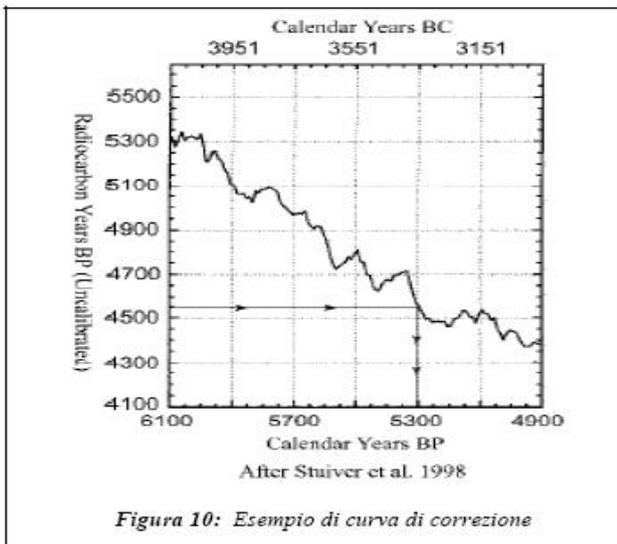


Figura 10: Esempio di curva di correzione

Mediante la calibrazione, partendo dalla data radiocarbonica convenzionale (misurata in anni BP: before present), si ottiene la data reale di calendario, espressa come intervallo di anni BC (Before Christ: avanti Cristo) o AD (Anno Domini: dopo Cristo).

La data calibrata è da considerarsi la miglior stima della data "vera" ed è quella che si deve prendere in considerazione per trarre conclusioni storiche.

Le curve di calibrazione purtroppo non hanno un andamento continuo, ma procedono a denti di sega (come si vede dalla figura 10) per cui ad una data radiocarbonica convenzionale possono corrispondere più datazioni di calendario: in alcuni casi sono le considerazioni storiche a far propendere per una data piuttosto che per un'altra, altrimenti occorre allargare l'intervallo per comprendere tutti i possibili periodi.

10. Esempio 1: l'uomo di Similaun

Come esempio, possiamo cercare di datare l'uomo di Similaun (figura 11).



Figura 11: Mummia del Similaun

La Mummia del Similaun, anche nota come Uomo del Similaun (nonché Uomo venuto dal ghiaccio e, informalmente, Ötzi) è un reperto antropologico ritrovato il 19 settembre 1991 sulle Alpi Venoste, ai piedi del monte omonimo (ghiacciaio del Similaun, 3.213m s.l.m.) al confine fra

l'Italia (Alto Adige) e l'Austria.

La data radiocarbonica convenzionale calcolata è: $(4550 \pm 19)BP$ [1][6].

Nella figura 12 è riportata tale data sull'asse delle ordinate e mediante la curva di calibrazione si può risalire alla data di calendario, riportata sull'asse orizzontale. Si può notare la presenza di tre intervalli di date di calendario dovuti all'andamento seghettato della curva di calibrazione. Non potendo fare considerazioni storiche atte ad escludere qualche intervallo, dobbiamo considerare in range di anni che comprende tutti e tre gli intervalli plausibili. Pertanto possiamo dire che Otzi è vissuto, con il 95% di probabilità tra il 3370 e il 3100 a.C., ovvero all'inizio dell'età del bronzo [1][6].

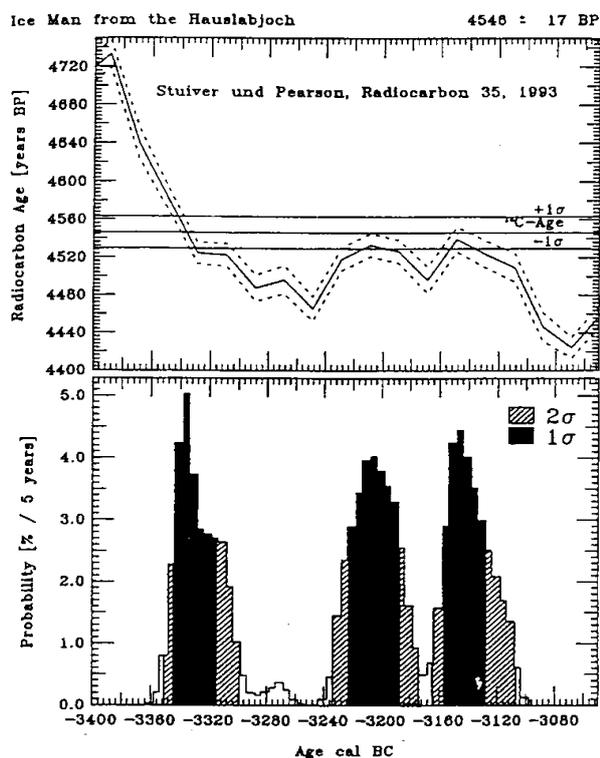


Figura 12: Curva di calibrazione della datazione di Otzi: si possono notare tre intervalli temporali distinti corrispondenti alla stessa data convenzionale

11. La misurazione del carbonio-14

Ricordando le formule (1) e (2) del paragrafo 6, la “datazione radiocarbonica convenzionale” si ottiene confrontando l’attività specifica o il rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ del campione da datare con i corrispondenti valori di uno “standard moderno” (supposti uguali a quelli dell’istante della morte dell’individuo). Esistono diversi tipi di standard moderni per il ^{14}C :

- Standard assoluto: costituito a un campione di legno del 1890, la cui attività specifica o la frazione di ^{14}C vengono riportate alla data convenzionale del 1950. È stato scelto il legname del 1890 perché anteriore al XX secolo, durante il quale sono avvenuti, per mano dell’uomo, due fenomeni che hanno modificato fortemente la frazione di ^{14}C nell’atmosfera, e cioè la rivoluzione industriale e le esplosioni nucleari, il cui effetto si è già discusso nel paragrafo 9. Lo standard assoluto è usato solo per tarare gli standard primari.

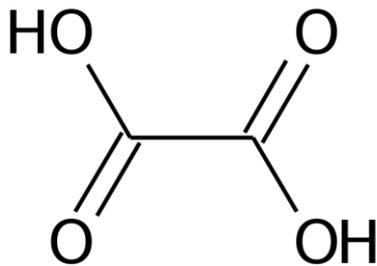


Figura 13: Struttura dell’acido ossalico

- Standard primari: vengono preparati da appositi centri e vengono tarati per mezzo dello standard assoluto. Essi sono:

- Acido ossalico I, estratto da barbabietole del 1955 (ormai esaurito)
- Acido ossalico II, estratto da barbabietole del 1977 (ancora in uso)

Con questi standard primari si possono tarare eventuali standard secondari meno costosi.

- Standard secondari: saccarosio ANU (Australian National University) ed altri.

Abbiamo visto che per una datazione occorre confrontare l’attività specifica o il rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ del campione da datare con i corrispondenti valori di uno “standard moderno”. Ci sono dunque due possibilità:

- Si può misurare l’attività residua del campione
- Si può misurare la frazione residua di ^{14}C

Nei prossimi paragrafi vedremo in dettaglio entrambe le tecniche.

12. Misure di attività del campione

Per misurare l’attività del campione, siccome il ^{14}C decade β^- , occorre rivelare le particelle β emesse (ovvero gli e^- emessi), la cui energia massima vale $E_{max} = 160 \text{ keV}$. Dato che le energie non sono quindi molto elevate, i rivelatori impiegati sono

essenzialmente di due tipi: contatori proporzionali e scintillatori liquidi. In entrambi i casi il rivelatore è schermato con piombo e rame contro la radioattività ambientale e quindi l'unica sorgente di fondo è costituita dai raggi cosmici penetranti. Chiaramente il rumore di fondo dovrà essere sottratto e per questo motivo lo si deve misurare nelle stesse condizioni del campione; per questo esistono dei campioni contenenti esclusivamente carbonio fossile, cioè privo di ^{14}C , che vengono usati allo scopo.

Vediamo ora brevemente il principio di funzionamento dei due diversi tipi di rivelatore utilizzati:

- Contatore proporzionale a gas: è costituito da un tubo metallico chiuso alle estremità con due tappi isolanti al centro del quale è teso un elettrodo metallico (anodo) che viene tenuto ad un potenziale positivo rispetto al tubo stesso (figura 14).

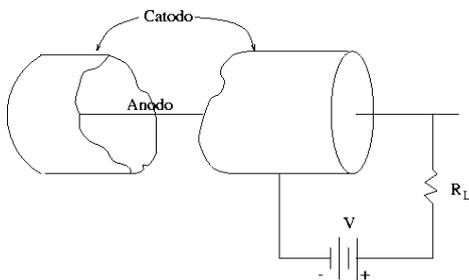


Figura 14: Contatore proporzionale a gas cilindrico

Fatto il vuoto nel tubo, viene immesso il gas da misurare ottenuto dal campione in esame. Quando una particella beta (elettrone) viene emessa per il decadimento di un atomo di ^{14}C , si muove verso l'anodo, ionizzando altre molecole. Questa carica verrà raccolta grazie alla differenza di potenziale tra l'anodo e la parete del rivelatore e si crea, così un impulso elettrico.

Variando la d.d.p. la carica raccolta seguirà l'andamento in figura 15:

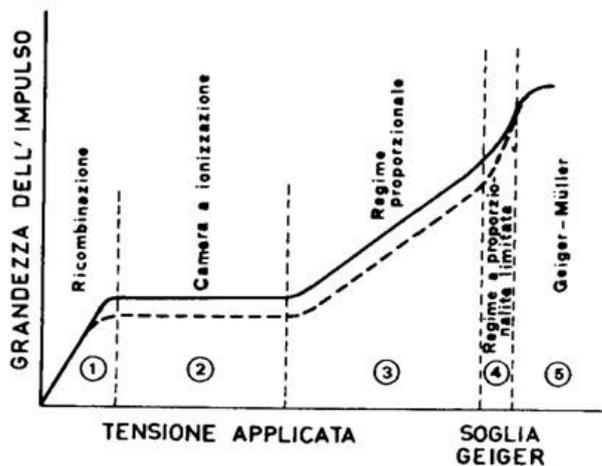


Figura 15: Grafico della corrente raccolta sulle armature del rivelatore in funzione della d.d.p.

Nel primo tratto la corrente risulta cresce con tensione applicata, in quanto, per bassi valori della tensione avviene il fenomeno della ricombinazione e quindi della neutralizzazione parziale degli ioni prodotti.

Successivamente, per un certo intervallo di tensione, la corrente ne diviene indipendente; questa è la tipica regione in cui lavora una camera a ionizzazione e si dice che la corrente è saturata.

Se la tensione viene portata oltre l'intervallo di saturazione, gli ioni primari cominciano a produrne di secondari per urti col gas; di conseguenza la ionizzazione primaria risulta moltiplicata per un fattore dipendente dalla geometria dell'apparato e dalla tensione applicata; in tal caso il rivelatore funziona come contatore proporzionale.

Chiamiamo n il numero di elettroni prodotti nella ionizzazione primaria della radiazione incidente; ciascuno di essi ha probabilità P di generare m elettroni secondari (m è il fattore di moltiplicazione, che dipende dalla geometria dell'apparato e dalla tensione applicata). Il numero medio di elettroni secondari generati, sarà allora: $k=mP$.

Il numero N di elettroni generati in seguito all'intero processo di moltiplicazione in cascata, sarà:

$N = n + nPm + (nPm)Pm + n(Pm)2Pm + \dots$, che si può riscrivere come:

$$N = n(1 + k + k^2 + k^3 + \dots) = n \sum_{i=0}^{\infty} k^i = \frac{n}{1-k} \text{ se } k = mP < 1$$

Come si vede, il fattore di moltiplicazione $M = \frac{N}{n} = \frac{1}{1-k}$ è tanto più grande quanto più k è prossimo all'unità. Il fattore di moltiplicazione può raggiungere anche un valore di 10^4 usando apposite miscele di gas nobile (90%) e altri gas (10%) (per esempio argon-metano) [9].

- Scintillatori liquidi: il campione viene miscelato con lo scintillatore liquido: una

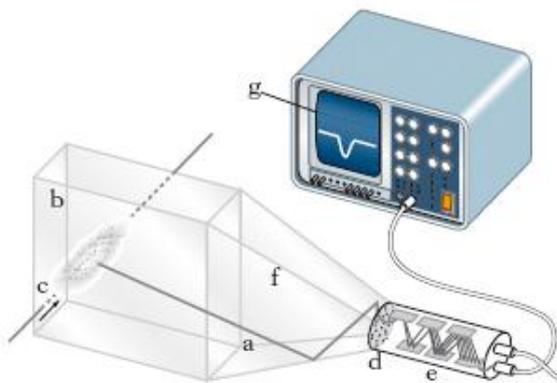


Figura 16: esempio di un contatore a scintillazione

soluzione contenente una sostanza organica fluorescente che se viene "colpita" da una radiazione beta (elettrone) ne assorbe l'energia per poi immediatamente rilasciarla sotto forma di impulso luminoso (scintilla). Il campione mescolato allo scintillatore viene posto in un recipiente trasparente ed inserito nell'apparato di conteggio, dove un fotomoltiplicatore capta la scintilla e la trasforma in un segnale elettrico che viene

amplificato ed inviato ad un contatore elettronico (figura 16). L'energia della scintilla è proporzionale a quella della radiazione beta, per cui è possibile selezionare, riducendo la "finestra" di conteggio solo le radiazioni che hanno energie compatibili con quelle comprese nello spettro di ^{14}C , eliminando il più possibile le interferenze dovute ad altri isotopi.

Gli scintillatori usati per la rivelazione della radiazione β del carbonio-14 sono scintillatori organici; principalmente idrocarburi della serie aromatica (principalmente antracene: $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ e stilbene: $\text{C}_{14}\text{H}_{12}$). La luce di scintillazione nasce da transizioni energetiche degli elettroni: la radiazione incidente porta gli elettroni dallo stato fondamentale (S_0) a quello eccitato (S^*); immediatamente l'elettrone decade dallo

stato eccitato S^* a stati eccitati vibrazionali di S_0 , questo implica che la radiazione luminosa è leggermente diversa dal gap energetico S_0-S^* e spiega quindi la trasparenza dello scintillatore alla sua stessa radiazione.

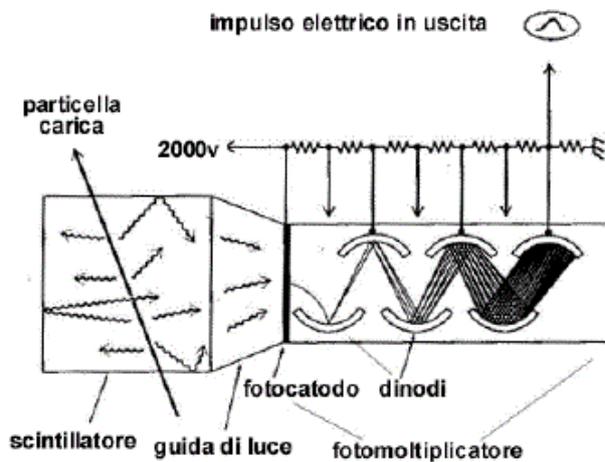


Figura 17: Schema di un rivelatore a scintillazione

La scintilla viene raccolta dal fotocatodo: è uno strato di materiale fotosensibile che converte, per effetto fotoelettrico, i fotoni incidenti in elettroni. Poiché il loro numero, però, è molto basso, la carica globale è troppo piccola per essere misurata direttamente. Per questo motivo è necessario amplificare il segnale: gli elettroni vengono guidati su una struttura di elettrodi, i dinodi, dove ciascun elettrone incidente dà origine a più elettroni uscenti. Il segnale viene

alla fine raccolto dall'anodo. Se il fattore di emissione secondaria vale d ($2 \div 3$) ed il numero di dinodi è N (ordine delle decine), il fattore di moltiplicazione complessivo vale d^N , in questo modo si riescono ad ottenere fattori di moltiplicazione fino a 10^8 .

Gli scintillatori liquidi sono preferiti ai contatori proporzionali perché presentano un volume minore e quindi un fondo, dovuto essenzialmente ai raggi cosmici, più basso e inoltre sono più economici.

13. Misure di spettrometria di massa

Per effettuare misure di spettrometria di massa non è sufficiente un semplice spettrometro poiché esso filtrerebbe molecole di massa uguale a quella del ^{14}C , quali, per esempio, $^{12}\text{CH}_2$ o ^{13}CH . È necessario, dunque, uno spettrometro di massa con acceleratore.

Esso fornisce il rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ mediante un procedimento molto sofisticato ed anche molto costoso, ha il vantaggio, però, di essere sensibilmente preciso ed efficace anche se si ha a disposizione meno di 1mg di carbonio.

Il principio di funzionamento di uno spettrometro di massa con acceleratore è rappresentato nella figura 18.

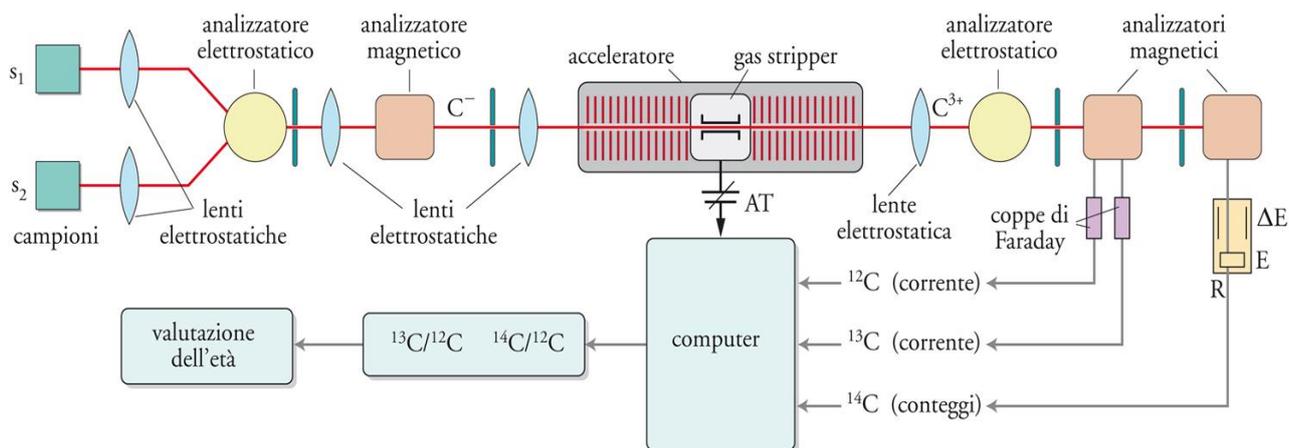


Figura 18: Schema di funzionamento di uno spettrometro con acceleratore

Il campione da datare viene bombardato da un flusso di ioni positivi (spesso ioni cesio); in seguito al bombardamento si formano sia ioni positivi che ioni negativi, sia di carbonio, sia di inevitabili impurezze. Il generatore di ioni si trova a un potenziale negativo rispetto al resto del sistema, per cui gli ioni positivi rimangono confinati nel campo elettrico del generatore ed escono, quindi, solo ioni negativi. Il fascio di ioni viene focalizzato, tramite delle lenti, verso uno spettrometro, costituito da un campo elettrico e un campo magnetico perpendicolari tra loro che seleziona in base al rapporto q/m ed è quindi in grado di separare il carbonio dal fondo. Questo spettrometro, inoltre, selezionando anche il ^{12}C e il ^{13}C , fornisce i dati per il calcolo del rapporto $\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}$ e quindi del δ_{C13} necessario alla correzione del frazionamento isotopico. Il fascio di particelle di massa 14 u.m.a., uscito dallo spettrometro viene iniettato nell'acceleratore (acceleratore di Van De Graaff): qui vanno ad impattare con grandissima energia con uno stripper (formato da gas a bassa pressione) che scinde i gruppi molecolari ($^{12}\text{CH}_2^- \rightarrow ^{12}\text{C}^{3-} + 2\text{H}^+$; $^{13}\text{CH}^- \rightarrow ^{13}\text{C}^{2-} + \text{H}^+$). Successivamente gli ioni che escono dall'acceleratore ($^{12}\text{C}^{3-}$, $^{13}\text{C}^{2-}$, $^{14}\text{C}^-$) raggiungono un secondo spettrometro che separa i diversi isotopi di carbonio; infine, un contatore registra la quantità di ^{14}C e si è in grado, quindi, di conoscere il rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$. Questo dispositivo è in grado di misurare rapporti $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ dell'ordine di 10^{-16} [6][9].

14. Affidabilità delle datazioni radiocarboniche

La domanda che sorge spontanea a questo punto è quanto sia efficace il metodo del ^{14}C . Innanzitutto occorre che il campione sia catalogato, imballato e trasportato nei laboratori di analisi in modo consono, come si è visto nel paragrafo 8.

Una volta giunto al laboratorio, il campione è pronto per essere analizzato secondo uno dei due metodi visti sopra; nella seguente tabella sono riassunte le caratteristiche di entrambi:

caratteristica	Misura dell'attività	Spettrometria di massa con acceleratore
Sensibilità	Medio-bassa (10^{12})	Altissima (10^{16})
Precisione con poca sostanza	Scarsa	Buona
Precisione con molta sostanza	Ottima	Buona
Costo analisi	Minore	Maggiore
Costo apparecchiatura	Madio-basso (migliaia di euro)	Altissimo (milioni di euro)
Manutenzione	Minima	Molto impegnativa
Ingombro apparecchiature	Piccolo (spazio di una lavatrice)	Grande
Tempi di conteggio	Lunghissimi (più tempo impiego e più precisa è la misura)	Brevi (circa 10 minuti)

Chiaramente non tutti i laboratori hanno a disposizione uno spettrometro con acceleratore per questo gli archeologi devono decidere bene con quale metodo deve essere datato il reperto e inviarlo quindi al laboratorio specifico.

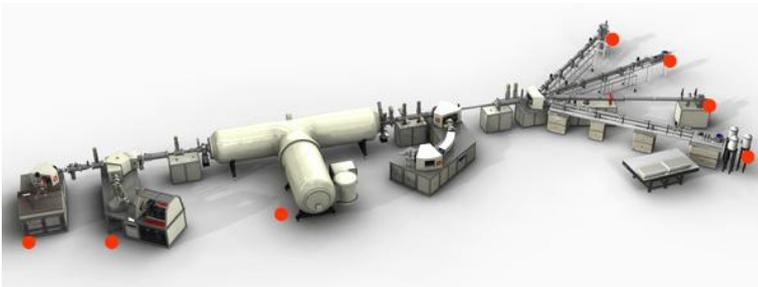


Figura 19: schema dello spettrometro con acceleratore del CEDAD

In Italia abbiamo il centro di datazione e diagnostica (CEDAD) per la ricerca e il servizio di datazione con radiocarbonio mediante spettrometria di massa con acceleratore inaugurato nel 2000 all'Università del Salento, a Lecce (figura 19)[6].

Da poco sono sorti altri tre centri che effettuano misure di spettrometria con acceleratore:

- CIRCE (Centro Ricerche Isotopiche per i Beni Culturali), San Nicola la Strada (Caserta).
- LABEC (Laboratorio di Tecniche Nucleari per i Beni Culturali), Firenze.
- Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università degli Studi di Milano, Bicocca [6].

15. Dendrocronologia

Dedichiamo questo capitolo alla dendrocronologia, poiché essa permette, nei casi in cui è possibile applicarla, di:

- Avere informazioni sul clima di una certa zona durante il passato
- Datare con estrema accuratezza tronchi e travi di legno
- Calibrare le datazioni radiocarboniche

La dendrocronologia si basa sullo studio degli "anelli" di accrescimento degli alberi: nelle zone dove c'è forte variazione stagionale, durante le stagioni calde gli alberi creano, sotto la corteccia, un anello spesso intorno a quello (più sottile e scuro) dovuto al blocco della crescita durante l'inverno.



Figura 20: Tronco di un albero tagliato: sono ben visibili gli anelli di accrescimento

Quando si taglia un albero si vedono più o meno chiaramente gli anelli di crescita (figura 20), che ci permettono di valutare il clima durante le varie stagioni (per ogni specie, l'anello di crescita è tanto più spesso quanto più calda e umida è stata l'estate), nonché di stabilire l'età dell'albero al momento del taglio, semplicemente contando gli

anelli. Indicazioni sugli anelli si possono avere anche da un albero non tagliato o da una trave con le estremità non visibili, semplicemente estraendo una "carota" mediante un trapano a punta cava.

Poiché gli spessori e le caratteristiche degli anelli, per una certa specie arborea, non sono uguali, ma variano di anno in anno, sovrapponendo le sequenze comuni a due alberi di età diversa ma che hanno convissuto per qualche tempo, è possibile estendere la sequenza all'indietro (figura 21).

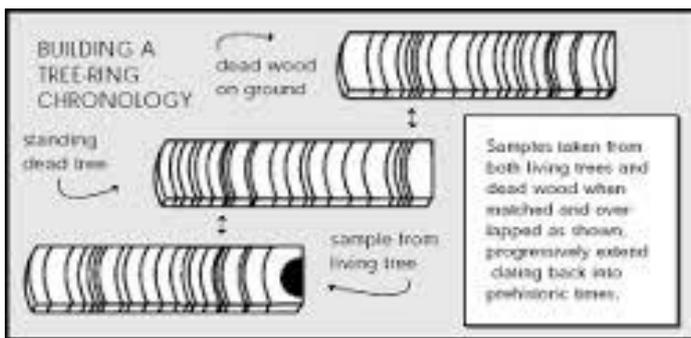


Figura 21: come ricostruire una sequenza dendrocronologica

In questo modo è stato possibile costruire la sequenza dendrocronologica del pino e della quercia tedesche per gli ultimi 11000 anni, quella della quercia irlandese per gli ultimi 7000 anni e quella del pino della California per gli ultimi 9000 anni.

Sovrapponendo poi gli anelli di crescita di una "carota" estratta dal manufatto

da datare con un tratto della serie dendrocronologica adatta per quella specie e per quella località, si può stabilire l'epoca in cui visse l'albero da cui il manufatto è stato ricavato. La datazione così effettuata è estremamente accurata: si può stabilire l'anno esatto e addirittura la stagione (estiva o invernale) in cui è stato tagliato l'albero da cui deriva il manufatto da datare.

La possibilità di avere a disposizione del legno databile con estrema precisione ha inoltre permesso di costruire curve di calibrazione per le datazioni effettuate col radiocarbonio; tali curve riportano la corretta data di calendario in funzione della "data radiocarbonica convenzionale" (figura 10).

16. Esempio 2: la Sacra Sindone [10]

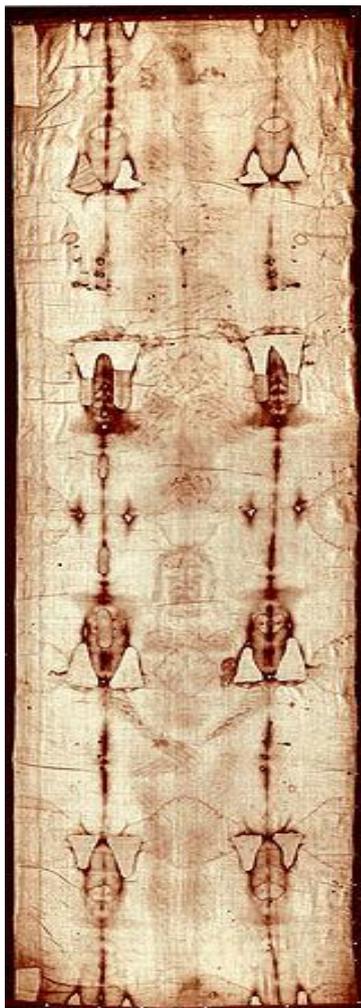


Figura 22: Sindone

Voglio fare ora un ultimo esempio, forse il più citato in antologia e nella critica: si tratta della datazione col radiocarbonio della Sacra Sindone, il lenzuolo che avrebbe avvolto il corpo senza vita di Gesù di Nazareth e che oggi è custodito nel duomo di Torino (figura 22).

La datazione è stata effettuata nel 1988, inizialmente l'esame doveva essere eseguito da sette diversi laboratori con i due metodi visti nei paragrafi precedenti (paragrafi 12 e 13), alla fine sono stati selezionati solo tre laboratori (Oxford, Tucson e Zurigo) che effettuarono l'esame per mezzo di spettroscopia con acceleratore, metodo meno efficace del contatore proporzionale per quanto riguarda la datazione dei tessuti.

Anche le istituzioni atte a supervisionare i lavori, inizialmente tre, furono ridotte ad una: il British Museum, rappresentato da Michael Tite, noto medievalista.

Infine, si era inizialmente deciso di prelevare i campioni da datare in diverse zone del lenzuolo, ma alla fine furono prelevati tutti e tre dall'angolo in basso a destra (che è la parte più malridotta del lenzuolo). Ogni laboratorio ha ricevuto un pezzo di tessuto di circa 50 mg, che hanno datato. I risultati primari della analisi sono rimasti strettamente segreti nonostante le ripetute richieste.

La data radiocarbonica convenzionale mediata dalle tre misure

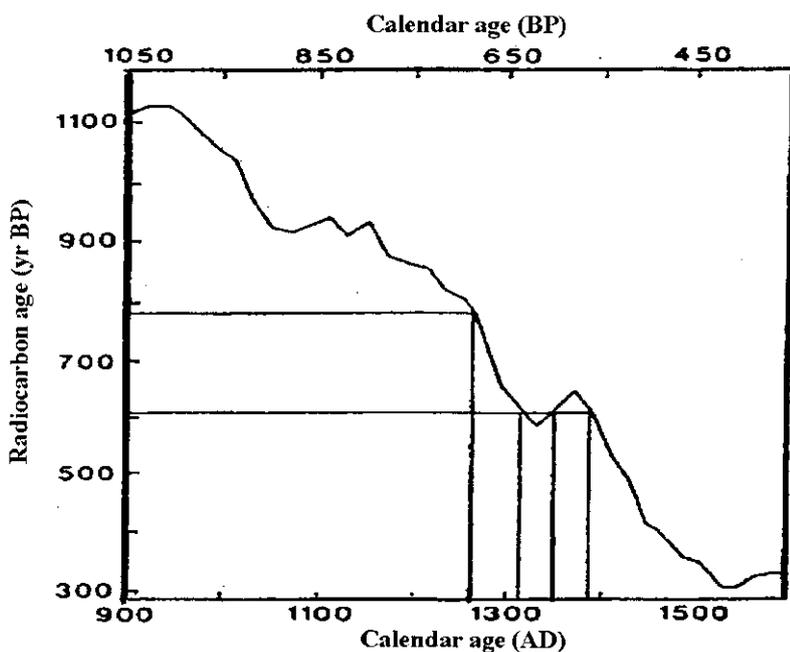


Figura 23: Curva di calibrazione della Sindone

risulta essere: $(691 \pm 31)BP$, che corrisponde a due intervalli di date di calendario: $(1262 \div 1312) d.C.$ e $(1353 \div 1384) d.C.$ (fig. 23). Quindi si può affermare che la Sindone risulterebbe (con probabilità del 95%) un lenzuolo medievale datato tra il 1260 e il 1390 d.C.

Questa datazione ha suscitato subito molte polemiche a partire dall'accusa di frode intenzionale da parte di chi ha

effettuato le misure. C'è da dire che questo lenzuolo ha subito numerosi traumi: un incendio, l'esposizione con altri oggetti contenenti carbonio, tutte le foto scattate, tutte le altre misure e gli studi effettuati su di esso; quindi il suo contenuto di ^{14}C potrebbe essere variato non solo a causa della radioattività.

Infine, tutti gli scienziati e gli archeologi sono d'accordo nell'affermare che se si effettuano 10 diverse datazioni con metodi differenti su un oggetto e nove di esse sono simili e quella effettuata col ^{14}C è in disaccordo con le altre, essa è senza alcun dubbio da scartare. Una commissione formata da specialisti si è occupata nel decennio precedente alla datazione col radiocarbonio di datare la Sindone con altri metodi, per esempio mediante le tracce ematiche o di qualche altro tipo di fluido corporeo, o anche attraverso altri metodi, ottenendo datazioni diverse da quella appena vista; infine è attestata storicamente la presenza della Sindone anche prima del XII secolo. Tutto questo fa pensare che dato il cattivo stato del lenzuolo, forse la datazione radiocarbonica in questo caso non è il metodo più efficace.

17. Critiche del metodo

L'ultima cosa detta nel paragrafo precedente non deve sorprendere, perché il termine datazione assoluta non significa "priva di errore"!

Le date fornite col metodo del ^{14}C devono comunque essere valutate in base a considerazioni di altro tipo, prima di tutto storiche, poi bisogna confrontarle con datazioni effettuate con altri metodi.

Come si è visto nel paragrafo 14, infatti, ci sono numerose fonti di contaminazione che possono portare a una datazione errata; chiaramente ogni laboratorio fa il possibile per cercare di eliminare gli agenti contaminanti, ma non sempre essi si conoscono e quindi possono essere eliminati, oppure, pur conoscendoli, sono ineliminabili. La datazione col ^{14}C quindi, pur essendo un metodo affascinante, è molto pericoloso e il più delle volte inapplicabile.

Sono interessanti le parole del professor Michael Winter:

"Quando la datazione col ^{14}C conferma le nostre teorie, la mettiamo in risalto nella trattazione principale. Quando non le contraddice per intero, la inseriamo nelle note a piè di pagina. E quando essa risulta totalmente incompatibile con i valori attesi, la ignoriamo".

Capitolo III

Datazione assoluta: altri metodi fisici

1. Termoluminescenza

Con il termine termoluminescenza si indica un fenomeno fisico di emissione luminosa da parte dei cristalli di una sostanza. Tale fenomeno fu descritto per la prima volta in epoca moderna da Robert Boyle nella seconda metà del XVII secolo.

Con il metodo della termoluminescenza si possono datare oggetti di argilla; tali manufatti rappresentano i più abbondanti reperti di uno scavo archeologico e pertanto la loro datazione fornisce un rilevante contributo allo studio di un sito.

Il metodo si basa sul fatto che nella argilla che costituisce il reperto sono contenuti alcuni elementi radioattivi (in particolare gli elementi della famiglia dell'uranio e del torio e il potassio-40) e piccoli cristalli che costituiscono delle impurezze. Ora, gli elementi radioattivi emettono radiazioni che ionizzano gli atomi dei cristalli contenuti nell'argilla (cioè li privano di elettroni), gli elettroni eccitati possono ritornare al loro stato fondamentale (emettendo un fotone) oppure possono rimanere intrappolati in siti all'interno del reticolo cristallino del cristallo. Questi siti vengono chiamate trappole e l'elettrone intrappolato può uscire se acquista un'energia sufficiente. Per alcune trappole l'energia necessaria per fuoriuscire è piccola e quindi l'elettrone riesce a liberarsi solo grazie all'energia che acquista a

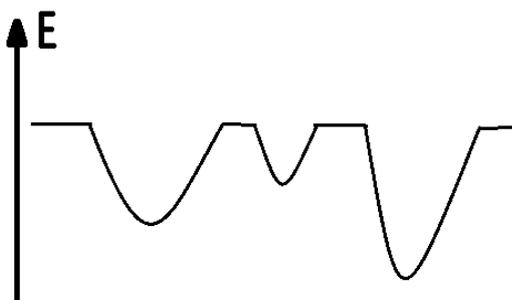


Figura 24: Grafico semplificato che rappresenta il livello energetico delle buche: come si vede, un elettrone per uscire dalle buche più profonde ha bisogno di più energia.

temperatura ambiente; fortunatamente per noi, ci sono alcune trappole talmente "profonde" (energeticamente parlando), dalle quali gli elettroni riuscirebbero a scappare solo acquistando un'energia elevata, che di certo non corrisponde a quella trasferita a temperatura ambiente (figura 24).

Quindi queste trappole profonde vengono riempite nei secoli: conoscendo con che velocità si riempiono e quanto sono piene attualmente, è possibile stimare l'età del campione.

Infatti supponiamo che in un pezzo di argilla, contenente più o meno elettroni intrappolati, a seconda della sua età, venga in un certo periodo storico, lavorato per creare un vaso. Al momento della cottura dell'argilla nel forno tutti gli elettroni

acquisiscono energie molto elevate (di solito la cottura dell'argilla avviene a temperature superiori di 500°C), in questo modo tutte le trappole riempite nei secoli o nei millenni passati vengono svuotate poiché tutti gli elettroni acquistano energia sufficiente a scappare (L'energia trasmessa agli elettroni è proporzionale alla quarta potenza della temperatura: $E \propto T^4$). Nella tabella sottostante sono elencate le profondità delle trappole energetiche e il valore della temperatura alla quali gli elettroni acquistano energia sufficiente a scappare della trappola:

Profondità della trappola (eV)	Temperatura di fuga (°C)
Quarzi:	
0.80	85
0.84	110
1.42	190
1.66	240
1.68	310
1.80	375
Feldspati potassici	
0.76	90
1.10	110
1.40	210
1.60	300

Quindi al momento della cottura dell'argilla, tutte le trappole si svuotano e inizia un nuovo accumulo "archeologico" tanto più rapido quanto maggiore è l'intensità del bombardamento da parte delle radiazioni, che dipende, oltre che dagli elementi radioattivi contenuti nel campione, anche dal contributo dell'ambiente circostante e dei raggi cosmici.

Ora, si può stimare la dose annua assorbita dal campione tenendo conto di queste tre sorgenti radioattive (elementi radioattivi del campione, radioattività dell'ambiente circostante e raggi cosmici).

La dose totale assorbita dall'ultima cottura ad oggi la si può misurare cuocendo nuovamente il reperto e in questo modo tutte le trappole si svuoteranno di nuovo e gli elettroni, scappando emettono fotoni, in una quantità direttamente proporzionale al loro numero; quindi misurando l'intensità della luce emessa si ricava la dose totale assorbita fino ad oggi.

A questo punto dividendo la dose totale per la dose annua, si ottiene il numero di anni trascorsi dall'ultima cottura del reperto ad oggi:

$$t = \frac{Dose_{archeologica}}{Dose_{annua}}$$

Per stimare il numeratore, i campioni da trattare vengono ridotti in polvere di diverso diametro (se di qualche μm si parla di campioni "fine grain", se di qualche centinaia di μm si parla di campioni "inclusion") e poi trattati con acidi a infine vengono riscaldati e si misura l'intensità totale di luce prodotta e in questo modo si risale alla dose assorbita, o meglio, la dose β -equivalente, cioè la dose β che produrrebbe la stessa quantità di termoluminescenza della dose archeologica risultante dai contributi delle radiazioni α , β , γ e dai raggi cosmici.

Per la stima del denominatore, come si è già detto, si devono conoscere le impurità radioattive del campione e le rispettive attività, l'attività del luogo da cui proviene il campione e l'attività dovuta ai raggi cosmici. Chiaramente queste grandezze sono soggette a forti mutamenti nel corso di lunghi periodi di tempo (specialmente l'attività dovuta ai raggi cosmici) e per questo le datazioni effettuate col metodo della termoluminescenza hanno un errore del 5÷10% [11].

2. Risonanza di spin elettronico

Questo metodo di datazione è relativamente recente, dal momento che le prime date affidabili sono stati ottenute agli inizi degli anni 80; esso si è affermato come alternativo a quello della termoluminescenza e si è rivolto prevalentemente a materiali quali lo smalto dei denti, i gusci dei molluschi, i coralli e, con minore grado di affidabilità, le ossa. Si tratta in generale di materiali non idonei ad essere datati con il metodo della termoluminescenza a causa della loro decomposizione durante il processo di riscaldamento.

Il principio del metodo della risonanza di spin elettronico è lo stesso del metodo della termoluminescenza, quindi la datazione anche in questo caso si riduce alla formula:

$$t = \frac{Dose_{archeologica}}{Dose_{annua}}$$

Ora, il denominatore dell'espressione si misura con le stesse tecniche e le stesse accortezze viste precedentemente. Quello che è differente, in questo caso, è la tecnica usata per misurare la paleodose (la dose archeologica).

Per misurare la dose archeologica si misurano gli elettroni intrappolati nelle trappole reticolari e per fare ciò si sfrutta la proprietà fisica degli elettroni di essere dotati di

un movimento di rotazione (spin) attorno al proprio asse per effetto del quale essi, essendo elettricamente carichi si comportano come aghi magnetici. La rivelazione dell'intensità della loro presenza avviene ponendo un campione del materiale da analizzare in un forte campo magnetico che costringe gli elettroni ad orientarsi con il loro momento magnetico ($\mu = g\mu_B m_s$, con $g \cong 2$: *fattore giromagnetico*; $\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e}$: *magnetone di Bohr*; $m_s = \pm \frac{1}{2}$: *spin*), in parte nel verso concorde e in parte in verso discorde ad esso (a seconda del valore positivo o negativo dello spin).

In questa situazione stazionaria si invia sul campione un piccolo campo magnetico oscillante il quale costringe gli elettroni ad oscillare con la sua stessa frequenza (fenomeno che va sotto il nome di risonanza). Questo avviene poiché gli elettroni assorbono l'energia trasportata dal campo magnetico; sapendo che l'energia assorbita è pari a $E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = g\mu_B m_s B$, ricordando, inoltre che $E = h\nu$, si trova il valore della frequenza di risonanza: $\nu = g\mu_B m_s B/h$. Ponendo un campo magnetico del valore necessario affinché ci sia la risonanza e misurando la corrispondente energia assorbita, si può ricavare la dose archeologica del campione.

Questo metodo non è distruttivo e per effettuarlo basta anche un campione dell'ordine del grammo; nonostante sia molto giovane, il metodo della risonanza di spin elettronico è utilizzato con notevole successo in campo paleontologico. In Italia esso è utilizzato per la datazione di ritrovamenti neandertaliani nel Lazio [11].

3. Datazione delle rocce

Prendiamo adesso in considerazione un metodo usato per datare le rocce, basato ancora sul fenomeno della radioattività. Questo metodo è usato in geologia e indirettamente anche in archeologia, infatti a volte si ritrovano nei siti archeologici resti di uomini e manufatti in pietra, quindi si possono datare tali manufatti e dare quindi una datazione al sito archeologico, oppure si possono ritrovare resti di uomini e/o manufatti intrappolati in stalagmiti o stalattiti, questo avviene se la stalattite e/o la stalagmite si è formata nell'epoca in cui la grotta era abitata; per cui la datazione della stalagmite e/o della stalattite è utile all'archeologo e/o al paleo antropologo oltre che al geologo stesso.

La datazione delle rocce si basa su elementi radioattivi contenuti in esse, però per poter datare una roccia con metodi basati su questo fenomeno bisogna che siano soddisfatti questi requisiti:

- Il valore della vita media del radionuclide non deve essere né troppo grande, né troppo piccolo rispetto al tempo da misurare.

- Il radionuclide non deve essere troppo raro.
- Bisogna conoscere la quantità di radionuclide figlio presente al tempo iniziale.

Ora, nella datazione delle rocce possono verificarsi essenzialmente due casi, che esamineremo in dettaglio.

1. Il nucleo A decade in B:

In questo caso, ricordando la legge del decadimento radioattivo, si ha:

$$n_a(t) = n_a(0)e^{-\lambda_a t}$$

$$n_b(t) = n_a(0)[1 - e^{-\lambda_a t}] + n_b(0) = n_a(t)[e^{\lambda_a t} - 1] + n_b(0)$$

Dall'ultima relazione si ha:

$$t = \frac{1}{\lambda_a} \ln \left(\frac{n_b(t)}{n_a(t)} + 1 \right)$$

Quindi misurando la quantità $\frac{n_b(t)}{n_a(t)}$ è possibile risalire al valore di t.

2. Il nucleo A decade in B, ma la roccia contiene altri isotopi dell'elemento B, di origine non radiogenica:

In questo caso, ricordando la legge del decadimento radioattivo, si ha:

$$n_a(t) = n_a(0)e^{-\lambda_a t}$$

$$n_{b1}(t) = n_a(0)[1 - e^{-\lambda_a t}] + n_{b1}(0) = n_a(t)[e^{\lambda_a t} - 1] + n_{b1}(0)$$

$$n_{b2}(t) = n_{b2}(0)$$

Il rapporto $\frac{n_{b1}}{n_{b2}}$ aumenta quindi col passare del tempo in quanto il numeratore aumenta per radiogenesi, mentre il denominatore rimane costante nel tempo:

$$\frac{n_{b1}(t)}{n_{b2}(t)} = \frac{n_a(t)}{n_{b2}(t)} (e^{\lambda_a t} - 1) + \frac{n_{b1}(0)}{n_{b2}(0)}$$

$$t = \frac{1}{\lambda_a} \ln \left(\frac{\frac{n_{b1}(t)}{n_{b2}(t)} - \frac{n_{b1}(0)}{n_{b2}(0)}}{\frac{n_a(t)}{n_{b2}(t)}} + 1 \right)$$

Ora, i rapporti $\frac{n_{b1}(t)}{n_{b2}(t)}$ e $\frac{n_a(t)}{n_{b2}(t)}$ si possono direttamente misurare, mentre il rapporto $\frac{n_{b1}(0)}{n_{b2}(0)}$ deve essere valutato in qualche altro modo.

Vediamo adesso due metodi per stimare tale rapporto.

Metodo Uranio-Piombo:

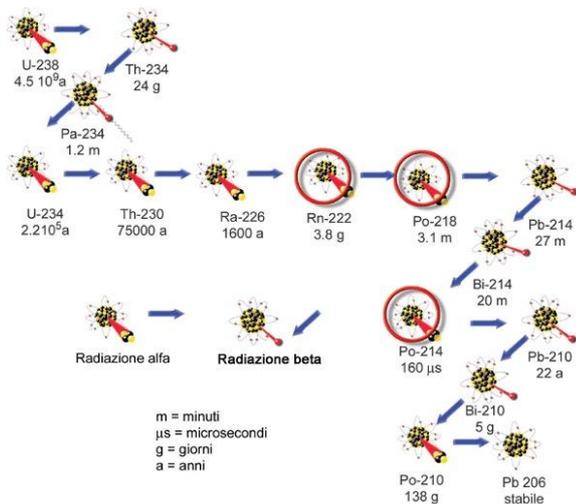


Figura 24: catena radioattiva dell'uranio-238

Se una roccia contiene uranio-238, il quale decade attraverso una lunga catena (figura 25) in piombo-206 e contiene anche piombo-204, di origine non radiogenica, il rapporto da stimare è $\frac{n(0)_{Pb^{206}}}{n(0)_{Pb^{204}}}$.

Allora supponiamo che ci sia una roccia coeva che non contiene uranio-238, allora in questa roccia il rapporto è $\frac{n_{Pb^{206}}}{n_{Pb^{204}}}$ è rimasto

costante nel tempo e dunque misurando l'attuale valore si ottiene anche quello al tempo iniziale.

Metodo Potassio-Argon:

Il potassio-40 decade in argon-40. Se una roccia, oltre a contenere argon-40, contiene anche l'isotopo ^{36}Ar , di origine non radiogenica, allora il rapporto $\frac{n(0)_{Ar^{40}}}{n(0)_{Ar^{36}}}$

è uguale al rapporto $\frac{n(atm)_{Ar^{40}}}{n(t)_{Ar^{36}}}$, dove il numeratore indica la quantità di ^{40}Ar

presente attualmente nell'atmosfera (che si può misurare) e si suppone che al

momento della formazione della roccia la quantità di ^{40}Ar presente in essa derivi solo dal contributo atmosferico, costante nel tempo [5].

4. Altri metodi

Vediamo ora, brevemente, altri tre metodi di datazione. Questi non si basano su processi che nel tempo rimangono regolari (come è, invece, la radioattività), ma su processi variabili a seconda della temperatura o delle condizioni ambientali. Questi processi, però, possono essere usati per effettuare datazioni se vengono calibrati (col metodo del carbonio-14, per esempio) e quindi corretti da errori intrinsecamente presenti.

L'idratazione dell'ossidiana:



Figura 26: punta di freccia di ossidiana

L'ossidiana è un tipo di vetro vulcanico spesso utilizzato per produrre strumenti (figura 26).

Quando viene spezzata comincia ad assorbire acqua dall'ambiente circostante e forma uno strato di idratazione che può essere misurato in laboratorio. Nella sezione di una lama o di una scaglia di ossidiana, osservata al microscopio ottico, questo strato è visibile sulla superficie come una zona distinta, che aumenta di spessore con il passare del tempo.

Supponendo che lo spessore dello strato aumenta in modo lineare nel tempo (cioè a velocità costante) e supponendo di conoscere la velocità di accrescimento (v) e lo spessore attuale (s), è possibile calcolare l'intervallo di tempo trascorso dal momento in cui l'accrescimento è iniziato, ovvero dal momento in cui è stato creato l'utensile: $t = s/v$.

Chiaramente lo spessore s si misura in laboratorio, mentre risulta assai difficile la stima della velocità v ; essa dipende dalla temperatura e dalla composizione chimica dell'ossidiana (diversa da un luogo all'altro del pianeta). Per stimare questa grandezza si utilizzano altri metodi di datazione per calibrare un campione tester, che si suppone avere la stessa velocità di accrescimento degli utensili da datare.

Questo metodo è stato usato per datare addirittura reperti di 120.000 anni fa provenienti dall'Africa orientale.

La racemizzazione degli amminoacidi:

Questo metodo si basa sul fatto che gli amminoacidi, che formano le proteine in tutti gli organismi viventi, possono esistere in due forme tra loro speculari, dette enantiomeri. Questi differiscono nella loro struttura chimica e la differenza si manifesta nella loro azione sulla luce polarizzata: gli enantiomeri che fanno ruotare verso sinistra la luce polarizzata sono detti levogiri (L-amminoacidi), mentre quelli che la fanno ruotare verso destra sono detti destrogiri (D-amminoacidi).

Gli amminoacidi presenti nelle proteine degli organismi viventi sono solo del tipo levogiro. Dopo la morte, questi si trasformano, a una velocità costante, in amminoacidi destrogiri (questo processo è detto racemizzazione). La velocità di racemizzazione dipende dalla temperatura, quindi varia da luogo a luogo sul pianeta. Sottoponendo, però, alla datazione con il radiocarbonio alcuni campioni di ossa provenienti da un particolare sito e misurando la quantità di amminoacidi D o L, si può stabilire la velocità locale di racemizzazione:

$$v_R = \text{amm}_D / t = (\text{amm}_{tot} - \text{amm}_L) / t.$$

Questo metodo può essere applicato a materiali risalenti fino a 100.000 anni fa, quindi ben al di là della portata del radiocarbonio.

Datazione paleomagnetica:

Il campo magnetico terrestre varia continuamente sia in direzione che in intensità. Si conosce la sequenza di questi cambiamenti per alcune zone del pianeta fino a 4000 anni fa.

Quando i materiali argillosi vengono cotti a temperature superiori a 700°C e non subiscono altri forti riscaldamenti successivi, le particelle di ferro presenti in essi assumono permanentemente la direzione e l'intensità del campo magnetico terrestre al momento della cottura; questo fenomeno è detto magnetizzazione termoresidua.

Misurando la variazione termoresidua di un reperto a base di argilla e confrontandola con una sequenza tabulata nota, si ricava l'anno in cui il reperto è stato creato.

Esistono, infine, altri due metodi che non tratteremo in questo testo; essi sono il *metodo del rapporto tra cationi* e il *metodo delle tracce di fissione* (per una loro spiegazione si rimanda al libro *Archeologia. Teoria, metodi, pratica*, di P. Bahn, C. Renfrew: [1])

Conclusioni

La risposta alla domanda “Quando?” ha, in archeologia, due componenti principali. I metodi di datazione relativa ci permettono di determinare che qualcosa è relativamente più antico o più recente di qualcos’altro; i metodi di datazione assoluta permettono di assegnare una data in anni. La datazione archeologica raggiunge la sua massima attendibilità quando i due metodi vengono utilizzati insieme, per esempio quando l’ordine relativo assegnato a una sequenza di strati nel corso di uno scavo può essere confermato da datazioni assolute di ogni singolo strato.

Quando è possibile, i risultati ottenuti attraverso un metodo di datazione assoluta dovrebbero essere sottoposti a verifica incrociata con quelli ottenuti attraverso altri metodi.

In conclusione, la precisione delle datazioni ottenibili per ciascun periodo determina il tipo di domande che possiamo porci rispetto al passato: domande sui mutamenti di lungo periodo per il Paleolitico, domande più semplici sui cambiamenti di periodo più breve per le epoche successive.

Bibliografia

- [1] Paul Bahn, Colin Renfrew, *Archeologia. Teoria, metodi, pratica*, traduzione a cura di A. Vezzoli, P. Sfiligiotti, E. Zanini, Zanichelli, II ed. 2006.
- [2] Lucio Russo, *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*, Feltrinelli, Milano, III ed. 2003.
- [3] Lucio Russo, Emanuela Santoni, *Ingegni minuti. Una storia della scienza in Italia*, Feltrinelli, Milano, 2010.
- [4] Andrea Carandini, *Storie della Terra*, Einaudi, Torino, 2010.
- [5] Pietro Corvisiero, *lezioni di radioattività*,
(<http://www.ge.infn.it/~corvi/doc/didattica/radioattivita/lezioni/>)
- [6] Marco Lazzati, *Il carbonio-14 e le datazioni archeologiche*,
(<http://www.lazzatim.net/miofolder/PDF/Datazioni.pdf>)
- [7] Giorgio Bendiscioli, *Fenomeni radioattivi*, Springer, 2008.
- [8] Fingerprints of Emissions and the carbon cycle: stable and radiocarbon isotopes of carbon dioxide, the technical details: determining delta values,
(<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/infodata/isotopes/deltavalues.html>)
- [9] Gino Elimio Segrè, *Nuclei e particelle*, Zanichelli, 1982
- [10] Andrè Cherpillod, *La Sindone di Torino: l'oggetto impossibile*, traduzione a cura del "gruppo esperantisti torinesi", Didaskaleion, Torino, 1998.
- [11] Enciclopedia Treccani, (www.treccani.it/enciclopedia/datazione/)