



Anisn

HUMANITAS  
UNIVERSITY

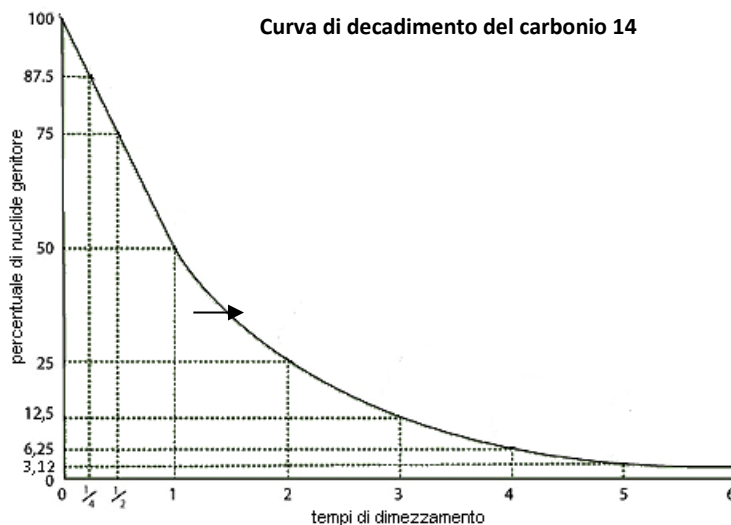
ZANICHELLI

## Una datazione radiometrica con il carbonio 14

DALLA PROVA DELLE OLIMPIADI DELLE SCIENZE NATURALI 2015 - XIII EDIZIONE  
FASE REGIONALE (TRIENNIO SCIENZE DELLA TERRA)

Le risposte corrette sono indicate in rosso

Le 6 domande che seguono riguardano il metodo radiometrico del carbonio 14, un metodo utilizzato sia in geologia sia in archeologia per i datare reperti. Le domande sono introdotte da un testo e da un grafico ai quali dovrai fare riferimento per fornire le risposte. Scrivi la risposta a ciascuna domanda nel foglio risposte allegato.

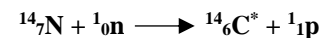


Curva di decadimento del carbonio 14

Sull'asse delle ascisse una unità corrisponde a 5730 anni

termini di numero di massa (indicato in alto davanti al simbolo dell'elemento) e numero atomico (indicato in basso davanti al simbolo dell'elemento). Il nuclide presente all'inizio della reazione nucleare è chiamato nuclide genitore, quello che si forma al termine della reazione è chiamato nuclide figlio. L'equilibrio dinamico che si stabilisce tra la formazione del  $^{14}_6\text{C}^*$  e il suo decadimento fa sì che l'abbondanza dell'isotopo radioattivo sia  $10^{-12}$  (un atomo di carbonio ogni mille miliardi è  $^{14}_6\text{C}^*$ ). Questa abbondanza si riscontra identica nell'atmosfera, negli oceani, nei sistemi viventi.

Alcuni reperti archeologici e fossili possono essere datati con il metodo del radiocarbonio, che sfrutta la presenza nei composti di origine biologica di un isotopo radioattivo del carbonio, il  $^{14}_6\text{C}^*$  (carbonio 14 o anche C-14). Il carbonio 14 si origina nell'atmosfera per azione dei raggi cosmici, che possono avviare la trasformazione di un atomo di azoto in un atomo di carbonio 14 secondo la reazione:



L'isotopo  $^{14}_7\text{C}^*$  decade spontaneamente con l'emissione di radiazioni  $\beta^-$  per trasformarsi in  $^{14}_7\text{N}$  (azoto 14), con un tempo di dimezzamento di circa 5730 anni. Ciò significa che ogni 5730 anni il numero di atomi di carbonio 14 presenti in un dato campione si dimezza, come indicato nel grafico a lato. Gli atomi che prendono parte a una reazione nucleare sono spesso indicati con il termine nuclide, perché se ne specifica la composizione del nucleo in

1. Come si spiega il fatto che la concentrazione di carbonio 14 nei sistemi viventi è uguale a quella nell'atmosfera?
  - a) Il carbonio dell'atmosfera diffonde all'interno dei sistemi viventi e porta al raggiungimento di una condizione di equilibrio tra le concentrazioni dei diversi isotopi.
  - b) Il decadimento degli isotopi radioattivi di carbonio 14 all'interno dei sistemi viventi determina la trasformazione di un numero equivalente di isotopi non radioattivi in isotopi radioattivi.
  - c) Gli isotopi non radioattivi nei sistemi viventi si trasformano spontaneamente in isotopi radioattivi con velocità analoga a quella nell'atmosfera.
  - d) **Gli organismi fotoautotrofi organicano il carbonio presente nell'atmosfera e lo immettono nella catena alimentare con le stesse abbondanze isotopiche che si trovano nell'atmosfera.**
  - e) La respirazione dei sistemi viventi permette di equilibrare il carbonio dell'organismo con quello presente nell'atmosfera.

2. Se si osserva la curva del decadimento del carbonio<sup>14</sup>, si nota che la quantità di nuclide genitore che decade nel corso di un tempo di dimezzamento, la cui durata rimane sempre costante, diminuisce al passare del tempo. Qual è la spiegazione di questo fatto?

- a) **La quantità di nuclide genitore che decade è proporzionale al numero di isotopi presenti e il decadimento provoca una diminuzione continua del numero di questi isotopi.**
- b) I nuclidi che si sono conservati sono quelli più resistenti al processo di decadimento, pertanto il loro decadimento diventa via via meno probabile.
- c) La probabilità di decadere per ogni singolo isotopo radioattivo di carbonio<sup>14</sup> diminuisce con il passare del tempo.
- d) I legami che si formano in numero crescente con i composti organici rendono più stabili gli isotopi radioattivi di carbonio<sup>14</sup>.
- e) I processi di fossilizzazione allontanano una parte del carbonio presente nei resti dell'organismo e fanno diminuire di conseguenza il numero di isotopi di carbonio<sup>14</sup> che decadono.

3. Un cinghiale adulto del peso di 100 kg contiene 20 kg di carbonio, dei quali fanno parte anche  $1 \cdot 10^{15}$  atomi di carbonio <sup>14</sup> radioattivi, per una massa complessiva di  $2 \cdot 10^{-8}$  g (due centomillesimi di grammo). Ogni secondo, decadono in media  $3 \cdot 10^3$  atomi di carbonio <sup>14</sup> radioattivi. La presenza del carbonio <sup>14</sup> nell'organismo rimane però costante nel tempo. Come si spiega questo fatto?

- a) Alcuni atomi non radioattivi di carbonio nell'organismo si trasformano in atomi di carbonio <sup>14</sup>, in numero tale da sostituire quelli decaduti o persi con l'attività metabolica.
- b) Alcuni atomi di azoto nell'organismo si trasformano in atomi di carbonio <sup>14</sup>, in numero tale da sostituire quelli decaduti o persi con l'attività metabolica.
- c) **Gli atomi di carbonio assorbiti con il cibo comprendono anche isotopi di carbonio <sup>14</sup>, che sostituiscono quelli decaduti o persi con l'attività metabolica.**
- d) Gli atomi di carbonio <sup>14</sup> decaduti o persi con l'attività metabolica sono sostituiti da altri atomi di carbonio <sup>14</sup> assorbiti dall'atmosfera attraverso gli scambi respiratori.
- e) Gli atomi di carbonio <sup>14</sup> decaduti o persi con l'attività metabolica sono sostituiti da altri atomi ingeriti con l'acqua e assorbiti nell'apparato digerente.

4. La datazione radiometrica con il metodo del carbonio<sup>14</sup> si basa sulla quantità del nuclide genitore rimasto nel reperto e non sulla quantità di nuclide figlio prodotto perché:

- a) Il nuclide figlio non è radioattivo e pertanto non può essere rilevato.
- b) Il nuclide figlio decade a sua volta in un altro nuclide e non si può essere certi della quantità realmente formata;
- c) L'azoto si può legare con alcuni composti organici e sfuggire pertanto alla rilevazione.
- d) La quantità di nuclide genitore è sempre maggiore di quella di nuclide figlio e pertanto più facile da rilevare.
- e) **Il nuclide figlio è indistinguibile dagli altri atomi di azoto presenti nei resti dell'organismo.**

5. Il processo di datazione radiometrica basato sul carbonio <sup>14</sup> è reso possibile dal fatto che dopo la morte di un organismo:

- a) Le reazioni chimiche di decomposizione favoriscono il consumo degli isotopi di carbonio <sup>14</sup> rispetto agli altri isotopi del carbonio.
- b) L'energia liberata dalle reazioni chimiche di decomposizione accelera il naturale decadimento degli isotopi di carbonio <sup>14</sup>.
- c) Le acque freatiche asportano dai resti fossilizzati più atomi di carbonio <sup>14</sup> di quanti non ne apportino;
- d) I resti sepolti sono irraggiungibili ai raggi cosmici e il processo di produzione del carbonio <sup>14</sup> si arresta;
- e) **I processi metabolici si arrestano e il decadimento degli atomi di carbonio <sup>14</sup> non è più bilanciato dall'apporto di nuovi materiali con la nutrizione.**

6. A ogni tempo di dimezzamento il numero di nuclidi genitori presenti in un campione si dimezza. Nel caso del carbonio <sup>14</sup>, ciò significa che dopo 5.730 anni i nuclidi genitori sono ridotti alla metà (50%), dopo 11.460 anni sono ridotti a un quarto (25%) e così via (*vedi grafico*). Un frammento di cranio attribuito a *Homo neanderthalensis* è sottoposto ad analisi radiometrica e rivela che il contenuto di carbonio <sup>14</sup> è ridotto allo 0,8% di quello dell'organismo in vita. Ciò significa che quel reperto può essere datato intorno a:

- a) 34.000 anni fa.
- b) **40.000 anni fa.**
- c) 64.000 anni fa.
- d) 128.000 anni fa.
- e) 600.000 anni fa.

## Commento a cura di Alessandro Chiappori e Pasquale Miglionico, Alumni ANISN

Errata corrige: nel testo si indica l'atomo di carbonio 14 come  $^{14}_7\text{C}^*$ . Dovrebbe essere in realtà  $^{14}_6\text{C}^*$ , con 6 protoni anziché 7.

1. Risposta corretta: **d)** *Gli organismi fotoautotrofi organicano il carbonio presente nell'atmosfera e lo immettono nella catena alimentare con le stesse abbondanze isotopiche che si trovano nell'atmosfera.*

Il  $^{14}_6\text{C}^*$  si forma per azione dei raggi cosmici prevalentemente negli strati più alti della troposfera. La quantità di raggi cosmici che raggiunge il suolo invece è bassa<sup>1</sup> e la conversione di  $^{14}_7\text{N}$  in  $^{14}_6\text{C}^*$  è trascurabile nei sistemi viventi. Possiamo dunque escludere l'opzione c). Pertanto il fatto che la concentrazione di  $^{14}_6\text{C}^*$  sia la stessa sia nei sistemi viventi che nell'atmosfera deve essere dovuto al ciclo del carbonio, ossia il ciclo attraverso il quale il carbonio viene scambiato tra geosfera, atmosfera, idrosfera e biosfera. Il carbonio viene immesso nella biosfera grazie alla fotosintesi fatta dagli organismi fotoautotrofi, pertanto l'opzione d) è corretta. Le opzioni restanti sono errate. La a) e la e) propongono come meccanismo di scambio di carbonio tra la biosfera e l'atmosfera la diffusione (anche la respirazione è un processo di diffusione), che, pur essendo il fenomeno che permette all'anidride carbonica di entrare o uscire dai sistemi viventi, non è il meccanismo con il quale il carbonio viene convertito in materia organica. La risposta b) è invece completamente falsa, visto che il fenomeno della formazione di isotopi radioattivi e il loro decadimento non avvengono in maniera correlata.

2. Risposta corretta: **a)** *La quantità di nuclide genitore che decade è proporzionale al numero di isotopi presenti e il decadimento provoca una diminuzione continua del numero di questi isotopi.*

Fenomeni come il decadimento radioattivo, in cui la quantità di "reagente" dimezza sempre in un tempo costante, sono caratterizzati dal fatto che la loro probabilità di avvenire in un intervallo di tempo di una data lunghezza è costante e la quantità di "reagente" in funzione del tempo può essere calcolata semplicemente con una funzione esponenziale della forma  $q(t) = q(0) 2^{-t/k}$  dove  $k$  è il tempo di dimezzamento,  $t$  è il tempo trascorso dal momento iniziale e  $q(0)$  è la quantità di reagente al tempo iniziale  $t = 0$ . Questo è equivalente a dire che la quantità di decadimenti che avviene in un intervallo di tempo di una data lunghezza è proporzionale soltanto al numero di isotopi presenti inizialmente, pertanto la risposta corretta è la a) e le risposte b), c) e d) sono errate perché assumono che la velocità a cui avvengono i decadimenti possa in qualche modo cambiare nel tempo. La risposta e) è errata invece perché, nonostante parte del carbonio si allontani durante i processi di fossilizzazione, questo allontanamento non agisce in modo selettivo sul carbonio 14. Pertanto, visto che la curva di decadimento non si riferisce alla quantità assoluta di carbonio 14, ma al rapporto di carbonio 14 sul carbonio totale, il processo di fossilizzazione non può spiegare il suo andamento.

3. Risposta corretta: **c)** *Gli atomi di carbonio assorbiti con il cibo comprendono anche isotopi di carbonio 14, che sostituiscono quelli decaduti o persi con l'attività metabolica.*

Per quanto spiegato nel commento alla domanda 1, il  $^{14}_6\text{C}^*$  decaduto negli organismi viventi deve necessariamente essere sostituito da altro  $^{14}_6\text{C}^*$  proveniente dall'esterno, visto che possiamo considerare trascurabile la produzione di  $^{14}_6\text{C}^*$  nel corpo. Il  $^{14}_6\text{C}^*$  viene assorbito indistintamente dagli altri isotopi di carbonio, pertanto la domanda diventa equivalente a chiedere come un cinghiale rinnova il carbonio presente nel proprio organismo. Essendo il cinghiale un organismo eterotrofo, la sostituzione di questi atomi avviene attraverso l'assorbimento della materia organica presente nel cibo, pertanto la risposta corretta è la c).

---

<sup>1</sup> Il suolo è raggiunto prevalentemente da raggi cosmici *secondari*, che contengono molti meno neutroni liberi rispetto ai raggi cosmici *primari* della troposfera. Inoltre, essendo i neutroni relativamente pesanti, penetrano poco in profondità.

4. Risposta corretta: **e)** *Il nuclide figlio è indistinguibile dagli altri atomi di azoto presenti nei resti dell'organismo.*

Come riportato nel testo introduttivo, il prodotto del decadimento spontaneo del carbonio 14 è l'azoto 14:  $^{14}_7\text{N}$ . Si tratta della forma più stabile dell'atomo di azoto, quindi la più diffusa in natura e all'interno dei resti dell'organismo. Pertanto, la risposta b) è errata, mentre la risposta e) è corretta.

Il fatto che l'azoto 14 non sia radioattivo non impedisce la sua rilevazione. Infatti, la quantità di carbonio 14 non è misurata in base alla sua radioattività<sup>2</sup>, ma alla differenza di massa rispetto all'isotopo più stabile  $^{12}_6\text{C}$ . La risposta a) è quindi errata. Le risposte c) e d) propongono ipotesi evidentemente errate.

5. Risposta corretta: **e)** *I processi metabolici si arrestano e il decadimento degli atomi di carbonio 14 non è più bilanciato dall'apporto di nuovi materiali con la nutrizione.*

Per poterci basare sulla curva di decadimento rappresentata in figura, occorre che il carbonio radioattivo  $^{14}_6\text{C}^*$  decada spontaneamente. Per nostra fortuna, questo è ciò che accade per la stragrande maggioranza degli atomi  $^{14}_6\text{C}^*$  nei resti degli organismi. Fenomeni come quelli citati nelle risposte a) b) e c) trattano allo stesso modo i vari isotopi di carbonio, quindi non mutano il rapporto fra carbonio 12 e carbonio 14, che è la quantità che occorre misurare. Quindi, le prime tre risposte sono errate. Al contrario, con la morte dell'organismo si interrompono gli scambi trofici con l'ambiente circostante (domanda 1) e si fissa il rapporto iniziale fra gli isotopi di carbonio 14 e 12. A questo punto, la quantità di carbonio 14 può solo diminuire per decadimento spontaneo, diminuendo il rapporto isotopico. La risposta e) è quindi corretta.

La risposta d) è errata poiché i raggi cosmici in realtà sono ancora in grado di raggiungere i resti dell'organismo, ma solo nell'atmosfera le condizioni sono favorevoli alla produzione di nuovo carbonio  $^{14}_6\text{C}^*$ .

6. Risposta corretta: **b)** *40.000 anni fa.*

Per ogni dimezzamento dobbiamo aggiungere 5.730 anni alla datazione del reperto. Dopo N dimezzamenti la quantità di carbonio 14 rimasta è il  $100/2^N$  %, mentre l'età del reperto è quindi  $N \times 5.730$  anni. Per rispondere al quesito occorre quindi calcolare N, cioè trovare quante volte la quantità di carbonio 14 si è dimezzata. Sappiamo dal testo che la quantità di carbonio 14 rimanente è appena lo 0.8 % di quella iniziale, quindi  $100/2^N = 0.8$ . Possiamo calcolare a mano che  $100/0.8 = 125$ , che corrisponde circa a  $2^7 = 128$ . Perciò N vale circa 7 e l'età stimata per il reperto è di circa  $7 \times 5.730 = 40.110$  anni. La risposta che più si avvicina è quindi la b).



<sup>2</sup> Storicamente la quantità di carbonio 14 si misurava effettivamente quantificando l'emissione radioattiva di elettroni, ma al giorno d'oggi si usano molto più comunemente degli spettrometri di massa. Con questi strumenti si può anche misurare direttamente il rapporto fra la quantità di carbonio 14 e la quantità degli isotopi più comuni,  $^{12}_6\text{C}$  e  $^{13}_6\text{C}$ .