



Spigolature astronomiche[★]

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

L'età della Terra

Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

La domanda «quanto è vecchia la Terra?», che a noi appare oggi così naturale, non venne presa in considerazione da nessuna delle civiltà del passato. Tali civiltà, pienamente immerse in una natura che si rinnova regolarmente, rimasero legate alla concezione di un tempo ciclico in cui tutto veniva eternamente riproposto. Anassimandro, Pitagora ed Erodoto, in Grecia, e successivamente Leonardo da Vinci, avevano correttamente dedotto che le montagne in cui erano stati ritrovati fossili marini in passato dovevano trovarsi sottacqua. Ma si trattava di voci isolate; ancora nel Settecento un personaggio come Voltaire poteva in tutta serietà avanzare l'ipotesi che i fossili fossero pesci e conchiglie portati sulle montagne dai viaggiatori e che, gettati via, si fossero pietrificati nel tempo.

Finalmente, nel XVII secolo, grazie anche alla recente invenzione del microscopio, si capì che le rocce non sono sempre state solide, ma in passato devono avere avuto la consistenza della melma per potersi infiltrare all'interno degli scheletri degli animali morti, sostituendo le sostanze organiche e formando i fossili. Nel corso del tempo, strati diversi si sovrapposero e solidificarono dando luogo alle rocce sedimentarie.¹ (FIG. 1)

Le età implicate, benché non quantificabili, dovevano certamente essere superiori a quelle che pote-

* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/indici.html>.

¹ Queste stratificazioni sono dovute alla sedimentazione di calcare derivante dall'accumulo di parti dure di organismi: gusci di molluschi, coralli, spugne e alghe. Successivamente, questi sedimenti iniziarono ad emergere a causa dello scontro tra zolle tettoniche.



FIG. 1. Rocce sedimentarie delle Dolomiti; sono chiaramente visibili le varie stratificazioni create tra i 170 e i 65 milioni di anni fa nei fondali marini. Successivamente, questi sedimenti iniziarono ad emergere a causa dello scontro tra Europa e Africa.

vano dedursi dalla Bibbia. Basandosi infatti sulla genealogia dei personaggi biblici, diversi studiosi (Lutero e Newton, tra gli altri) fissarono la nascita della Terra intorno al 4000 a.C.² I seimila anni resi

² Addirittura, nel 1650, l'arcivescovo anglicano irlandese, James Ussher (1581-1656), basandosi sulla Bibbia, la letteratura patristica e altri testi, aveva calcolato con molta precisione la data della creazione della Terra, fissandola a: «*the entrance of the night preceding the 23rd day of October ... the year before Christ 4004*!» Queste idee di Ussher sono quelle che hanno poi dato origine alle credenze del *Young Earth creationism*, il movimento religioso che pretende di spiegare come l'origine del Cosmo sia avvenuta in soli sei giorni, secondo una stretta interpretazione letterale del racconto della Genesi.





FIG. 2. Calcare prevalentemente formato da fossili di bivalvi nel periodo Giurassico (tra 200 e 150 milioni di anni fa).

così disponibili erano decisamente pochi. Si ricorse pertanto alla teoria del catastrofismo, con cui si ipotizzavano una serie di cataclismi a livello planetario in cui alluvioni e terremoti, causando violenti spostamenti di terra e di mari, erano in grado di produrre nel breve tempo a disposizione le discontinuità osservate tra i diversi strati di roccia. A questo punto, però, era chiaro che un unico Diluvio non era più sufficiente, e le discrepanze con la Bibbia, che si era tentato di lasciare fuori dalla porta, rientravano dalla finestra. Le implicazioni derivanti dallo studio dei fossili erano dunque di portata tale da non venire riconosciute ed accettate nell'immediato. Per circa un secolo si continuò a catalogare rocce e fossili accantonando il problema della datazione. (FIG. 2)

Fu James Hutton (1726-1797), un geologo scozzese, a sbarazzarsi del catastrofismo e a gettare le basi del metamorfismo, ossia lo studio dei processi di trasformazione delle rocce. Egli mostrò che gli stessi processi attualmente in atto sulla superficie terrestre – erosione e distruzione da parte di agenti atmosferici e terremoti, e ripristino delle rocce da parte di sedimentazione e magma vulcanico – erano anche responsabili delle variazioni geologiche, purché avessero a disposizione un tempo assai lungo a causa della lentezza dei meccanismi in atto. Hutton, tuttavia, era ancora legato al concetto di un tempo ciclico, in cui distruzioni e ricostruzioni si susseguono periodicamente. Ma nel XIX secolo divenne chiaro che il succedersi dei fossili nei diversi strati rocciosi mostrava un andamento lineare, e non ciclico, del susseguirsi degli eventi: man mano che ci si sposta a strati superiori, e dunque più recenti, i fossili in essi contenuti tendono a diventare sempre più complessi e, una volta che un determinato fossile sparisce, esso non riappare più. I tempi erano ormai maturi per azzardare l'ipotesi che, se il mondo inanimato evolveva, tale evoluzione doveva coinvolgere anche gli esseri viventi: nel 1859 Charles

Darwin (1809-1882) pubblicò *On the origin of species by means of natural selections*, in cui si sosteneva una comune ascendenza per l'intero mondo animale da cui si sarebbero evolute le varie specie. Anche in questo caso erano richiesti tempi enormi.

A contrastare tale richiesta da parte di biologi e geologi c'erano però i fisici. Nel 1796 Pierre-Simon, marquis de Laplace (1749-1827) e, indipendentemente, Immanuel Kant (1724-1804), forti della dinamica newtoniana, pervennero all'ipotesi nebulare, tutt'ora accettata nei suoi tratti generali, dell'origine del Sistema solare:³ inizialmente il Sole era avvolto da un'atmosfera rotante sul piano equatoriale. La Terra, al pari di altri pianeti, si è formata per coalescenza di regioni gassose, ed era pertanto molto calda inizialmente. Calcolare il tempo impiegato dalla Terra per raffreddare alle attuali temperature equivale pertanto a scoprire la sua età.

A questo scopo diversi ingegnosi metodi vennero utilizzati da vari studiosi nel corso del XVIII e XIX secolo. In particolare, William Thomson (1824-1907), divenuto poi Lord Kelvin, tenendo conto della conducibilità termica delle rocce e di altri fattori, giunse a fissare il tempo di raffreddamento nell'ordine di 40 milioni di anni. Un intervallo di tempo più lungo dei seimila anni biblici, ma decisamente troppo breve rispetto agli eoni richiesti dai geologi e dalla teoria darwiniana della selezione naturale (sappiamo oggi che i primi resti fossili risalgono a circa 550 milioni di anni fa, e che i primi organismi unicellulari apparvero 4 miliardi di anni fa).

La soluzione a questo dilemma venne da scienziati – quali Henri Becquerel (1852-1908), Marie Curie (1867-1934) ed il marito Pierre (1859-1906) – che non si interessavano affatto all'età della Terra, ma piuttosto alla struttura interna dell'atomo e, in particolare, al suo nucleo. Si capì che esso è composto da protoni positivi e neutroni privi di carica elettrica. Le diverse sostanze si distinguono per il diverso numero di protoni nei nuclei degli atomi che le costituiscono. Nuclei con un eccessivo numero di protoni o neutroni risultano essere radioattivi, ossia sono instabili e si sfaldano emettendo particelle che, interagendo con le molecole della materia circostante, trasformano la loro energia cinetica in calore.

Questo processo esotermico – molto diffuso a causa della presenza di sostanze radioattive nel mantello e nella crosta terrestri – era sconosciuto ai tempi di Lord Kelvin, che non ne tenne conto nei suoi calcoli, ritenendo che il calore disperso dalla Terra fosse quello originario della formazione; ora invece divenne chiaro che l'energia termica irradiata viene continuamente rimpiazzata attraverso i processi radioattivi. Pertanto la Terra non sta raffreddando e la cronologia di Kelvin si sgretolò lasciando campo libero a quella darwiniana.

³ Vedi su questa rivista: DANIELA GALILEI, *Origine del Sistema solare. I: le teorie "nebulari": Wright, Kant e Laplace*, «Giornale di Astronomia», 2006, n. 2, p. 24.

Ma la radioattività non si limitò a selezionare la cronologia corretta; essa si rivelò un orologio di grande precisione per la datazione di reperti fossili e archeologici o di campioni rocciosi. Quando i nuclei di una sostanza radioattiva (sostanza madre) perdono protoni, essi diventano necessariamente un'altra sostanza (sostanza figlia). I nuclei della sostanza madre diminuiscono e quelli della sostanza figlia aumentano ad un ritmo che varia a seconda del materiale radioattivo coinvolto. Pertanto, conoscendo il ritmo caratteristico di decadimento della sostanza madre, è possibile risalire all'età di un reperto tramite il conteggio dei nuclei delle sostanze madre e figlia in esso contenuti (si veda il livello avanzato).⁴ Anche se nella pratica la datazione tramite sostanze radioattive presenta alcune difficoltà su cui non ci soffermiamo, essa ha permesso di ricavare l'età non solo dei vari strati rocciosi della Terra, ma anche degli asteroidi che vi cadono sopra. Tali asteroidi sono coevi della Terra e, all'interno di uno scarto di 100 milioni di anni, la loro età – e dunque l'età del Sistema solare – risulta essere di 4,6 miliardi di anni.

È difficoltoso abbracciare con la mente un simile arco di tempo. Per meglio rendersi conto del peso relativo delle varie tappe dell'evolversi della Terra, assumiamo allora che il Sistema solare abbia un solo anno di vita, un intervallo con cui siamo decisamente più familiari. La Terra si forma il primo gennaio; le prime forme di vita acquatiche vengono alla luce alla fine di maggio; piante ed animali compaiono alla fine di novembre; il 25 dicembre si estinguono i dinosauri (evento accaduto in realtà 65 milioni di anni fa); l'*homo sapiens* appare alle ore 23 del 31 dicembre; l'impero romano dura dalle 23:59:45 alle 23:59:50; la scoperta dell'America avviene alle 23:59:57.

È noto che sostanze diverse si distinguono per il diverso numero di protoni nei loro nuclei atomici. I nuclei contengono anche neutroni ed accade che una stessa sostanza sia presente in natura con isotopi diversi, ossia nuclei con lo stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni. Ad esempio, l'isotopo carbonio-12 (^{12}C) è composto da 6 protoni e 6 neutroni, mentre il carbonio-14 (^{14}C) ha due neutroni in più. Alcuni nuclei con un eccesso di protoni o neutroni sono instabili e “perdono pezzi” tramite decadimento radioattivo. Ad esempio, il ^{14}C decade a seguito della trasformazione di un neutrone in un protone ed un elettrone; l'elettrone viene espulso ed il nucleo si trova così con un neutrone in meno e un protone in più. Il ^{14}C si trasforma pertanto in azoto-14 (^{14}N), stabile e non radioattivo. Non è possibi-

⁴ Il tempo caratteristico di decadimento dell'uranio-238 (ovvero contenente 238 protoni e neutroni nel nucleo), ad esempio, è di 4,5 miliardi di anni; quello dell'uranio-235 è di 704 milioni di anni; quello del carbonio-14 di 5.730 anni.

le prevedere con esattezza quando un determinato nucleo instabile si trasforma. È solo possibile fare valutazioni di tipo statistico.

Per comprendere questo concetto, si consideri un gruppo di N_0 persone, ognuna dotata di una moneta. Dopo aver compiuto un primo lancio, accadrà che circa metà delle persone, $N_0/2$, avrà ottenuto “testa”, e l'altra metà “croce”. Le persone che hanno realizzato “testa” effettuano un secondo lancio. Di queste, nuovamente, solo circa la metà, $N_0/4 = N_0/2^2$, otterrà di nuovo “croce” ed eseguirà un lancio successivo. Le persone che otterranno “croce” al terzo lancio saranno ancora circa la metà, $N_0/8 = N_0/2^3$. Risulta allora chiaro che, dopo n lanci, le persone che hanno realizzato sempre “croce” sono $N_0/2^n$.

Qualcosa di simile accade con gli atomi instabili. Dati inizialmente N_0 atomi “genitore”, non siamo in grado di dire quando ciascuno di essi decadrà in un atomo “figlio”; possiamo solo dire che, statisticamente, dopo un tempo caratteristico τ , detto “tempo di dimezzamento” o “emivita”, la metà circa degli atomi genitore di partenza si sono trasformati in figlio; in base all'esempio precedente, dopo un tempo $t = n\tau$, i nuclei ancora non decaduti sono $N_0/2^n$.

Anziché utilizzare l'esponenziale in base 2, i fisici preferiscono usare come base il numero di Nepero, $e = 2,7182$. Pertanto, dopo un tempo t , il numero di nuclei genitore si scrive

$$N = N_0 2^{-t/\tau} = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

da cui si ricava la costante di decadimento

$$\lambda = \frac{\ln 2}{\tau}.$$

Naturalmente, il numero di atomi figlio D sarà

$$D = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (2)$$

Se si conosce il valore N_0 , il numero iniziale dei nuclei radioattivi presenti in un reperto, si può ricavare l'età di quest'ultimo direttamente dall'Eq. (1) dopo aver conteggiato il numero N di nuclei “superstiti”:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{N_0}{N} \right). \quad (3)$$

Questo metodo di datazione è detto “sistema a decadimento”. Nel caso, invece, che N_0 sia ignoto, si ricorre all'uso combinato delle Eqq. (1) e (2):

$$\frac{D}{N} = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = e^{\lambda t} - 1,$$

da cui, dopo aver conteggiato i nuclei N e D presenti, si può ricavare l'età

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{D}{N} + 1 \right). \quad (4)$$

Questo schema di datazione viene detto “sistema ad accumulato”. (FIG. 3)

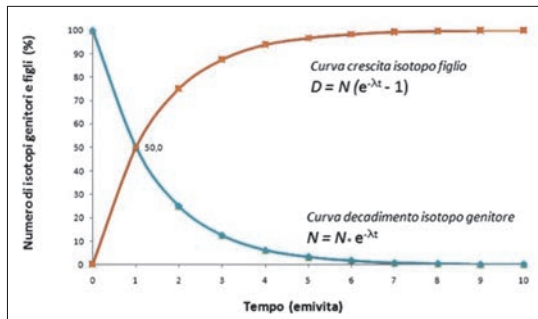


FIG. 3. Andamento temporale del numero di nuclei genitori e figli in funzione del tempo (normalizzato al tempo di emivita).

Il tempo di emivita non è influenzato da calore, pressione, campi elettrici e magnetici. Questo rende la datazione mediante materiale radioattivo particolarmente affidabile. Sostanze radioattive diverse hanno tempi di dimezzamento diversi: ad esempio, il fermio-255 si dimezza in circa tre ore, mentre l'uranio-238 (^{238}U) ha un'emivita di 4,5 miliardi di anni. L'impiego di uno specifico materiale dipende (anche) dai tempi scala che si vogliono misurare.

Per la datazione di reperti organici di età compresa tra i 100 e i 70.000 anni si utilizza il carbonio 14 (^{14}C), che ha un'emivita di 5730 anni e decade, come abbiamo detto, in un nucleo di azoto-14. Ovviamente, se osserviamo la presenza in natura

di ^{14}C , nonostante un'emivita alquanto breve, significa che tale isotopo viene continuamente prodotto. In effetti, l'atmosfera è continuamente bombardata da raggi cosmici; a seguito di questo bombardamento vengono creati neutroni. Quando uno di questi neutroni colpisce un nucleo di azoto, ne espelle un protone "istallandosi" al suo posto, e creando così un nucleo di ^{14}C . Poiché il bombardamento da parte dei raggi cosmici avviene ad un tasso alquanto costante, anche la produzione ^{14}C procede ad un ritmo invariante nel tempo. Se il ^{14}C non decadde, il suo ammontare in atmosfera crescerebbe sempre più; esso invece aumenta fino a quando il numero di decadimenti nell'unità di tempo (che aumenta all'aumentare dei nuclei radioattivi) diventa uguale al numero di nuclei prodotti, sempre nell'unità di tempo, dai raggi cosmici. Pertanto la concentrazione di ^{14}C rispetto a quella di ^{12}C rimane costante, e pari a $R = ^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,2 \times 10^{-12}$.

Al pari del ^{12}C , anche il ^{14}C si lega all'ossigeno presente in atmosfera formando anidride carbonica che viene assimilata dapprima dalle piante e poi dagli animali che di queste piante si nutrono. Finché un organismo è in vita, il rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ al suo interno rimane costante. Quando muore, l'ammontare di ^{12}C non varia mentre il ^{14}C , non venendo più rimpiazzato, diminuisce a causa del decadimento radioattivo. Dal conteggio degli atomi di

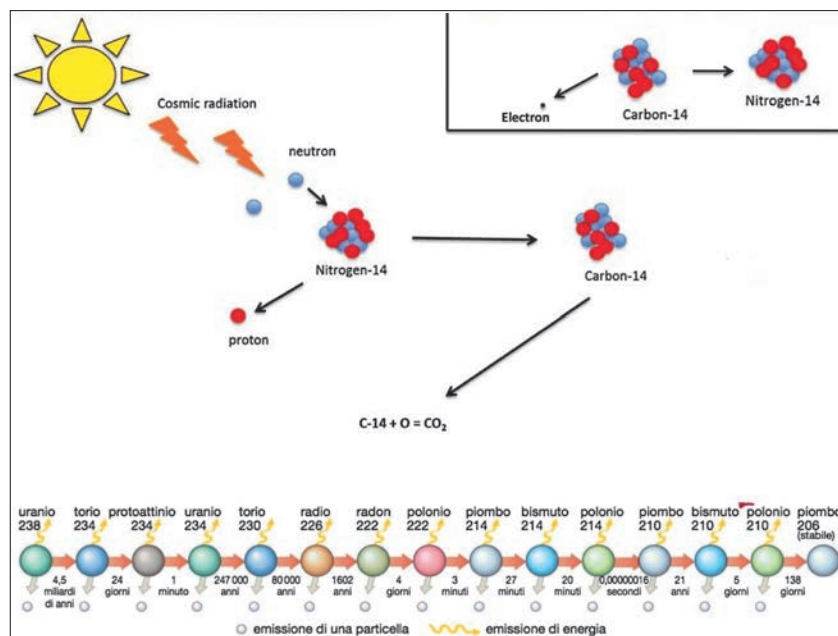


FIG. 4. In alto è schematizzata la formazione del carbonio-14 (^{14}C). Un protone dovuto ai raggi cosmici che investono la Terra urta contro un nucleo di azoto-14 (^{14}N) e si sostituisce ad un neutrone che viene espulso; si forma così un nucleo di ^{14}C che si lega all'ossigeno presente nell'atmosfera, dando luogo ad una molecola di anidride carbonica che viene assorbita dalle piante durante il processo di fotosintesi, e successivamente dagli animali che di queste piante si nutrono. Il ^{14}C è instabile e dopo un certo tempo un neutrone si trasforma in un protone, emettendo un elettrone (in modo da mantenere costante la quantità di carica elettrica): il ^{14}C diventa nuovamente un ^{14}N (inserto in alto a destra). In basso è indicata la catena di trasformazioni che porta un nucleo di uranio-238 a decadere in un nucleo di piombo-206.



^{12}C all'interno del reperto organico,⁵ e dalla conoscenza di R , è possibile risalire al numero N_0 di nuclei di ^{14}C presenti al momento della morte; conteggiato il numero N_t dei nuclei di ^{14}C presenti, mediante l'Eq. (1) si ottiene l'età del campione:

$$t = \tau \ln \left(\frac{N_0}{N_t} \right).$$

Il primo a utilizzare il metodo della datazione tramite radiocarbonio è stato il chimico statunitense Willard Frank Libby (1908-1980) nel 1946, e per questi studi ha ricevuto il Premio Nobel per la Chimica nel 1960.

Per datare i campioni rocciosi, molto più antichi dei reperti organici, è necessario ricorrere a nuclei radioattivi con tempi di dimezzamento assai lunghi, come, ad esempio, l'uranio-238 (^{238}U), la cui emivita di 4,5 miliardi di anni lo rende adatto per datazioni che vanno da 50.000 anni a 4,6 miliardi di anni. Al termine di una lunga catena di trasformazioni in nuclei radioattivi successivi, il ^{238}U , che possiede 146 neutroni, decade infine nel

nucleo stabile piombo-206 (^{206}Pb), contenente 124 neutroni; si ritiene che tutto il piombo presente sulla Terra derivi dal decadimento dell'uranio. (FIG. 4)

Naturalmente, non è possibile sapere quanto fosse l'ammontare iniziale di ^{238}U all'interno del campione che si vuole datare. Di conseguenza, non si può utilizzare il sistema a decadimento come nel caso delle datazioni tramite il ^{14}C . Si ricorre allora all'Eq. (4) derivante dal sistema ad accumulo. Si misura il numero N_U dei nuclei di ^{238}U e il numero N_{Pb} dei nuclei di ^{206}Pb presenti nel campione,⁶ e si calcola l'età come

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{N_{Pb}}{N_U} + 1 \right).$$

È stato così possibile stimare l'età della Terra in 4,6 miliardi di anni, un valore confermato sia dai meteoriti caduti sul nostro pianeta, sia da campioni di rocce lunari prelevati durante la missione Apollo 11 del 1969, che forniscono un'età molto simile anche per gli altri pianeti del Sistema solare.

⁵ Il rapporto $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ all'interno di un campione si ottiene di norma mediante spettrometria di massa, che permette di lavorare anche con reperti di pochi milligrammi. Il margine di errore è compreso tra il 2% e il 5%.

⁶ Il conteggio si ottiene anche in questo caso tramite uno spettrometro di massa, in grado di analizzare anche solo pochi miliardesimi di grammo. La sua precisione è tale che l'errore, nel datare una roccia di circa tre miliardi di anni, è inferiore ai due milioni di anni, con un errore percentuale, quindi, di 0,07%.

Annibale D'Ercole si è laureato in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza". Astronomo associato presso l'INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna, si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.

