

ALFONSO BOSELLINI

IL TEMPO IN GEOLOGIA

Il tempo geologico, la sua grandezza e i metodi per determinarlo: una premessa fondamentale per comprendere la storia geologica del nostro pianeta. Come l'astronomia ha dimostrato l'immensità dello spazio, così la geologia ha dimostrato l'immensità del tempo.

La vastità del tempo geologico, che possiamo far iniziare con la fine del processo di accrezione dei pianeti, è di difficile comprensione per tutti noi; ci è quasi impossibile ragionare in termini di centinaia di milioni o miliardi di anni. Ma è proprio questa vastità che ci permette di capire in modo corretto come si verificano grandi fenomeni ed eventi geologici quali l'erosione di una grande valle fluviale, il sorgere delle catene montuose o la nascita dei bacini oceanici: non si tratta di eventi catastrofici, come spesso si legge su giornali e riviste, ma di movimenti lentissimi, impercettibili, che producono i fenomeni appena detti grazie all'enormità del tempo in cui si protraggono; basti pensare che lo spostamento di 1 mm all'anno implica uno spostamento di 1 km in un milione di anni.

La figura 1 è una tavola semplificata del tempo geologico, disegnata ad una scala appropriata per mettere in risalto l'enormità del tempo geologico rispetto alla presenza dell'uomo sulla Terra e ad alcuni avvenimenti fondamentali della storia terrestre.

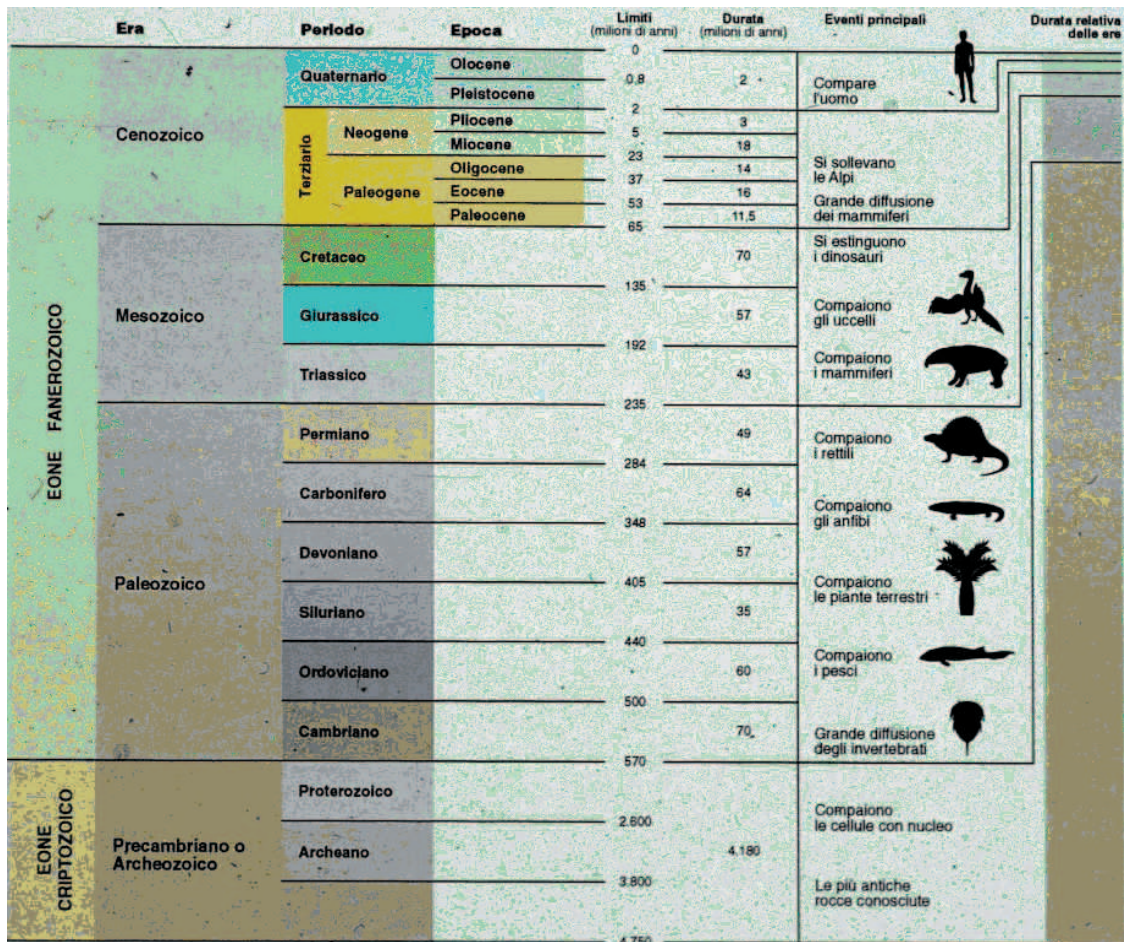
I geologi parlano di decine, centinaia di milioni di anni o addirittura di miliardi di anni. Ma come fanno a conoscere queste datazioni, da dove ottengono questi numeri e con quanta fiducia possiamo accettarli? Innanzitutto occorre dire che esistono due metodi principali per datare le rocce, i fossili e gli eventi del passato geologico in genere; essi vengono chiamati rispettivamente datazione relativa e datazione radiometrica o, in modo inesatto ma più corrente, assoluta.

Il primo metodo è quello più antico e, come dice la parola stessa, non fornisce una datazione quantitativa, numerica (10, 100, 500 milioni di anni), ma soltanto relativa: una roccia o un fossile vengono riferiti a un certo periodo della storia della Terra collocato in una scala temporale di cui, fino agli inizi del secolo scorso, non si conosceva la misura quantitativa: se si dice che una roccia è del periodo Giurassico si sa che è più vecchia di una roccia del periodo Cretaceo e più giovane di una del periodo Triassico, ma non si danno valori in anni.

Il metodo radiometrico, basato sul processo fisico del decadimento degli elementi radioattivi, è invece in grado di quantificare, con

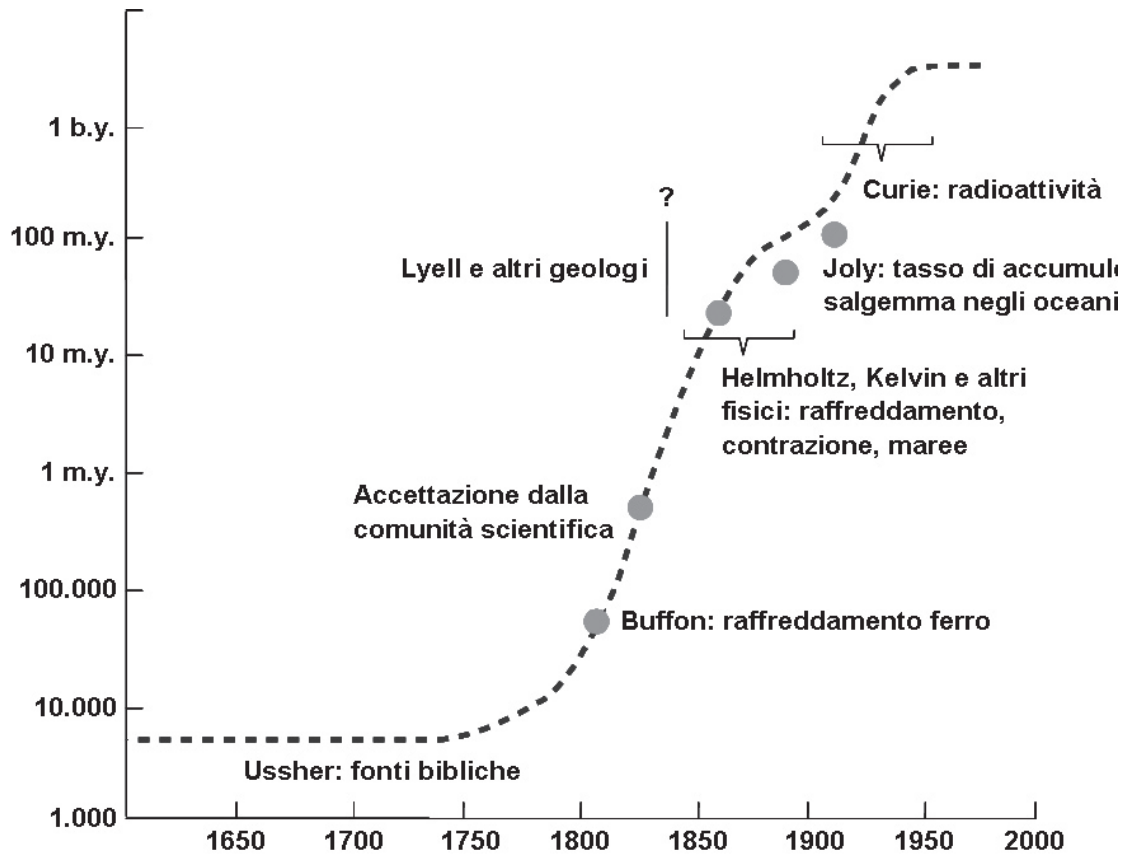
buona e sufficiente approssimazione, l'età di un minerale, di una roccia o di un fossile.

FIG. 1. La scala dei tempi geologici. Come si può notare è soltanto con l'inizio dell'Era Paleozoica che si assiste alla massiccia comparsa di vari organismi sempre più complessi ed evoluti.



È stato così possibile, dopo la scoperta della radioattività nel giro di pochi decenni, avere un quadro realistico del tempo geologico e della collocazione cronologica dei vari fenomeni succedutisi dalla formazione del nostro pianeta a oggi. Ci si è così resi conto che si trattava non di migliaia (come riportato nelle *Sacre Scritture*), ma di milioni e miliardi di anni (FIG. 2).

FIG. 2. Diagramma mo­strante la percezione dell'estensione del tempo geologico dalla metà del Seicento fino alla scoperta della radioattività, agli inizi del Novecento.



1. La cronologia relativa

Il metodo della cronologia relativa è fondato su due concetti base, quello della sovrapposizione degli strati e quello dell'evoluzione biologica. Il principio della sovrapposizione, secondo il quale assai banalmente lo strato che sta sotto è più vecchio di quello che sta sopra, è stato usato fin dai primordi della geologia, a metà del Seicento. E già nel 1759, il veronese Giovanni Arduino stabilì una suddivisione cronologica relativa delle formazioni geologiche del Veneto in quattro categorie, da lui dette "ordini", e chiamate, dalla più recente alla più antica, quaternaria, terziaria, secondaria e primaria.

Per quanto riguarda il problema cronologico, occorre tener presente che, fino agli inizi del Settecento, in tutto il mondo cristiano si accettava che la *Bibbia* offrisse un racconto veritiero, di ispirazione divina, sulla primitiva storia della Terra. Nel 1654, l'arcivescovo irlandese James Ussher, analizzando le *Sacre Scritture*, concludeva che la Terra era stata creata nel 4004 a.C. E pochi anni dopo, il dottor Lightfoot di Cambridge, uno studioso della *Bibbia*, scriveva in modo assai specifico e ca-

tegorico che il cielo e la Terra erano stati creati nel medesimo istante, assieme alle nubi, all'acqua e all'uomo, il 26 ottobre del 4004 a.C. L'idea di una Terra vecchia di 6.000 anni fu accettata, almeno fino agli inizi del Settecento, con soddisfazione dal mondo cristiano e questo dato cronologico fu stampato in molte edizioni della *Bibbia*.

Furono i grandi geologi dell'Ottocento, quali lo scozzese James Hutton e l'inglese Charles Lyell a rendere il mondo scientifico consapevole che il tempo geologico doveva avere un'estensione enorme (FIG. 2). Per quanto riguarda la storia della Terra, Hutton concludeva un suo saggio del 1785 con la famosa frase: «*We find no vestige of a beginning no prospect of an end*» (noi non troviamo né la traccia di un inizio né la prospettiva di una fine), e a proposito dell'età del nostro pianeta, già nel 1830, i geologi ragionavano in termini di milioni di anni (FIG. 2). Si aprì così la strada alla teoria dell'evoluzione biologica, che verrà proposta da Darwin una ventina di anni dopo.

La maggior parte dei biologi è d'accordo nel ritenere che gli esseri viventi, dal momento della loro prima comparsa sulla Terra, oltre 3 miliardi di anni fa, sotto forma di organismi estremamente semplici, abbiano subito modificazioni più o meno ampie nel corso dei tempi. Queste variazioni, fissandosi nel patrimonio genetico, avrebbero fatto sì che i discendenti degli animali e dei vegetali appartenenti ad una determinata specie risultassero distinti dai loro progenitori, costituendo così una o più nuove specie derivate dalla precedente, i cui rappresentanti, variando successivamente a loro volta, hanno potuto generare altre specie ancora. Così, attraverso variazioni ora brusche (mutazioni) ora lente, gli organismi animali e vegetali avrebbero acquisito quei caratteri che sono propri delle forme attuali, quasi sempre molto diversi da quelli dei più antichi rappresentanti dei rispettivi gruppi.

Anche se esistono opinioni diverse su come il processo si sia in realtà verificato, è comunque accertato che l'attuale stato biologico del nostro pianeta è il risultato di un lungo processo di variazioni e sviluppi graduali e completi che nel loro insieme prendono il nome di evoluzione.

Se la vita si è veramente evoluta gradualmente, i fossili di uno stesso gruppo di organismi dovrebbero variare gradualmente nelle rocce via via più recenti. E così è infatti. Si conoscono molti esempi di variazioni di tal genere che possono illustrare il fenomeno evolutivo per ogni gruppo importante di animali e vegetali, dai dinosauri, ai cavalli, agli invertebrati marini.

La comparsa o l'estinzione di organismi furono usate per creare una scala cronologica e costruire una successione stratigrafica ideale, con le rocce più antiche in basso, in cui sono presenti i fossili primitivi.

vi, e con le rocce via via più recenti verso l'alto, con fossili via via più evoluti. Tale successione stratigrafica ci fornisce quindi un'età relativa delle rocce, nel senso che sappiamo quali sono le più giovani e le più vecchie in relazione ai fossili in esse contenuti: l'orologio che scandisce il tempo è l'evoluzione degli organismi sulla Terra. Ma non sappiamo (o meglio non sapevamo) quante migliaia, milioni o miliardi di anni sono coinvolti in questo tipo di cronologia relativa. È invece la cosiddetta datazione radiometrica che, come vedremo più avanti, fornisce l'età in migliaia, milioni o miliardi di anni di un evento geologico, di una roccia o di un fossile.

Fu così che, con le necessarie conoscenze paleontologiche, basate sul concetto dell'evoluzione darwiniana, i geologi del XIX secolo cominciarono a distinguere e a catalogare, cioè a classificare, i gruppi fossili presenti nei vari livelli stratigrafici, correlandoli poi tra loro in tutto il mondo. A poco a poco fu costruita la scala dei temi geologici basata sui fossili (FIG. 1), che era praticamente già terminata alla fine dell'Ottocento. E come noi dividiamo il tempo in secoli, anni, stagioni, mesi e giorni, così i geologi decisero di dividere il tempo geologico in eoni, ere, periodi, epoche, ecc.

2. Il metodo radiometrico e le datazioni assolute

La valutazione quantitativa del tempo geologico, la cosiddetta datazione assoluta, è certamente un'aspirazione molto antica dell'uomo. Già Erodoto (484-424 a.C.) aveva pensato che il delta del Nilo fosse stato costruito dalle piene del fiume e che, siccome ognuna di queste grandi alluvioni aggiungeva solo pochi centimetri all'anno di limo e sabbia, dovevano essere state necessarie diverse migliaia d'anni per costruirlo. Fu però la scoperta della radioattività (1896) che offrì alle Scienze della Terra la possibilità di misurare il tempo geologico con una precisione prima di allora impensabile. Appena nove anni dopo la scoperta della radioattività, Lord Rutherford annunciò (1905) la possibilità di usare il decadimento radioattivo per misurare l'età delle rocce e tre anni dopo fu in grado di attribuire un'età di 500 milioni di anni ad un cristallo di fergusonite (un ossido di ittrio e niobio), in base al suo contenuto di uranio e elio. L'età così determinata viene definita età radiometrica.

Sappiamo dalla fisica che la radioattività naturale consiste nell'emissione di particelle alfa, beta e altre quali positoni, neutrini e antineutrini, e di radiazioni gamma. Orbene, mediante questo processo un elemento genitore (isotopo o nuclide radioattivo) si trasforma in un altro elemento figlio (isotopo radiogenico). Si conoscono isotopi ra-

radioattivi nei quali la disintegrazione, o decadimento, avviene in tempi dell'ordine di miliardi di anni, per altri invece è questione di una frazione di secondo.

La velocità di decadimento è data dal numero di atomi che decadono nell'unità di tempo. Questa velocità non solo è diversa per ogni isotopo radioattivo, ma varia anche per lo stesso isotopo. Infatti, la velocità di trasformazione nel prodotto finale, l'isotopo figlio, decresce nel tempo. Ciò dipende dal fatto che la velocità di decadimento è proporzionale al numero di atomi di isotopo radioattivo presenti nel campione minerale: maggiore è il numero di atomi maggiore è la velocità con cui essi si trasformano negli atomi dell'isotopo figlio. La velocità di decadimento, quindi, diminuisce col tempo, perché diminuisce il numero di atomi radioattivi. Per ogni tipo di isotopo esiste una grandezza costante, utile ad esprimere la velocità di decadimento. Ogni isotopo radioattivo decade in un altro isotopo impiegando sempre lo stesso tempo per dimezzare la propria quantità nel campione in esame. Questo tempo caratteristico è il tempo di dimezzamento e si indica col simbolo $t_{1/2}$. Con il ricorso al tempo di dimezzamento è possibile calcolare facilmente il tempo intercorso dalla formazione del minerale a oggi.

Per capire, in modo semplice, come funziona il metodo della datazione mediante gli isotopi radioattivi, prendiamo ad esempio il funzionamento della clessidra. Se si conosce la velocità con cui la sabbia scende dalla metà superiore a quella inferiore, il rapporto tra la sabbia che sta ancora in alto e quella che è già scesa indica da quanto tempo la clessidra è in funzione (Fig. 3). Il rapporto tra la quantità di isotopo radioattivo e quello dell'isotopo prodotto dal suo decadimento permette di stabilire da quanto tempo l'iniziale isotopo radioattivo emette radiazioni. Ciò equivale a dire che il rapporto tra i due isotopi ci consente di stabilire l'età del minerale o della roccia in cui essi sono contenuti. In pratica, occorre conoscere il rapporto tra le quantità dell'elemento radioattivo originario e dell'elemento finale in cui il primo si trasforma.

FIG. 3. Il decadimento radioattivo può essere paragonato a ciò che avviene in una clessidra. In entrambi i casi una data quantità di materiale originario, "genitore", si trasferisce o si tramuta in un materiale "figlio", la cui quantità può essere misurata separatamente. La differenza fondamentale tra i due processi sta nel fatto che la sabbia della clessidra cade con velocità costante, mentre il decadimento radioattivo procede con velocità esponenziale, come indicato in figura 4.

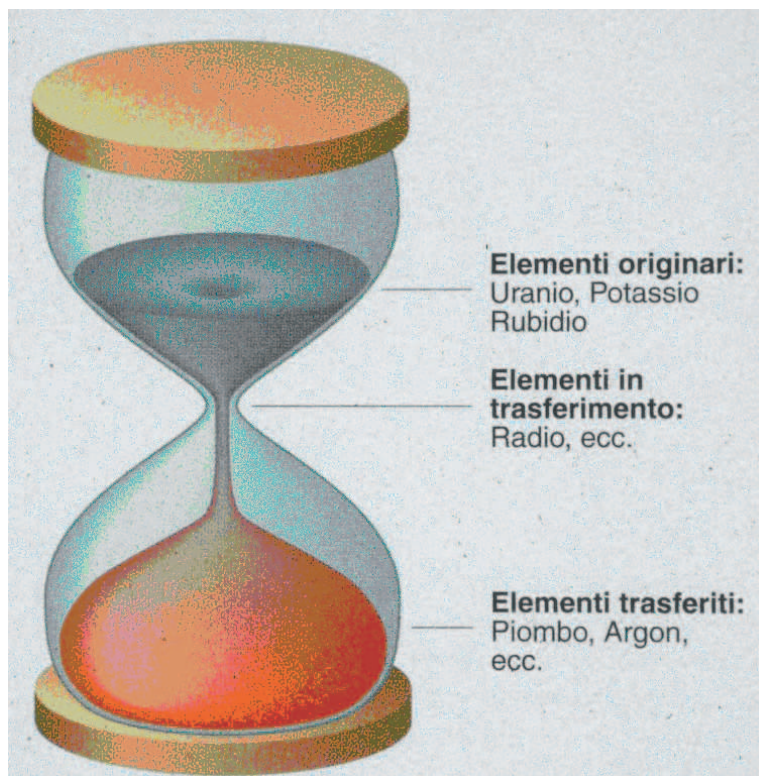
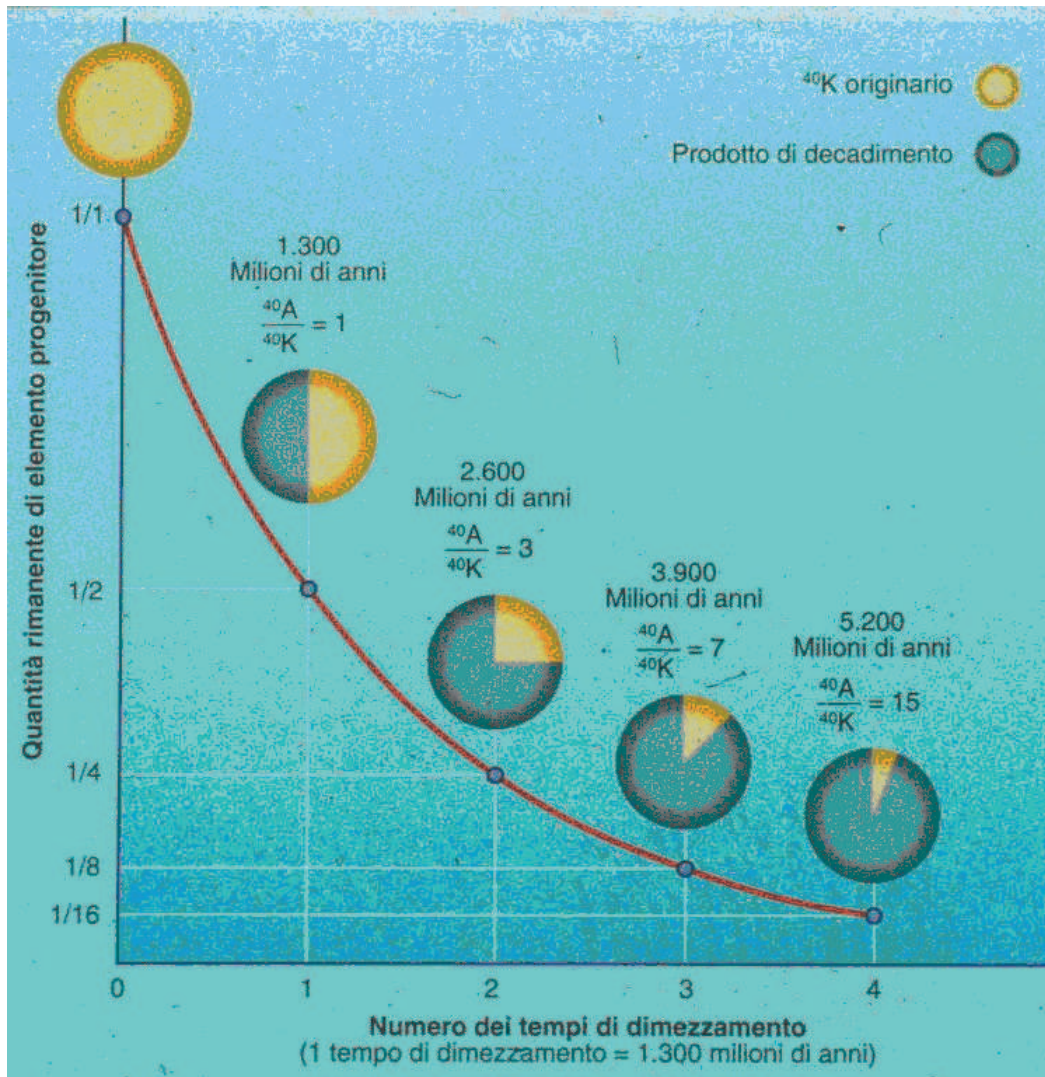


FIG. 4. Curva di decadimento dell'isotopo potassio-40 (^{40}K). Il potassio-40 ha un tempo di dimezzamento di 1300 milioni di anni e si trasforma in argon-40 (^{40}Ar). Se in un campione il rapporto $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ è 1, significa che l'età del campione è di 1300 milioni di anni poiché metà del potassio si è trasformato in argon. Se il rapporto è 3 significa che è trascorso un periodo pari a un altro tempo di dimezzamento e l'età sale a 2600 milioni di anni (2 tempi di dimezzamento), e così via. Al passare di ogni $t_{1/2}$ il rapporto è il doppio più 1 del valore precedente.



I metodi di datazione radiometrica attualmente più usati utilizzano le coppie potassio-argon (K/Ar) (FIG. 4), rubidio-stronzio (Rb/Sr), samario-neodimio (Sm/Nd), uranio-piombo (U/Pb), thorio-piombo (Th/Pb) e il carbonio-14 (^{14}C). Mentre i primi cinque, a causa del lunghissimo tempo di dimezzamento, sono utilizzati per datare minerali e rocce molto antichi, il carbonio-14, che ha un tempo di dimezzamento di soli 5730 anni, può essere usato solo per datare materiali organici quali ossa, legni, carboni degli ultimi 80.000 anni. Questo metodo è

quindi di straordinario interesse per datare gli avvenimenti più recenti del Quaternario, per la preistoria e per l'archeologia. La datazione di una roccia viene eseguita in laboratori altamente specializzati e l'errore, per una roccia con età di alcune centinaia di milioni di anni, è compreso in qualche milione di anni.

Ecco quindi che, accanto a una cronologia relativa, basata sui fossili e indicata con nomi di ere, periodi, epoche, ecc., abbiamo una cronologia "assoluta", espressa in milioni di anni e con un insignificante margine di errore. Tali valori non sono però assoluti nel vero senso della parola; essi vengono continuamente aggiornati, corretti e raffinati, datando con i vari metodi radiometrici migliaia di rocce di tutto il mondo, la cui età relativa è nota con sufficiente precisione.

La formazione del sistema solare e dei pianeti, tra cui la Terra, fu completata circa 4 miliardi e 700 milioni di anni fa. Non c'è alcuna testimonianza diretta di questa età nelle rocce terrestri, ma un campione di roccia della Luna, portato dagli astronauti e denominato Genesis Rock (roccia della genesi), è risultato costituito da particelle minerali aventi questa età. Le datazioni più antiche delle rocce terrestri, trovate in Canada, sono di 4 miliardi e 200 milioni di anni e si ipotizza che la prima materia vivente si sia originata in un mare primordiale circa 3 miliardi e mezzo di anni fa. Tra 3 e 2 miliardi di anni fa comparvero i primi organismi unicellulari (batteri e alghe) (cfr. FIG. 1) mentre si formavano i nuclei dei primi continenti e gli oceani raggiungevano quasi il volume di quelli attuali. È solo negli ultimi 600-700 milioni di anni che si assiste alla rapida comparsa ed evoluzione di molte forme di vita quali oggi le conosciamo. E l'uomo è comparso solo soltanto negli ultimi 2-3 milioni di anni, vale a dire nell'ultimo istante! (FIG. 5).

FIG. 5. Se si riduce la storia della Terra (4 miliardi e 700 milioni di anni) a 12 ore, cioè a un giro di quadrante dell'orologio, le prime cellule viventi sono apparse verso le 3:30, mentre la fotosintesi, responsabile dell'immissione di ossigeno nell'atmosfera, è iniziata verso le 5:00. I protozoi, che si possono considerare i primi animali, compaiono verso le 9:00. Da questo momento i processi evolutivi accelerano i tempi: gli invertebrati compaiono prima delle 11:00, i pesci poco dopo, i mammiferi seguono verso le 11:30. L'uomo, in questa grandiosa e affascinante avventura dell'evoluzione, compare meno di mezzo minuto prima delle 12:00.

