

# Breve storia evolutiva della vita

*a cura di Giancarlo Buccella*



*La storia della scienza naturale può essere riassunta come l'elaborazione di occhi sempre più perfetti entro un cosmo entro il quale c'è sempre qualcosa di più da vedere.*

*(Pierre Teilhard de Chardin).*

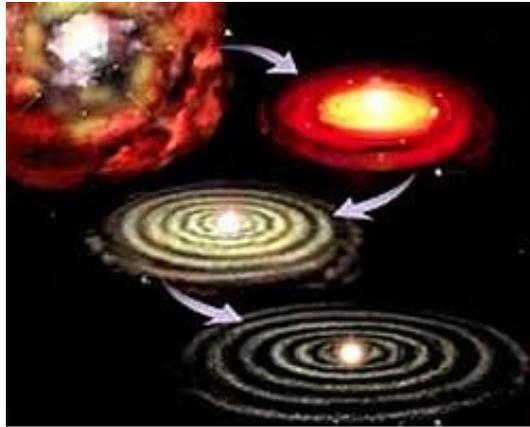
Studiare l'origine e l'evoluzione della vita significa affrontare una delle domande più profonde che l'essere umano si sia mai posto: come può la materia inanimata trasformarsi in materia vivente? Per rispondere, occorre prima chiarire che cosa intendiamo con il termine vita.

Un organismo vivente non si distingue da un corpo inanimato per una sola proprietà, ma per un insieme di caratteristiche che agiscono in modo integrato. Tra le più rilevanti vi sono:

1. la capacità di mantenere una forma definita e relativamente costante una volta raggiunto lo stadio adulto;
2. la presenza di un metabolismo, ovvero l'insieme dei processi chimici che trasformano energia e materia;
3. l'omeostasi, cioè la regolazione dell'ambiente interno nonostante le variazioni esterne;
4. la capacità di movimento e di risposta a stimoli fisici o chimici;
5. l'adattamento evolutivo, che permette agli organismi di sopravvivere in contesti mutevoli;
6. la variabilità genetica, ossia la possibilità di modificarsi nel corso delle generazioni.

Tuttavia, la caratteristica più fondamentale della vita resta la riproduzione: la capacità di generare nuovi individui simili a sé, assicurando la continuità della specie.

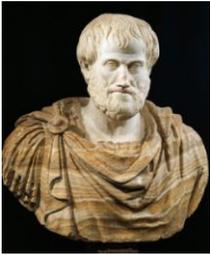
## Il contesto cosmico e geologico



Secondo la teoria del Big Bang, l'universo ha avuto origine circa 14 miliardi di anni fa. Per diversi miliardi di anni dopo quell'evento si sono formate le prime galassie e stelle. Solo successivamente, circa 4,6 miliardi di anni fa, prese forma il nostro Sistema Solare da una nube di gas e polveri arricchita dai resti di stelle precedenti.

La Terra si formò poco dopo, circa 4,5 miliardi di anni fa, attraverso l'aggregazione di materiale cosmico. Le prime centinaia di milioni di anni furono caratterizzate da condizioni estreme: bombardamenti meteorici, intensa attività vulcanica e un'atmosfera primitiva priva di ossigeno, composta inizialmente da due gas molto leggeri (idrogeno ed elio) che poi sarebbero sfuggiti rapidamente nello spazio a causa della loro leggerezza, sostituita così da una seconda atmosfera contenente gas di origine vulcanica, quali ossido di carbonio, anidride carbonica, acido solfidrico, azoto, metano e acido cianidrico, oltre a vapore acqueo.. Col progressivo raffreddamento della Terra, piogge torrenziali avrebbero disciolto nei mari sali e minerali rocciosi.

## Dal mito alla scienza



Aristotele, 2400 anni fa, raccogliendo le idee formulate dai filosofi che lo precedettero, propose che la vita potesse generarsi spontaneamente per l'esistenza di un "principio attivo" insito nella materia non vivente ("principio passivo").

Per secoli, l'origine della vita fu spiegata attraverso miti, intuizioni filosofiche e teorie speculative. I filosofi dell'antica Grecia pensavano che la vita fosse insita nella materia stessa e quando le condizioni erano favorevoli emergeva spontaneamente. Aristotele sintetizzò in una sua teoria tutte le idee relative alla generazione spontanea, dei filosofi che lo avevano preceduto. Secondo il grande filosofo gli esseri viventi nascono da altri organismi simili, ma a volte possono generarsi anche dalla materia inerte.

In ogni cosa, infatti, ci sarebbero un "principio passivo" rappresentato dalla materia e un "principio attivo" rappresentato dalla forma, ovvero una sorte di forza interna che organizza la materia stessa dandole appunto una forma. Ad esempio, il fango è materia inerte che possiede un principio attivo che altro non è che una predisposizione ad organizzare la materia inerte in un essere vivo, come ad esempio un verme o una rana, oppure mosche dalla carne in putrefazione, addirittura oche nate dagli alberi.



Solo con il progresso della scienza sperimentale, tra XVII e XIX secolo, questa ipotesi fu progressivamente confutata grazie ai lavori di Francesco Redi, Lazzaro Spallanzani e soprattutto Louis Pasteur, che dimostrò definitivamente come ogni organismo derivi da altri organismi preesistenti. Da quel momento prevalse il principio di biogenesi: la vita nasce solo dalla vita. Ripercorriamo rapidamente gli eventi cruciali di questo percorso.

La teoria della generazione spontanea fu sostenuta da illustri scienziati come Newton, Cartesio e Bacone e nel 1500 c'era ancora chi credeva che le oche nascessero da alcuni alberi che vivevano in

contatto con l'oceano e che gli agnelli si generassero dentro i meloni. Nel XVII secolo iniziarono i primi esperimenti per provare la teoria della generazione spontanea e un medico Jean Baptiste Van Helmont dichiarò di aver condotto un particolarissimo esperimento: mise, infatti, una camicia sporca a contatto con dei chicchi di frumento e secondo lo scienziato dopo 21 giorni sarebbero nati dei topi. A parere del medico il sudore di cui era impregnata la camicia sarebbe stato il principio attivo grazie al quale la materia inerte si sarebbe trasformata in materia vivente.

La prima vera svolta si ebbe nel XVII secolo con Francesco Redi (1626–1697), medico e naturalista fiorentino. Seguendo il metodo sperimentale promosso da Galileo, Redi decise di verificare in laboratorio la credenza secondo cui le larve di mosca nascessero spontaneamente dalla carne in putrefazione.

Nel 1668 mise pezzi di carne in tre tipi di contenitori: 1) aperti 2) chiusi ermeticamente 3) coperti da una garza sottile che permetteva il passaggio dell'aria ma non delle mosche.

I risultati furono chiari: solo nei vasi aperti si svilupparono larve, originate dalle uova deposte dalle mosche adulte. Nei contenitori chiusi e in quelli coperti da garza non comparve alcuna vita. Redi dimostrò così che anche gli insetti derivavano da genitori della stessa specie, non da processi spontanei.

Nel 1745 il naturalista inglese John Needham inventò nuovi esperimenti per dare prove alla tesi dell'abiogenesi. Egli mise in alcune provette brodo di pollo e infusi di erbe e poi le tappò con della garza. Le provette erano state rese sterili dal calore, ma nonostante questo dopo alcuni giorni si notarono centinaia di organismi viventi all'interno. Questo risultato rafforzò l'ipotesi dell'esistenza della generazione spontanea.

Qualche anno dopo l'abate Lazzaro Spallanzani, non convinto dall'esperimento di Needham, cercò di ripeterlo lasciando scaldare molto più a lungo il liquido nutritivo e a maggiori temperature, fino a farlo bollire per qualche minuto. Chiuse anche ermeticamente le provette e il risultato fu che anche a distanza di molti giorni non si notava alcun microrganismo vivo. Il naturalista Needham, di risposta criticò Spallanzani dicendo che la temperatura a cui era stato sottoposto il liquido nutritivo, era stata troppo elevata e questa aveva ucciso i principi attivi presenti e inoltre la chiusura ermetica delle provette non avrebbe lasciato passare l'aria indispensabile per la vita. Le discussioni continuarono lungo fino a quando intorno alla metà del diciannovesimo secolo, un biologo francese Louis Pasteur, studiò un nuovo esperimento che mise fine alla questione. Pasteur realizzò alcuni contenitori di vetro con un lungo collo ricurvo (chiamati "palloni a collo di cigno"). All'interno di

questi il liquido nutritivo veniva bollito per più di un'ora lasciando che il vapore uscisse attraverso il collo ricurvo del recipiente. Dopo la bollitura, la sostanza all'interno cominciava a raffreddarsi lentamente, mentre l'aria contaminata da microrganismi entrava dall'esterno a causa della depressione conseguente al riscaldamento. Così gli organismi microscopici a contatto con il vapore bollente del liquido all'interno morivano e anche dopo alcuni mesi non si trovava traccia di vita, mentre sul tratto più esterno del collo del recipiente si vedevano polveri e microrganismi entrati dall'esterno. Questo esperimento chiuse definitivamente la questione aperta dai sostenitori dell'abiogenesi, i quali dicevano che la lunga bollitura del liquido nutritivo uccideva il principio attivo. Pasteur invece, dimostrò che una volta rotto il collo ritorto del contenitore, l'aria a contatto con la sostanza avrebbe portato germi e microrganismi all'interno, dopo poco tempo. Inoltre, il recipiente non sigillato consentiva all'aria di entrare, anche se attraverso un collo tortuoso, bloccando le obiezioni di chi sosteneva che il principio attivo aveva bisogno di aria per generare la vita. Queste dunque furono le tre tappe decisive.



*Francesco Redi* (1668): mostrò che le larve non nascevano “dal nulla” nella carne, ma provenivano dalle uova deposte dalle mosche.



*Lazzaro Spallanzani* (1765): fece bollire brodi e li sigillò, mostrando che non compariva vita se l'aria non poteva entrare. Però i suoi esperimenti lasciavano il dubbio: l'aria era necessaria alla vita, o c'era davvero una “forza vitale”?



*Louis Pasteur* (1864): con i famosi flaconi a collo di cigno, dimostrò che i microrganismi non comparivano nei brodi sterilizzati finché la polvere e i germi dell'aria non vi entravano. Questa volta non c'erano più scappatoie: la generazione spontanea era scientificamente smentita.

Quindi solo dalla seconda metà dell'800 la teoria della generazione spontanea che aveva tenuto banco fin da Aristotele, venne considerata definitivamente superata e si aprì la strada alla teoria della biogenesi (la vita nasce solo da altra vita) e alla microbiologia moderna.

[Per inciso ci fu un'altra idea di Aristotele che sopravvisse quasi quanto l'idea della generazione spontanea, quella che la velocità di un corpo dipendesse dalla forza applicata su di esso; ci volle il genio di Galileo Galilei, che dimostrò invece che la velocità di un corpo non dipende dalla forza applicata, ma dall'accelerazione.]

---

## Nota didattica su Aristotele

Per almeno un millennio (soprattutto nel Medioevo), la sua influenza fu enorme. Nel mondo islamico medievale e poi nella scolastica cristiana, Aristotele divenne *“il Filosofo”* per eccellenza. La logica aristotelica era il fondamento del pensiero razionale, la sua fisica e cosmologia erano l'impianto ufficiale fino a Galileo, e la sua metafisica dominava la teologia (Tommaso d'Aquino, per esempio, lo usava come impalcatura per la filosofia cristiana). In questo senso, non è esagerato dire che Aristotele ha influenzato (insieme con Platone) la cultura per oltre un millennio.

---

### La divisione della materia in quattro elementi

- Elementi: terra, acqua, aria, fuoco.
- Concetto chiave: ogni sostanza era una combinazione di questi quattro elementi, ciascuno con proprietà naturali (secco, umido, caldo, freddo).
- Influenza: la chimica medievale e rinascimentale ancora ragionava in questi termini prima della nascita della chimica moderna con Lavoisier.

---

### Il concetto di “luogo naturale” e moto naturale

- Aristotele pensava che gli oggetti si muovessero verso il loro luogo naturale:
  - La terra e l'acqua tendono verso il basso.
  - L'aria e il fuoco tendono verso l'alto.
- Questo spiegava cadute e galleggianti senza la legge di gravitazione universale.
- Rimase dominante fino a Galileo, che introdusse il concetto di moto uniformemente accelerato e la fisica matematica.

---

### Il geocentrismo

- Aristotele, insieme a Tolomeo (che lo elaborò), sosteneva che la Terra fosse ferma al centro dell'universo, con il Sole e gli altri corpi celesti che ruotano attorno ad essa in sfere concentriche.
- Questa visione rimase ortodossa fino a Copernico e Galileo.

---

### La distinzione tra mondo sublunare e mondo celeste

- Subito sotto la Luna: mondo cambiabile, corrotto, soggetto a nascita e morte.
- Oltre la Luna: mondo perfetto e immutabile, composto da etere.
- Questa visione influenzò la cosmologia fino al Rinascimento.

---

### Teleologia

- Aristotele vedeva la natura come guidata da uno scopo intrinseco, tutto ha una “ragione d'essere” o fine.
  - Anche questa idea sopravvisse fino al XVII secolo, specialmente in biologia e filosofia naturale.
-

## Arriva la “zuppa” e “le sorgenti idrotermali”

L'origine della vita sulla Terra rappresenta un evento unico, non essendo possibile sottoporla a esperimenti replicabili per verificare la validità di una teoria, l'approccio scientifico più rigoroso consiste nell'elaborare teorie fondate sulle evidenze osservabili e sui modelli interpretativi disponibili. Ad oggi non abbiamo certezze neanche sull'ambiente fisico-chimico che ha ospitato la comparsa delle prime cellule. Detto ciò vediamo come si è evoluto il pensiero scientifico.

Una volta abbandonata l'ipotesi della generazione spontanea degli organismi viventi, agli inizi del '900 il russo Alexandr I.O. Oparin e, indipendentemente, l'inglese John B.S. Haldane fecero l'ipotesi che nelle fasi iniziali della formazione del nostro pianeta devono essere comparsi aggregati di molecole a base di carbonio, capaci di sintetizzare copie di se stesse cioè in possesso della proprietà fondamentale di un organismo vivente, cioè quella di riprodursi.



La teoria di Oparin sull'origine della vita, nota anche come “Teoria del brodo primordiale”, tenta di descrivere l'evoluzione chimica della vita sulla Terra primordiale, dove l'assenza di ossigeno libero e la presenza di energia (luce solare, scariche elettriche) avrebbero favorito la formazione di molecole organiche da gas inorganici, che si sarebbero poi accumulate nei mari formando un "brodo primordiale". Da questo brodo sarebbero nati i coacervati, sistemi prebiotici che, aggregandosi e riproducendosi, avrebbero dato origine ai primi organismi viventi, anticipando l'evoluzione biologica vera e propria.

La conversione di piccole molecole in grandi molecole molto grandi deve essere stato un processo molto lungo e complesso per le condizioni ambientali estreme della Terra primordiale (dovute alla intensa radiazione ultravioletta e all'alta temperatura), la cui atmosfera probabilmente era simile, come detto sopra, a quella dei gas che ancora oggi fuoriescono dai vulcani: vapore acqueo, idrocarburi semplici come il metano, idrogeno solforato, anidride solforosa, monossido di carbonio e anidride carbonica. Cruciale per il successo di questa teoria è stato l'esperimento di Miller e Urey che nel 1952 mostrò la possibilità che predisponendo un ambiente gassoso simile all'atmosfera primordiale, da molecole inorganiche si formassero molecole organiche (amminoacidi), utilizzando ammoniaca,

acqua e anidride carbonica e metano, investite da scariche elettriche. Negli anni successivi, esperimenti più raffinati hanno prodotto non solo aminoacidi, ma anche nucleotidi, zuccheri e lipidi, elementi fondamentali della vita.

È probabile che la proprietà di autoreplicazione sia comparsa a livello molecolare, cioè di quelle molecole che oggi sono capaci di riprodursi e di trasmettere l'informazione in esse contenuta alle molecole figlie. Tale proprietà è posseduta dalle macromolecole degli acidi nucleici e, secondo recenti esperimenti, anche da certe molecole proteiche. Perché ciò si potesse realizzare, era necessario un complesso meccanismo da poco conosciuto che richiede, nel caso degli acidi nucleici (DNA e RNA), la partecipazione, oltre ai nucleotidi, di una batteria di enzimi (elicasi, topoisomerasi, primasi, polimerasi, ligasi) che innescano una cascata di eventi. Il punto focale, difficile da immaginare, è quello di determinare quali siano state le prime macromolecole comparse per prime, le proteine o gli acidi nucleici. La domanda è legittima in quanto sappiamo che le proteine sono sintetizzate sulla base delle istruzioni fornite dal DNA, il quale a sua volta viene sintetizzato da particolari enzimi che sono proteine. In altri termini, è nato prima l'uovo o la gallina?

Inoltre, ammesso che le prime forme di vita siano rappresentate nel brodo primordiale da molecole capaci di autoriprodursi, oggi la vita non ci appare dispersa nell'ambiente, ma racchiusa all'interno di un involucro: la membrana cellulare, che la separa dal mondo esterno. In altri termini gli organismi viventi hanno una struttura cellulare. Nella cellula avviene un insieme di reazioni chimiche coordinate, mentre quelle che si svolgevano nell'ambiente primitivo erano reazioni casuali e disordinate. Come si è quindi passati dallo stato di dispersione molecolare a quello cellulare? A queste domande non vi è risposta ma solo tentativi di ragionamento scientifico (teorie).

Successivamente alla teoria del "brodo primordiale", due studiosi: il tedesco Günter Wächtershäuser (1988) ed il britannico Michael Russell (1989) indipendentemente, suggerirono un'idea sostanzialmente identica detta "Teoria delle Sorgenti Idrotermali", diversa da quella precedente per il come e dove.



Entrambe le teorie presuppongono: 1. Un ambiente acquoso 2. La presenza di "mattoni" chimici di base. 3. Una fonte di energia per guidare le reazioni chimiche.

## Tabella di Confronto: Brodo Primordiale vs. Sorgenti Idrotermali

Caratteristica Chiave	Teoria del Brodo Primordiale	Teoria delle Sorgenti Idrotermali
Luogo	Pozze d'acqua bassa in superficie, laghi o oceani poco profondi. Un ambiente "orizzontale" e vasto.	Profondità oceaniche, intorno a camini vulcanici sottomarini. Un ambiente "verticale", localizzato e compartimentalizzato.
Fonte di Energia	Esterna: Fulmini, radiazioni ultraviolette (UV) del Sole, calore vulcanico superficiale.	Interna: Energia chimica derivante dai gradienti geochimici. Differenze di pH, temperatura e concentrazione chimica tra l'acqua della sorgente e l'acqua oceanica.
"Ingredienti" Chimici	Provenienti principalmente dall'atmosfera primitiva (metano, ammoniaca, idrogeno) che si sciolgono nell'acqua.	Rilasciati dal mantello terrestre attraverso le sorgenti (idrogeno solforato, idrogeno, metano, ioni metallici).
Problema della Concentrazione	Debolezza principale: Le molecole organiche si formerebbero in un oceano vastissimo, risultando estremamente diluite. È difficile immaginare come possano incontrarsi e reagire. L'ipotesi delle pozze che evaporano tenta di risolvere questo problema.	Punto di forza: Le strutture porose delle rocce intorno alle sorgenti agiscono come minuscoli "laboratori" o "provette" naturali. Le molecole vengono intrappolate e concentrate in questi piccoli spazi, favorendo le reazioni.
Protezione	Molto vulnerabile: La superficie terrestre era bombardata da meteoriti e esposta a intense e distruttive radiazioni UV (non c'era ancora uno strato di ozono).	Ambiente protetto: Le profondità oceaniche offrivano un riparo sicuro sia dagli impatti di meteoriti sia dalle radiazioni UV.
Tipo di Metabolismo Iniziale	Non ben definito, forse basato sulla fermentazione delle molecole organiche disponibili nel "brodo".	Metabolismo chemiosintetico: La vita avrebbe sfruttato fin da subito i gradienti chimici presenti per produrre energia, un processo simile a quello usato ancora oggi da molti microrganismi estremofili.

### Differenza concettuale fra le due teorie

Il *Brodo Primordiale* è come una grande piscina esposta al sole e ai temporali. Gli ingredienti piovono dal cielo (atmosfera) e l'energia viene fornita da eventi casuali e potenti (fulmini, UV). Il problema è che la piscina è enorme e gli ingredienti sono così sparpagliati che è difficile che si incontrino.

Le *Sorgenti Idrotermali* sono come un laboratorio chimico geotermico, complesso e protetto. Gli ingredienti e l'energia vengono forniti in modo continuo e localizzato dal "basso" (interno della Terra). La struttura stessa del laboratorio (le rocce porose) fornisce le condizioni ideali per concentrare i reagenti e far avvenire le reazioni in modo ordinato.

Quindi, sebbene entrambe descrivano la nascita della vita dall'inerte, la teoria delle sorgenti idrotermali risolve due dei più grandi problemi della teoria del brodo primordiale: il problema della diluizione e il problema della protezione, rendendola oggi un'ipotesi molto più robusta e accreditata

nella comunità scientifica.

Essa è la teoria di riferimento attuale, nel senso che sulla sua impalcatura si sono sviluppate diverse linee di indagine dette Teorie Ibride che rappresentano la frontiera attuale.

## Il modello Ibrido

L'idea di fondo delle Teorie Ibride è che la vita non sia nata da un singolo salto netto (prima RNA, prima proteine, prima membrane...), ma da un intreccio progressivo di più componenti, che si sono co-evoluti fino a diventare inseparabili.

Eccone un quadro sintetico.

### 1. Jack Szostak (Premio Nobel):

- Il suo modello ibrido: integra l'ipotesi del Mondo a RNA con la teoria delle protocellule in un ambiente geochimico specifico (pozze superficiali soggette a cicli di evaporazione e reidratazione).
- Come funziona: Szostak non si è limitato a studiare l'RNA da solo. Il suo laboratorio ha dimostrato sperimentalmente che:
  - Semplici acidi grassi (che potevano esistere sulla Terra primordiale) possono formare spontaneamente delle vescicole o membrane (protocellule), creando un ambiente interno protetto.
  - Queste protocellule possono intrappolare molecole di RNA.
  - I cicli di secco-umido (l'acqua in una pozza evapora e poi piove di nuovo) forniscono l'energia per aiutare l'RNA a replicarsi all'interno della protocellula.
  - La crescita della protocellula può portarla a dividersi, distribuendo l'RNA nelle "cellule figlie".
- Questo è un perfetto esempio di teoria ibrida: combina un contenitore (membrana), un sistema genetico (RNA) e un motore ambientale (cicli geochimici).

### 2. John Sutherland:

- Il suo modello ibrido: è un chimico che ha proposto un modello basato su una "chimica dei sistemi" che unisce l'origine dei tre tipi fondamentali di molecole biologiche (acidi nucleici, amminoacidi e lipidi).
- Come funziona: invece di ipotizzare che i "mattoni" della vita si siano formati separatamente per poi assemblarsi, Sutherland ha dimostrato che partendo da ingredienti molto semplici (come l'acido cianidrico) e sotto l'azione della luce UV (tipica del "brodo primordiale" in

superficie), si può innescare una cascata di reazioni che produce **contemporaneamente** i precursori di RNA, proteine e lipidi.

- Questo ibrida l'idea di una chimica superficiale (come nel brodo) con la necessità di creare tutti i componenti necessari per un Mondo a RNA e per le protocellule in un unico luogo e processo coerente.

### 3. Michael Russell e Nick Lane:

- Il loro modello ibrido: hanno potenziato enormemente la Teoria delle Sorgenti Idrotermali integrandola con i principi del metabolismo.
- Come funziona: secondo loro, la vita non è iniziata con una molecola genetica fortunata (come l'RNA), ma con il metabolismo. Le sorgenti idrotermali alcaline forniscono naturalmente un gradiente di protoni attraverso le pareti minerali porose, molto simile a come le nostre cellule oggi generano energia.
- Questo flusso di energia naturale avrebbe alimentato la sintesi di molecole organiche all'interno di queste "protocellule" minerali. Solo in un secondo momento, una volta stabilito un metabolismo robusto, sarebbero emerse molecole genetiche come l'RNA per registrare e replicare le "ricette" di successo.
- Questo modello ibrida la geochimica delle sorgenti con un approccio "Metabolism-First", in opposizione al più classico approccio "Genetics-First" del Mondo a RNA.

Oggi, le teorie ibride hanno un ruolo assolutamente centrale per i seguenti motivi:

1. Superamento dei limiti: le teorie classiche (Brodo, Mondo a RNA, ecc.) si sono rivelate insufficienti se prese singolarmente. Ognuna ha dei punti deboli critici (es. la diluizione nel brodo, l'instabilità dell'RNA in acqua). I modelli ibridi sono il tentativo di risolvere questi problemi combinando i punti di forza di ciascuna ipotesi (es. le sorgenti idrotermali risolvono il problema della concentrazione e dell'energia, mentre i cicli secco-umido di Szostak risolvono il problema della replicazione dell'RNA).
2. Creazione di un Percorso Plausibile: l'obiettivo non è più solo spiegare come si sia formato un amminoacido o una molecola di RNA, ma delineare un percorso graduale e plausibile dalla geochimica alla biochimica. Questo richiede necessariamente di integrare:
  - Una fonte di energia (geochimica).
  - Un meccanismo di compartimentalizzazione (membrane o pori minerali).
  - Un sistema metabolico (per gestire l'energia e costruire molecole).
  - Un sistema genetico (per immagazzinare e trasmettere informazioni).
3. Guida per la Ricerca Sperimentale: i modelli ibridi non sono solo idee, ma generano ipotesi concrete che possono essere testate in laboratorio. I team di Szostak, Sutherland e altri stanno attivamente conducendo esperimenti per ricreare questi passaggi chiave, rendendo l'origine della vita un campo di scienza sperimentale e non più solo di speculazione teorica.

In conclusione, il dibattito scientifico oggi non è più "Brodo Primordiale "sì o no?", ma piuttosto: "Qual è il modello ibrido più corretto? La vita è nata in una sorgente idrotermale alimentando un metabolismo primordiale, o in una pozza superficiale che ha permesso la replicazione dell'RNA all'interno di una protocellula?". Oggi, il dibattito scientifico principale può essere riassunto così:

Scenario A (Ibrido delle Sorgenti): La vita è nata nelle profondità oceaniche, partendo dal metabolismo alimentato dai gradienti chimici delle sorgenti idrotermali, all'interno di protocellule minerali. La genetica (RNA) è arrivata dopo.

Scenario B (Ibrido di Superficie): La vita è nata in pozze d'acqua superficiali, partendo dalla genetica (Mondo a RNA) all'interno di protocellule lipidiche (membrane), con l'energia fornita da cicli di secco-umido e luce UV. Il metabolismo complesso è arrivato dopo.

Per completezza occorre menzionare la teoria della panspermia. L'ipotesi ha le sue origini nelle idee di Anassagora, un filosofo dell'antica Grecia, e si è rivitalizzata a partire dall'Ottocento con Lord Kelvin, con il fisico Hermann von Helmholtz e, nei primi decenni del Novecento, con il chimico e premio Nobel svedese Svante Arrhenius, mentre nell'ultimo quarto del XX secolo il testimone è passato agli astronomi Fred Hoyle e Chandra Wickramasinghe.

Secondo questa idea, "semi della vita" (come microrganismi, spore o molecole organiche complesse) viaggerebbero nell'universo a bordo di comete, asteroidi o polvere interstellare. Una volta giunti su un pianeta con condizioni favorevoli, come la Terra primordiale, questi semi avrebbero potuto attecchire e dare inizio all'evoluzione. La panspermia non risolve il problema dell'origine della vita in sé, ma semplicemente lo sposta in un altro luogo dell'universo, essa pur avendo alcuni sostenitori, non è accettata dalla maggioranza della comunità scientifica.

Ecco un quadro riassuntivo delle tappe più importanti.

Teoria	Idea principale	Punti di forza	Debolezze / criticità	Prove / evidenze
Abiogenesi chimica/ Zuppa primordiale (1924)	Molecole organiche complesse si formano da composti semplici nell'atmosfera primordiale	Spiegazione chimica diretta, supportata da esperimenti di laboratorio	Composizione precisa dell'atmosfera primitiva incerta	Esperimento Miller-Urey (1953) ha prodotto aminoacidi
Abiogenesi chimica/ Sorgenti idrotermali (1988)	Molecole organiche complesse si formano da composti semplici nei fondali oceanici/sorgenti idrotermali	Protezione da radiazioni, ambiente stabile, formazione di protocellule	Difficile riprodurre esattamente in laboratorio	Esperimenti su protocellule in gradienti chimici
Teorie ibride (attuali)	Combinazione di più meccanismi, es. molecole dallo spazio + evoluzione in sorgenti idrotermali	Considera più fattori contemporaneamente	Complessità e mancanza di conferme definitive	Alcuni esperimenti combinano molecole extraterrestri con protocellule

A questo punto dobbiamo menzionare il ruolo che ha la teoria detta “Mondo a RNA” in questo scenario. Essa non è una teoria completa sull'origine della vita, ma come a un'ipotesi su una fase cruciale: la nascita della genetica. Non dice *dove* è successo, ma *cosa* è successo. Essa suggerisce che l'RNA, e non il DNA, sia stata la molecola chiave. L'RNA ha la duplice capacità di immagazzinare informazioni (come il DNA) e di catalizzare reazioni chimiche (come le proteine). Questa versatilità lo rende il candidato ideale per la prima molecola in grado di autoreplicarsi e dare il via all'evoluzione darwiniana.

## L'ipotesi del Mondo a RNA

Negli anni Sessanta, Francis Crick, Leslie Orgel e successivamente Walter Gilbert ipotizzarono che, prima della comparsa del DNA e delle proteine, la vita si basasse quasi esclusivamente sull'RNA. L'idea si fonda su una proprietà unica di questa molecola: a differenza del DNA, l'RNA non è solo un supporto informativo, ma può assumere strutture tridimensionali capaci di svolgere attività catalitiche, comportandosi cioè come enzimi. Questi RNA catalitici sono detti ribozimi e sono stati scoperti negli anni '80 da parte di Thomas Cech e Sidney Altman.

Secondo la teoria, nelle condizioni della Terra primordiale si sarebbero formati spontaneamente nucleotidi, che poi si sarebbero assemblati in polimeri di RNA. Alcune sequenze avrebbero acquisito la capacità di autocatalisi e di replicazione, dando origine a sistemi evolutivi elementari.

## Evidenze a sostegno

Esistono numerosi indizi che rafforzano l'ipotesi del Mondo a RNA:

- Il ribosoma, macchina molecolare essenziale per la sintesi proteica, ha un nucleo catalitico costituito da RNA.
- Diversi cofattori fondamentali (come ATP, NADH, FAD) derivano da nucleotidi, suggerendo un'antica centralità dell'RNA.
- Alcuni virus (come i retrovirus) hanno un genoma a RNA e dimostrano come questa molecola possa sostenere un sistema informativo completo.

## Criticità e sviluppi

Nonostante la sua eleganza, la teoria presenta ancora punti critici. L'RNA è instabile e si degrada facilmente: in quali condizioni avrebbe potuto persistere sulla Terra primordiale? Inoltre, la sintesi spontanea dei nucleotidi e il passaggio dall'RNA al sistema DNA-proteine restano problematici.

Per questo motivo, sono state proposte ipotesi complementari, come un mondo "RNA-peptidi", in cui brevi catene proteiche avrebbero cooperato con l'RNA, o un mondo a lipidi, in cui protocellule primitive avrebbero favorito la stabilità delle molecole.

## Conclusione

Il "Mondo a RNA" rappresenta un'ipotesi centrale nello studio dell'origine della vita. Pur non essendo priva di limiti, offre un modello affascinante e coerente per spiegare come la chimica prebiotica possa aver dato origine a sistemi biologici capaci di evoluzione. La ricerca su questo tema non riguarda solo il passato della Terra, ma anche la possibilità di vita altrove nell'universo, rendendo questa teoria un punto di riferimento per l'astrobiologia contemporanea.

Il Mondo a RNA può essere visto come "Motore" in due Scenari Competitivi

La teoria del Mondo a RNA non è in competizione con la teoria delle sorgenti idrotermali. Piuttosto, la sua plausibilità dipende dall'ambiente in cui la si colloca. Questo ha creato due grandi "partiti" nel mondo scientifico:

## Scenario A: L'Ibrido di Superficie ("Genetica Prima")

In questo modello, la Teoria del Mondo a RNA è il pilastro centrale.

Chi lo sostiene: scienziati come Jack Szostak e John Sutherland.

Come si inserisce: questo scenario è l'habitat naturale per il Mondo a RNA.

1. Luogo: pozze d'acqua calda in superficie, soggette a cicli di evaporazione e pioggia.
2. Ingredienti: I "mattoni" dell'RNA (nucleotidi) si formano grazie all'energia della luce UV e a reazioni chimiche complesse (come dimostrato da Sutherland).
3. Il ruolo chiave dell'ambiente: i cicli secco-umido sono fondamentali. Quando la pozza si prosciuga, le molecole si concentrano e questo aiuta i nucleotidi a legarsi tra loro (polimerizzazione) per formare catene di RNA. Quando la pozza si riempie di nuovo, queste catene di RNA possono muoversi, ripiegarsi e agire come catalizzatori (ribozimi).
4. Ordine degli eventi: in questo modello, la genetica viene prima. Si forma una molecola di RNA capace di replicarsi (magari all'interno di una gocciolina di grasso, una protocellula) e solo dopo questa "protocellula a RNA" sviluppa un metabolismo più complesso.

In sintesi: La teoria ibrida di superficie è essenzialmente una versione moderna e molto più dettagliata del "brodo primordiale", costruita appositamente per essere l'incubatrice perfetta per un Mondo a RNA.

---

## Scenario B: L'Ibrido delle Sorgenti Idrotermali ("Metabolismo Prima")

In questo modello, il Mondo a RNA non è il punto di partenza, ma un risultato successivo.

- Chi lo sostiene: scienziati come Michael Russell e Nick Lane.
- Come si inserisce: Questo scenario è più problematico per un Mondo a RNA *iniziale*.
  1. Luogo: profondità oceaniche, nelle cavità porose delle sorgenti idrotermali alcaline.
  2. Il problema con l'RNA: L'RNA è una molecola notoriamente fragile e instabile in acqua, specialmente se calda. È molto difficile che si formi e si accumuli in un ambiente acquatico costante come una sorgente sottomarina.
  3. La soluzione: invertire l'ordine! Invece della genetica, qui il metabolismo viene prima. I gradienti chimici naturali della sorgente forniscono l'energia per alimentare un ciclo di reazioni chimiche auto-sostenute sulle superfici minerali. Questa è una "protovita" metabolica, senza geni.
  4. Il ruolo successivo dell'RNA: solo dopo che questo sistema metabolico è diventato stabile e robusto, sarebbe emersa la necessità di "registrare" e trasmettere le ricette chimiche di successo. A questo punto, il sistema avrebbe "inventato" molecole come l'RNA per immagazzinare queste informazioni. L'RNA, quindi, non è il motore di partenza, ma un aggiornamento cruciale sviluppato da una vita già esistente e basata sul metabolismo.

---

## Quadro Riassuntivo del Ruolo del Mondo a RNA

	<b>Scenario Ibrido di Superficie (Genetica Prima)</b>	<b>Scenario Ibrido delle Sorgenti Idrotermali (Metabolismo Prima)</b>
<b>Ruolo del Mondo a RNA</b>	È il punto di partenza. È il motore primordiale della vita.	È un prodotto evolutivo successivo. È il "software" inventato da un "hardware" metabolico già funzionante.
<b>Punto di Forza</b>	Ha un forte supporto sperimentale (Szostak, Sutherland) sulla plausibilità della chimica prebiotica e della replicazione dell'RNA in queste condizioni.	Risolve meglio il problema fondamentale dell'energia (sfruttando gradienti geochimici) e della concentrazione (usando pori minerali).
<b>Punto Debole</b>	L'origine dell'energia per sostenere il sistema nel lungo periodo è meno chiara rispetto alle sorgenti. L'ambiente è più instabile.	La transizione da un sistema puramente metabolico a uno con genetica è un "salto" teorico enorme e difficile da dimostrare.

---



Concludendo possiamo affermare che finora si sono elaborate diverse ipotesi ma, sostanzialmente, alla domanda fondamentale circa l'origine della vita non vi è risposta: non sappiamo (ancora?!) come sia stato possibile che dalle molecole inorganiche sia comparsa la vita. Tutto quello che la scienza è riuscita a fare sinora è mostrare plausibilmente che nelle condizioni ambientali primordiali sia stato possibile il passaggio da molecole inorganiche a quelle organiche. Tra l'altro tutto questo sforzo scientifico è stato reso quasi inutile dall'aver constatato che in molti meteoriti si sono trovate molecole organiche. E' come se la natura ci dicesse: "Siete come chi, cercando affannosamente un oggetto in una stanza, alla fine si accorge che esso era sempre stato lì. Così voi, con i vostri esperimenti, avete intuito la via dall'inorganico all'organico; io ve la mostro compiuta." Volendo essere cinici e spietati, si potrebbe dire: "tanto lavoro per nulla". Ma ovviamente questa affermazione è falsa perché in queste ricerche, il processo conoscitivo si è arricchito di tanti dettagli. Il passo successivo è stato quello di fare esperimenti volti a capire se queste molecole organiche "vaganti" potevano ad un certo punto, in certe condizioni, auto-assemblarsi. L'esito di tali ricerche è stato positivo. Infatti è stato ampiamente dimostrato che le molecole organiche possiedono la capacità intrinseca di auto-organizzarsi in strutture più complesse e ordinate, (vescicole, protocellule, catene di RNA, ecc.), ma nessuna di queste è ancora "vita".



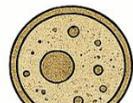
Essenzialmente non sappiamo come dai mattoni si sia potuto costruire la casa. Sebbene la scienza abbia dimostrato in modo convincente come possano essersi formati i 'mattoni' fondamentali della vita (le molecole organiche) il meccanismo esatto che ha portato questi componenti ad assemblarsi in un sistema integrato e auto-replicante, ovvero la prima 'casa' cellulare, rimane una questione aperta. Abbiamo trovato le lettere sparse dell'alfabeto della vita, ma non sappiamo ancora come siano state composte per scrivere la prima straordinaria parola. Il grande mistero non risiede tanto nell'esistenza dei singoli 'mattoni', quanto nella scintilla organizzativa che li ha uniti per erigere la cattedrale della vita.

Inoltre non sappiamo tante cose “al contorno”.

- ❖ Non sappiamo quale sia stata la prima forma di vita: una cellula primitiva? Un sistema autoreplicante di RNA? Qualcosa che non assomiglia a nulla di ciò che oggi consideriamo “vivente”?
- ❖ Non sappiamo se la vita sia comparsa una sola volta o in più occasioni, con una sola linea che è sopravvissuta.
- ❖ Non sappiamo neanche se le prime forme di vita fossero già cellulari o qualcosa di più “sfumato”, al confine tra chimica e biologia.

Sebbene la scienza abbia dimostrato in modo convincente come possano essersi formati i “mattoni” fondamentali della vita—le molecole organiche—il meccanismo esatto che ha portato questi componenti ad assemblarsi in un sistema integrato e auto-replicante, ovvero la prima “casa” cellulare, rimane una questione aperta.

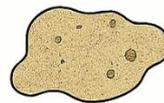
- Non sappiamo quale sia stata la prima forma di vita:



un primifone  
cell

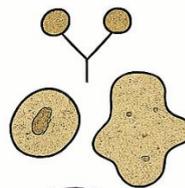


un sistema  
autoreplicante  
di RNA?

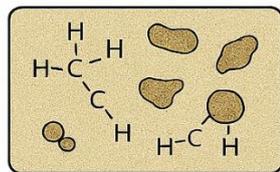


qualcosa che non  
assomiglia a nulla  
di ciò che oggi

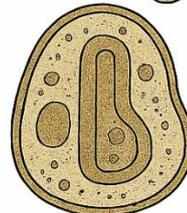
- Non sappiamo se la vita sia comparsa una sola volta o in più occasioni, con una sola linea che è sopravvissuta.



- Non sappiamo neanche se le prime forme di vita fossero già cellulari o qualcosa di più “sfumato”, al confine tra chimica e biologia.



Abbiamo i mattoni



Non la casa

In conclusione: abbiamo la certezza scientifica che nell’ambiente primordiale terrestre era possibile trovare molecole organiche e che queste potevano essere auto-organizzate: null’altro di certo.

Il passaggio dalla materia inanimata a quella animata rappresenta un salto pieno di mistero, un confine insondabile che ancora oggi sfida la nostra comprensione e mette in luce quanto fragile e meravigliosa sia l’origine della vita.

## Considerazione metafisica

*“Non esiste materia in sé. Tutta la materia ha origine ed esiste solo in virtù di una forza... Dobbiamo supporre l'esistenza di uno spirito cosciente e intelligente dietro questa forza.” (Max Planck)*

*È innegabile che il passaggio dal regno minerale a quello animale rappresenti una transizione di straordinaria complessità, che sfida la nostra comprensione e rende difficile immaginare che sia avvenuta “solo” attraverso processi naturali. La comparsa di strutture viventi capaci di autoregolazione, replicazione e adattamento, a partire da materia inorganica priva di intenzionalità, solleva interrogativi profondi sulle dinamiche che hanno guidato tale evoluzione. Questo salto qualitativo — da semplice chimica a biologia — sembra quasi richiedere una convergenza improbabile di condizioni, eventi e proprietà emergenti.*

*La straordinaria finezza con cui le leggi chimiche e fisiche sembrano calibrate per permettere l'esistenza di strutture complesse, la sorprendente capacità dell'RNA di auto-organizzarsi e replicarsi, e la coerenza interna dei processi evolutivi, suggeriscono una regia che va oltre il caso cieco. Non si tratta di negare la validità dei meccanismi naturali, ma di riconoscere che la loro efficacia e direzionalità sembrano rispondere a un principio ordinatore che la sola casualità non riesce a spiegare pienamente.*

*Di fronte a tale mistero, la mente razionale si trova quasi “obbligata” a contemplare l'ipotesi che un Ente ordinatore — una causa intelligente, una mente primordiale — abbia guidato, o almeno predisposto, le condizioni affinché la vita potesse emergere.*

## Dal Non-Vivente al Vivente: un processo, non un salto

### Le prime tappe dell'evoluzione della vita

Nella visione scientifica attuale la transizione dall'inanimato all'animato non è vista come un interruttore che si accende, bensì come un continuum di complessità crescente, dove ogni passo è piccolo, plausibile e guidato dalla selezione naturale.

- ❖ Inanimato: Una roccia, una molecola di acqua. Non hanno informazione, non si replicano, non evolvono.
- ❖ Zona Grigia (Chimica Prebiotica): Un amminoacido, un nucleotide. Blocchi costruttivi.
- ❖ Inizio del Processo (Ribozima): Una molecola che contiene informazione (la sua sequenza) e agisce in base a essa (la sua funzione catalitica) per perpetuare sé stessa. Questo è il primo, rudimentale anello che unisce informazione e azione, il cuore della definizione di vita.
- ❖ Proto-Vita (Protocellula): Quel ribozima viene incapsulato. Ora esiste un'unità individuale che compete con altre unità. La selezione diventa ancora più potente.
- ❖ Vita: Il sistema diventa sempre più complesso, sviluppa un metabolismo, un codice genetico più stabile (DNA), ecc.

La scienza affronta questo apparente "salto" non negandone la grandezza, ma proponendo che non sia un salto, bensì una scalinata con migliaia di gradini bassissimi, percorsa in un grande intervallo temporale (centinaia di milioni di anni). Quello che a noi oggi appare come un abisso invalicabile è il risultato del fatto che non vediamo più i gradini intermedi, perché sono stati erosi dal tempo e superati da forme di vita più efficienti.

Il gradualismo contro il salto: il modello scientifico non postula che una cellula complessa sia apparsa all'improvviso. Postula che un ribozima capace di una debolissima auto-replicazione fosse solo il primo gradino. Da lì, la selezione naturale ha agito come un meccanismo che, passo dopo passo, ha favorito la comparsa di sistemi leggermente più stabili, leggermente più efficienti: membrane migliori, un metabolismo rudimentale, la transizione al DNA (più stabile), ecc.

## Una prospettiva moderna

Charles Darwin ha rivoluzionato la nostra comprensione della vita sulla Terra, ma il suo contributo diretto alla teoria dell'origine della vita è più sfumato di quanto comunemente si pensi e si concentra principalmente su come la vita si è evoluta *dopo* la sua comparsa.

La sua opera fondamentale, "L'origine delle specie", pubblicata nel 1859, non affronta direttamente la questione di come la vita sia nata per la prima volta. Invece, il libro espone la teoria dell'evoluzione per selezione naturale, secondo cui le specie viventi discendono da un antenato comune e si diversificano nel tempo attraverso un processo graduale. I punti cardine della sua teoria sono:

- **Discendenza comune:** Tutti gli organismi, uomo compreso, hanno avuto origine nel tempo da forme di vita più antiche.
- **Selezione naturale:** In una lotta costante per l'esistenza, gli individui con caratteristiche ereditarie più adatte all'ambiente hanno maggiori probabilità di sopravvivere, riprodursi e trasmettere quei tratti vantaggiosi alla prole. Questo processo porta all'adattamento delle specie al loro ambiente.
- **Variabilità dei caratteri:** All'interno di una popolazione esiste una naturale variazione delle caratteristiche individuali, e alcune di queste differenze sono ereditabili.

Le scoperte della biologia evolutiva e della genetica hanno permesso di compiere un ulteriore passo avanti. La teoria darwiniana dell'evoluzione per selezione naturale suggerisce che la vita sia comparsa una sola volta e che tutti gli esseri viventi attuali discendano da un antenato comune universale (LUCA), una forma semplice ma già dotata di un patrimonio genetico ereditabile. Questa ipotesi è stata confermata dallo studio dei genomi, che rivelano una sorprendente unità biologica alla base della diversità del vivente. L'indagine scientifica sull'origine della vita si concentra oggi su due domande fondamentali:

Come si sono formate le prime molecole capaci di autoreplicarsi e di evolvere?

In quali condizioni della Terra primordiale ciò è stato possibile?

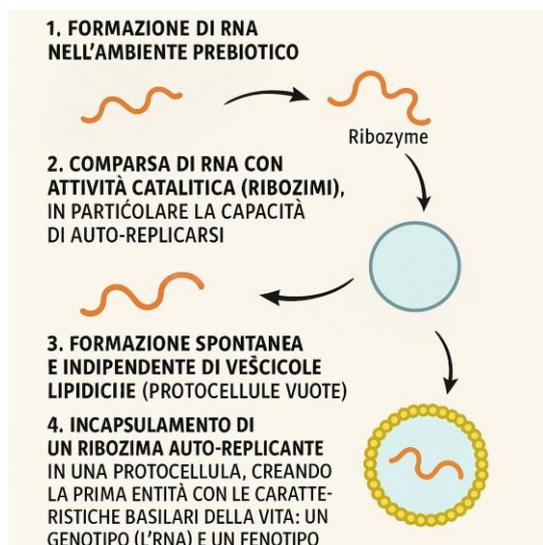
Queste domande segnano il punto di partenza di un viaggio affascinante, che attraversa chimica, biologia, geologia, astronomia e filosofia, e che ci accompagna dalle profondità dell'universo fino alla comparsa della vita sul nostro pianeta.

La natura non agisce "da sola" in senso caotico: la natura agisce secondo leggi. La selezione naturale è una legge, un algoritmo. Non è un evento stocastico, ma un processo deterministico che agisce sulla variazione stocastica. Il "caso" genera le opzioni (le mutazioni), ma la selezione "sceglie" in modo del tutto non-casuale quale opzione sopravviverà e si riprodurrà.

L'ipotesi oggi dominante sulla nascita della vita è la seguente:

1. Formazione di RNA nell'ambiente prebiotico.
2. "Comparsa" di RNA con attività catalitica (ribozimi), in particolare la capacità di auto-replicarsi.
3. Formazione spontanea e indipendente di vescicole lipidiche (proteocellule vuote).
4. Incapsulamento di un ribozima auto-replicante in una proteocellula, creando la prima entità con le caratteristiche basilari della vita: un genotipo (l'RNA) e un fenotipo (l'intera proteocellula che, grazie al suo contenuto, può crescere e dividersi).

E' importante ribadire ancora una volta che i primi tre punti rappresentano traguardi che hanno una solida base di verifica sperimentale, mentre il quarto punto che descrive l'integrazione di questi passaggi non è verificarlo sperimentalmente.



Definizione di ribozimi: molecole di acido ribonucleico (RNA) dotate di attività catalitica, in grado cioè di accelerare reazioni chimiche in modo simile agli enzimi proteici.

L'esistenza dei ribozimi dimostra che l'RNA può effettivamente svolgere entrambe le funzioni, risolvendo il classico paradosso "uovo e gallina" su cosa sia venuto prima, il DNA (che conserva le informazioni per produrre le proteine) o le proteine (che sono necessarie per replicare il DNA).

In un ambiente prebiotico, come il cosiddetto "brodo primordiale" (pozze d'acqua calda, argille, sorgenti idrotermali), le condizioni chimico-fisiche avrebbero favorito la formazione spontanea di monomeri (come i nucleotidi) e la loro successiva polimerizzazione in catene di RNA.



L'RNA come punto di partenza: tra le varie molecole, l'RNA è l'unico candidato in grado di fare due cose fondamentali:

1. Immagazzinare informazione (la sequenza).
2. Svolgere un'azione (l'attività catalitica del ribozima).

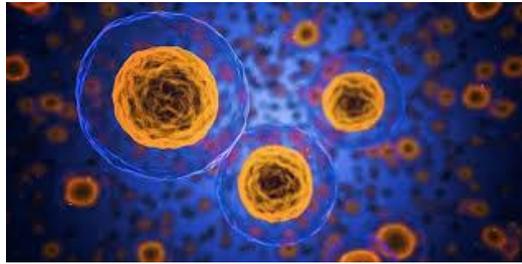
Evoluzione chimica: In questo "mondo a RNA", diverse sequenze di RNA sarebbero nate per caso. Alcune di queste, per puro accidente, avrebbero avuto la capacità di catalizzare la propria replicazione (auto-replicazione). Queste molecole avrebbero iniziato a moltiplicarsi, evolvendo attraverso errori di copia e selezionando le versioni più stabili ed efficienti.

In questa fase, non c'erano ancora cellule. Si trattava di molecole "nude" che competevano nell'ambiente.

Parallelamente, molecole anfifiliche come i lipidi, anch'esse presenti nell'ambiente prebiotico, si sarebbero aggregate spontaneamente in acqua per formare micelle e vescicole, ovvero le prime protocellule. Queste erano semplici "bolle" vuote dette vescicole.



## Da vescicola a protocellula



La transizione da vescicola a protocellula si può pensare essere avvenuta nel seguente modo:

- Una molecola replicante (come un ribozima) viene incapsulata all'interno della vescicola
- La vescicola diventa una protocellula: una struttura con genotipo (RNA) e fenotipo (la membrana e il comportamento della vescicola)

Essa sarà in grado di crescere assorbendo lipidi dall'ambiente. di dividersi, trasmettendo il contenuto genetico e di evolversi.

## Dalla protocellula a LUCA (Last Universal Common Ancestor)

Consideriamo il ribosoma, esso è una sorta di “fabbrica di proteine” presente in tutte le cellule viventi, ed è composto da RNA e proteine. La sua importanza per l'origine della vita è legata a un concetto chiave: l'RNA non è solo un messaggero, può anche avere attività catalitica. Questo porta all'idea dell'“RNA world”.



Si è scoperto nei primi anni 2000, grazie alla cristallografia a raggi X, che questo organello cellulare si è evoluto aggiungendo sempre nuove sovrastrutture a un nucleo principale che si è mantenuto inalterato nel tempo, dai batteri fino all'uomo.

Lo ha stabilito la più dettagliata analisi mai effettuata sui ribosomi, responsabili della sintesi delle proteine necessarie alla vita.

L'origine e l'evoluzione del ribosoma, uno degli organelli fondamentali delle cellule, è stato ricostruito con un dettaglio senza precedenti grazie a uno studio di Loren Williams e colleghi del Georgia Institute of Technology. Secondo quanto scoperto, nel caso del ribosoma l'evoluzione procede per sovrapposizione, aggiungendo nuove sovrastrutture a un nucleo che è rimasto inalterato, dagli organismi più semplici all'essere umano.

Si ricordi che nelle cellule, l'informazione genetica è conservata in massima parte nel DNA che si trova nel nucleo. Al momento della replicazione cellulare, l'informazione viene trascritta grazie all'RNA messaggero (mRNA), che si lega alla molecola di DNA come a uno stampo. L'mRNA poi esce dal nucleo e trasferisce l'informazione ai ribosomi, dove avviene il processo di traduzione e la sintesi delle proteine essenziali per la vita.

Quello che si è notato è che la struttura fondamentale del ribosoma si è fortemente conservata durante l'evoluzione, al punto che quella del nucleo essenziale è sostanzialmente la stessa in tutti gli esseri viventi, dai lieviti all'uomo. Su questa base comune, il ribosoma è evoluto diventando sempre più complesso via via che gli organismi stessi sono diventati più complessi. E nell'essere umano raggiunge il massimo della complessità. Ma i cambiamenti riguardano le parti più superficiali: la parte più interna è essenzialmente la stessa che in un batterio.

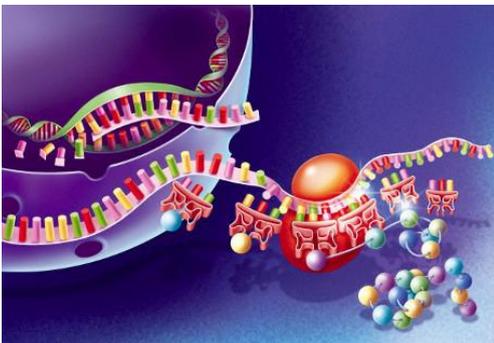


Illustrazione del processo di traduzione dell'informazione genetica contenuta nel DNA (*a sinistra*) in proteine all'interno del ribosoma (*a destra, in arancione*).

Le analisi hanno evidenziato che le strutture evolutivamente più recenti si sono integrate all'interno di quelle più antiche, rimaste sostanzialmente inalterate, analogamente a rami che si dipartono dal tronco di un albero.

L'evoluzione procede cambiando la struttura del ribosoma ma lasciando inalterato ciò che è già presente, e cioè il suo nucleo.

Queste ricerche indicano con forte evidenza che all'inizio della vita ci sia stato un unico organello, detto LUCA

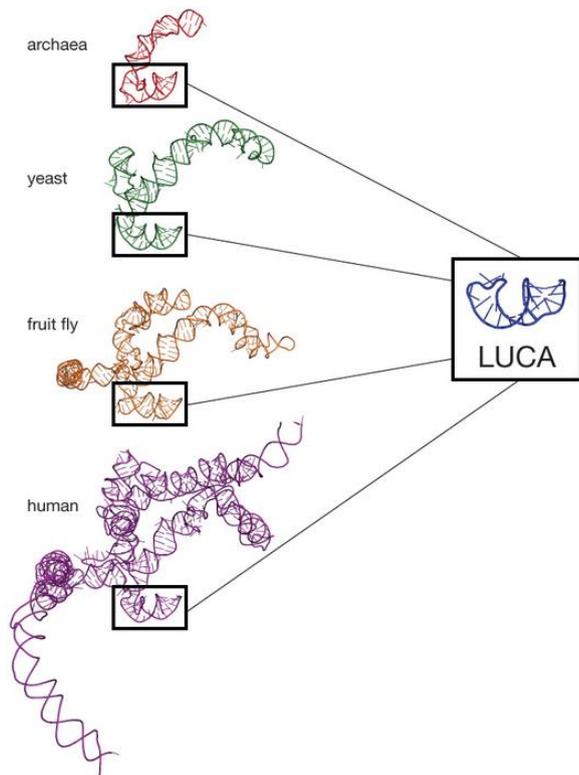


Illustrazione del processo evolutivo dei ribosomi dei diversi organismi viventi, dagli Archea all'essere umano.

## Cos'è LUCA

LUCA sta per Last Universal Common Ancestor (“Ultimo antenato comune universale”).

Non è il “primo essere vivente” assoluto, ma l’antenato da cui discendono tutte le forme di vita attuali: batteri, archea e eucarioti.

Batteri, Archaea ed Eucarioti sono i tre principali domini della vita sulla Terra, con differenze fondamentali che li distinguono. I Batteri e gli Archaea sono organismi procarioti (privi di un nucleo definito), mentre gli Eucarioti possiedono un nucleo e organelli interni.

Visse probabilmente tra 3,5 e 4 miliardi di anni fa.

Le prove della sua esistenza sono quindi indirette, ma estremamente convincenti, e provengono principalmente dalla biochimica comparata e dalla genetica. Vediamole.

## Il Codice Genetico Universale

Questa è forse la prova più forte. Tutti gli organismi viventi, da un batterio a una balena, usano lo stesso "manuale di istruzioni" genetico. Il DNA è composto da quattro basi (A, T, C, G) che vengono lette a gruppi di tre (i "codoni"). Ogni codone specifica un particolare amminoacido da aggiungere a una proteina. Con pochissime e minori eccezioni, il codone "GCU" codifica per l'amminoacido Alanina in te, in un albero e in un batterio. Questa universalità del codice è una "reliquia" di un antenato comune; se la vita fosse emersa più

volte in modo indipendente, ci aspetteremmo di trovare codici genetici completamente diversi.

## 1. Biochimica Fondamentale Condivisa

Tutti gli esseri viventi condividono alcuni mattoni e meccanismi biochimici fondamentali:

**Stessi Amminoacidi:** La vita utilizza un set di circa 20 amminoacidi per costruire le proteine. È significativo che usi solo la loro forma "sinistrorsa" (L-isomeri), e non la loro immagine speculare "destrorsa" (D-isomeri), che pure esiste in natura. Questa specificità (omochiralità) suggerisce una singola origine.

**ATP come "Moneta" Energetica:** Tutte le cellule utilizzano la molecola di Adenosina Trifosfato (ATP) come principale fonte di energia per le loro reazioni chimiche.

**Il Dogma Centrale della Biologia:** Il flusso dell'informazione genetica dal DNA all'RNA (trascrizione) e dall'RNA alle proteine (traduzione) è un meccanismo universale.

**Ribosomi:** Tutti gli organismi usano i ribosomi, macchinari cellulari composti da RNA e proteine, per sintetizzare le proteine. La loro struttura di base è conservata in tutti i regni della vita.

## 3. La Struttura Cellulare di Base

Tutti gli organismi viventi sono costituiti da cellule delimitate da una membrana lipidica che separa l'interno dall'ambiente esterno, regolando il passaggio di sostanze.

## 4. Le Prove dalla Filogenetica

Analizzando le sequenze genetiche dei geni che sono essenziali e presenti in tutti gli organismi (come quelli che codificano per l'RNA ribosomiale), i biologi possono costruire "alberi della vita" o alberi filogenetici. Questi alberi mostrano le relazioni evolutive tra le specie. Indipendentemente dai geni utilizzati, tutti questi alberi riconducono a un unico punto di origine, un unico tronco: LUCA.

---

### Caratteristiche ipotizzate

Gli studi genomici e biochimici permettono di fare alcune deduzioni:

Probabilmente era unicellulare.

Aveva RNA e DNA, con sistema genetico e ribosomi per sintetizzare proteine.

Metabolismo anaerobico (non usava ossigeno, che era scarso nell'atmosfera primordiale).

Probabilmente viveva in ambienti ricchi di minerali e calore, come sorgenti idrotermali sottomarine.

---

## Perché LUCA è importante

LUCA ci aiuta a capire quali caratteristiche biologiche siano fondamentali e condivise da tutte le forme di vita.

Funziona come un “punto di riferimento” per studiare l’evoluzione dei geni, dei metabolismi e delle strutture cellulari.

Lo studio di LUCA supporta teorie sull’abiogenesi e sulle condizioni ambientali della Terra primitiva.

### Evoluzione dalle Molecole Organiche alle Prime Cellule



L’evoluzione che ha portato dapprima alla comparsa della cellula procariotica, cioè della cellula contenente DNA disperso nel citoplasma, e poi alla cellula eucariotica, il cui DNA è racchiuso nella membrana nucleare, è durata circa due o forse tre miliardi di anni. Molto più rapido è stato il passaggio dagli organismi unicellulari ai pluricellulari vegetali e animali. Infatti i primi fossili di organismi pluricellulari compaiono già abbondanti circa 600 milioni di anni fa con una “staffetta” della massima complessità che va, nel caso degli animali, dagli invertebrati ai vertebrati marini, agli anfibi, ai rettili, ai mammiferi, all’uomo.

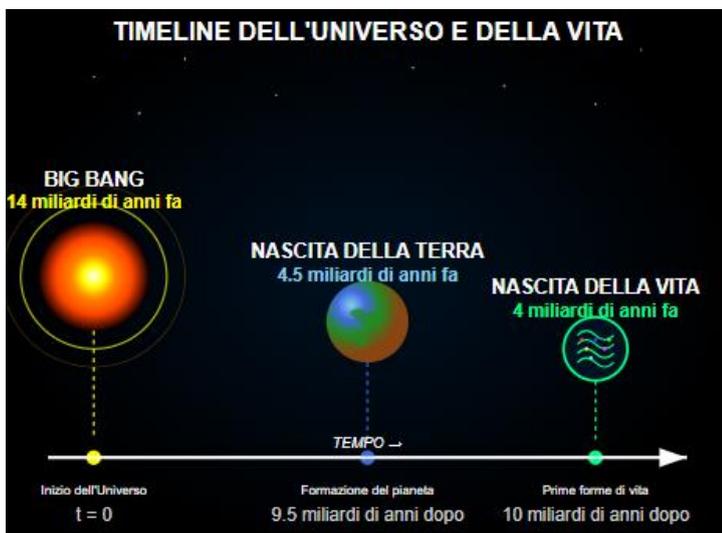
A questo punto LUCA si evolve dando inizio al meraviglioso mondo della vita.

## Lo sviluppo della vita



Avventuriamoci ora nella storia di come è avvenuta l'evoluzione della vita sulla Terra? Siamo abituati sempre a pensare al piccolo anfibio che muove i primi passi sulla terra ferma come principale esempio di evoluzione. Prima di arrivare agli eucarioti pluricellulari non sessili, cioè che non sono fissi ad un substrato, l'evoluzione è però passata per innumerevoli stadi biologici, dai primi procarioti unicellulari, fino ad oggi.

Partiamo dalla seguente illustrazione che ci permette di visualizzare tre date importanti.



Partiamo dall'assunto che le prime forme di vita siano comparse sulla Terra tra i 3.5 e 4 miliardi di anni fa. Il nostro pianeta si è formato, come detto, circa 4.5 miliardi di anni fa; tuttavia, le rocce più antiche risalgono a poco meno di 4 miliardi di anni fa. I sedimenti di Isua in Groenlandia hanno 3.8 miliardi di anni, i sedimenti di Akilia sempre in Groenlandia possiedono 3.85 miliardi di anni ed i sedimenti di Pilbara in Australia si stima abbiano tra i 3.5 ed i 3.4 miliardi di anni.



Nella zona del *Greenstone Belt* di Nuvvagittuq in Canada, che si è ritrovata nel 2008 quella che, al momento, sembra essere la più antica roccia terrestre, formata 4,28 miliardi di anni fa.

I primi organismi sono quindi comparsi presumibilmente intorno ai 3.5 e 4 miliardi di anni fa. Le prime tracce indirette della vita sono infatti state ritrovate sulle rocce di Isua e testimoniano la presenza di elementi chimici che sono stati modificati da possibili forme di vita.

Oggi si pensa che i primi organismi vivessero sul fondo di bassi mari caldi nutrendosi di sostanza organica di origine abiotica e direttamente disciolta nel mezzo acquoso. Non sono quindi autotrofi come si potrebbe pensare, ma in un certo modo eterotrofi per sali e composti chimici semplici.

Le più antiche forme di vita descritte sono presumibilmente batteri filamentosi o sferoidali che sono stati ritrovati come fossili nelle formazioni di Pilbara ed in alcune rocce Sud Africane risalenti a circa 3.5 miliardi di anni fa. I primi presunti fossili di monera sono stati ritrovati sempre a Pilbara. Gli esempi migliori di primi organismi risalgono però a 3.5 miliardi di anni fa e si riferiscono alle stromatoliti, ossia delle formazioni fossili costituite da lamine di ossido di silicio impilate create da cianobatteri fotosintetico.



Stromatoliti (Shark Bay, Australia Occidentale)

Secondo alcuni studi di paleomicrobiologia si è scoperta la presenza di alcune catene carboniose derivate probabilmente dalla demolizione ossidativa della clorofilla. Questi organismi presenti in un'epoca così aspra sono stati con una buona probabilità fotosintetizzanti aerobi immettitori di ossigeno e zolfo nell'ambiente.

La comparsa dei primi autotrofi deriva probabilmente dalla crisi dei primi eterotrofi i quali possedevano una richiesta metabolica decisamente superiore rispetto all'offerta di sostanza organica di origine abiotica. Come sono state quindi le prime cellule? Erano procarioti molto semplici in grado di sopravvivere a contatto con un ambiente che oggi probabilmente non permetterebbe la vita di quasi nulla sulla Terra. L'atmosfera era costituita da gas rilasciati dal raffreddamento dei magmi ed era quindi composta da acqua per il 70-95%, anidride carbonica per il 4% e la restante parte divisa in anidride solforosa, zolfo elementare, ammoniaca, acido solfidrico, etc. Ricorda quasi Venere. L'atmosfera primordiale era senza ombra di dubbio riducente. La fotosintesi al contrario di come avviene oggi era condotta a partire da acido solfidrico come donatore di elettroni.

### Evoluzione dalla Prima Cellula agli Organismi Pluricellulari



## Eoni, Ere, Periodi...

La storia del nostro pianeta è un racconto epico di trasformazioni durato circa 4,6 miliardi di anni, suddiviso dagli scienziati in una scala temporale geologica per organizzarne gli eventi principali. Questa scala è strutturata in unità gerarchiche: eoni, ere, periodi, epoche ed età. Gli studiosi hanno elaborato la seguente suddivisione (non considerando le suddivisioni più "fini": le epoche e le età). La storia della Terra è divisa in quattro Eoni: l'Adeano, l'Archeano, il Proterozoico e il Fanerozoico. I primi tre sono spesso raggruppati in un'unità informale chiamata Precambriano, che copre quasi il 90% della storia del nostro pianeta.

Adeano }  
Archeano } ⇒ Precambriano  
Proterozoico }  
Fanerozoico

Il Fanerozoico (che significa "vita visibile"), è a sua volta suddiviso in tre Ere ben note:

Fanerozoico {  
Era paleozoica (vita antica)  
Era Mesozoica (vita di mezzo)  
Era Cenozoica (vita recente)

Ogni Era è a sua volta suddivisa in Periodi.

Era Paleozoica (541–252 milioni di anni fa) – 6 periodi:

1. Cambriano
2. Ordoviciano
3. Siluriano
4. Devoniano
5. Carbonifero
6. Permiano

Era Mesozoica (252–66 milioni di anni fa) – 3 periodi:

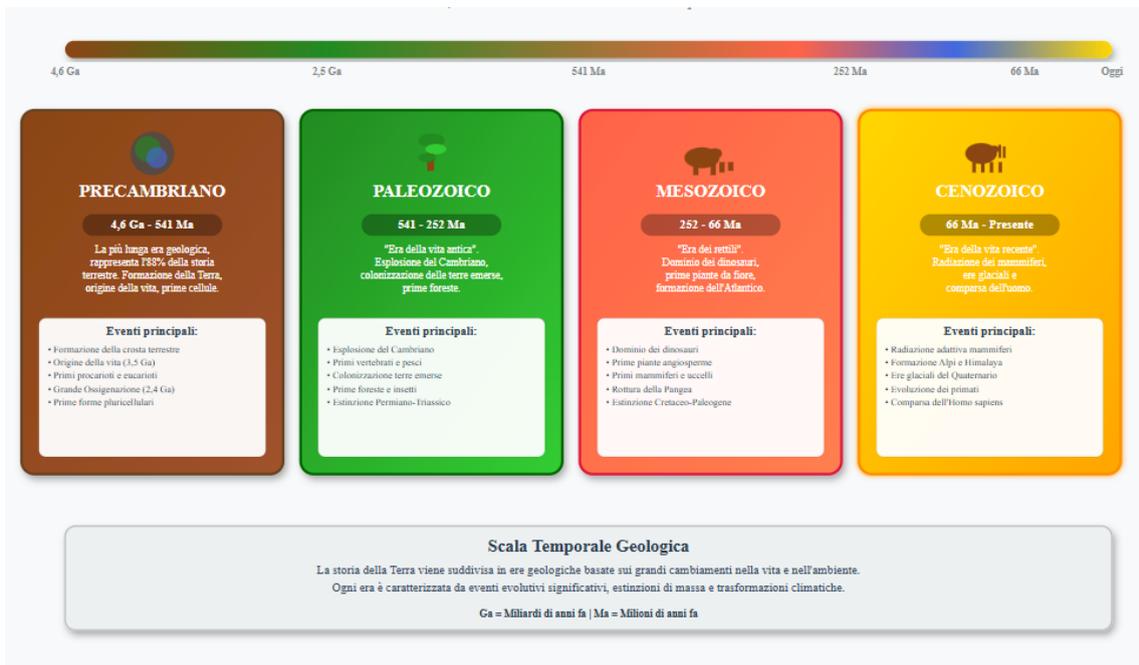
1. Triassico
2. Giurassico
3. Cretaceo

Era Cenozoica (66 milioni di anni fa – oggi) – 3 periodi:

1. Paleogene
2. Neogene
3. Quaternario



# Ere Geologiche: un viaggio attraverso la Storia della Terra



## L'Eone Adeano: la nascita del Pianeta

Da 4,6 a 4 miliardi di anni fa



L'Adeano, dal greco "Ade" che significa "inferi", fu un'era di violenza cosmica e calore estremo. In questo periodo, la Terra si stava formando per aggregazione di planetesimi e subiva un intenso bombardamento di asteroidi e comete. La superficie era probabilmente un oceano di magma fuso e l'atmosfera primordiale, priva di ossigeno, si formò gradualmente grazie ai gas rilasciati dall'attività vulcanica. Verso la fine di questo eone, il pianeta iniziò a raffreddarsi, permettendo la formazione di una prima crosta solida e la condensazione del vapore acqueo, che diede origine agli oceani. Le rocce di questo periodo sono estremamente rare, ma alcuni cristalli di zirconio ritrovati in Australia Occidentale risalgono a 4,4 miliardi di anni fa.

## L'Eone Archeano: l'Alba della Vita

*Da 4 a 2,5 miliardi di anni fa*



L'Archeano, dal greco "arkhē", che significa "inizio", fu un'epoca cruciale nella storia della Terra. Durante questo intervallo di tempo, la crosta terrestre continuò lentamente a raffreddarsi dopo le violente turbolenze dell'Eone Adeano, dando origine alle prime masse continentali stabili, chiamate cratoni. Questi nuclei rocciosi, piccoli e isolati, sarebbero diventati i semi da cui si sarebbero sviluppati i continenti moderni. Il pianeta appariva molto diverso da come lo conosciamo oggi: i mari primordiali ribollivano di attività chimica e vulcanica, mentre l'atmosfera era ancora priva di ossigeno libero, ricca invece di metano, ammoniaca e anidride carbonica, un miscuglio che creava un cielo probabilmente velato e rossastro.

In questo ambiente apparentemente ostile, circa 3,5 miliardi di anni fa, fecero la loro comparsa i primi organismi viventi: i procarioti, cellule semplici e prive di nucleo, simili ai batteri moderni. Queste forme di vita minuscole ma straordinariamente resilienti impararono presto a sfruttare le risorse disponibili. Alcuni si nutrivano di composti chimici disciolti nell'acqua, mentre altri, i cianobatteri, svilupparono una capacità rivoluzionaria: la fotosintesi. Attraverso questo processo riuscivano a catturare l'energia solare e a produrre ossigeno come sottoprodotto.

All'inizio, quell'ossigeno veniva immediatamente assorbito dai minerali presenti negli oceani e nelle rocce, ma col passare del tempo cominciò ad accumularsi nell'atmosfera. Questo lento ma inesorabile cambiamento aprì la strada a quella che, centinaia di milioni di anni dopo, sarebbe stata la "Grande Ossidazione", un evento che trasformò radicalmente la chimica del pianeta e preparò il terreno per forme di vita più complesse.

Le tracce più antiche di questa attività biologica ci arrivano sotto forma di stromatoliti, strutture sedimentarie a strati prodotte dai tappeti microbici dei cianobatteri. Questi fossili viventi sono una testimonianza diretta delle prime comunità organizzate di microbi e, sorprendentemente, alcune formazioni simili sopravvivono ancora oggi in ambienti estremi, come nelle lagune costiere dell'Australia occidentale. Guardando queste strutture si ha quasi l'impressione di osservare un

“ritratto” del mondo di miliardi di anni fa.

Anche le rocce dell'Archeano ci raccontano molto: le più antiche formazioni esposte sulla superficie terrestre, datate fino a 3,8-4 miliardi di anni, sono per lo più di origine metamorfica e vulcanica, segno che la Terra era ancora un pianeta in continuo fermento. Eruttazioni, catene di isole vulcaniche e mari ricchi di ferro caratterizzavano il paesaggio, un ambiente primordiale che fornì il laboratorio naturale per le prime sperimentazioni della vita.

L'Archeano, quindi, non fu soltanto un eone di rocce e vulcani: fu soprattutto il tempo in cui la vita mosse i suoi primi, timidi passi, gettando le basi per la lunga e affascinante storia evolutiva che avrebbe portato, miliardi di anni dopo, alla comparsa degli animali, delle piante e infine dell'uomo.

## L'Eone Proterozoico: un Mondo che cambia

*Da 2,5 miliardi a 541 milioni di anni fa*



Il Proterozoico, che significa "prima vita animale", fu testimone di due eventi cruciali: l'aumento dell'ossigeno nell'atmosfera e la comparsa di forme di vita più complesse. L'ossigeno prodotto dai cianobatteri iniziò ad accumularsi, trasformando radicalmente l'atmosfera e portando all'estinzione di molti organismi anaerobici, per i quali l'ossigeno era tossico. Questo evento, noto come la "Grande Ossidazione", permise lo sviluppo di organismi aerobi, che utilizzano l'ossigeno per produrre energia. Durante questo eone, si formò e si frammentò un supercontinente chiamato Rodinia. Verso la fine del Proterozoico, comparvero i primi organismi eucarioti, dotati di un nucleo cellulare, e successivamente i primi organismi pluricellulari, come la misteriosa fauna di Ediacara.

Riassumendo le caratteristiche di questi tre Eoni – il Precambriano- possiamo dire che con l'aumento della disponibilità di acqua inizia a prendere piede la fotosintesi ossigenica, ma sfortunatamente grazie alla presenza nell'ambiente di grosse quantità di ferro, viene impedito l'aumento di ossigeno atmosferico. A partire da due miliardi di anni fa iniziano a comparire le prime *red beds* ossia composti

di ossidi di ferro trivalente (limonite) che permettono la diffusione dell'ossigeno in atmosfera. Il ferro prima disciolto nell'acqua di mare in forma bivalente e ferrosa si trasforma progressivamente in ferro trivalente grazie alla lenta diffusione dell'ossigeno. Si formano ossidi di ferro idrati insolubili che precipitano e si accumulano insieme agli ossidi di silice sul fondale oceanico.

In questo ambiente proliferano i batteri fotosintetici ed i procarioti chemiosintetici. Questi ultimi sono i primi a fissare l'azoto ad ammoniaca. Si pensa che i procarioti chemiosintetici siano stati i primi organismi aerobi. La respirazione ossigenica è infatti comparsa solo quando la concentrazione di ossigeno atmosferico ha raggiunto il punto di Pasteur, ossia 1/100 dell'attuale concentrazione. L'aumento progressivo di ossigeno ha prodotto una grande estinzione di massa. La Terra si è quindi trovata di fronte alla cosiddetta "crisi dell'ossigeno" responsabile della più grande estinzione avvenuta sul nostro pianeta.

L'atmosfera cambia, il vapor acqueo condensa e si formano le nubi. Iniziano le grandi piogge e compaiono le prime neviccate e glaciazioni. L'anidride carbonica e l'anidride solforosa presenti nell'atmosfera intrappolano l'energia infrarossa proveniente dal Sole, e così facendo aumenta la temperatura della Terra di 33 gradi centigradi, si passa da una media di -18 gradi Celsius a +15 gradi Celsius. L'aumento dell'effetto serra scalda per cui il pianeta rendendolo più ospitale. Durante queste fasi di metamorfosi atmosferica sul nostro pianeta spopolano organismi con forti somiglianze con gli attuali cianobatteri fotosintetici. Si sviluppano nel frattempo i primi organismi eucarioti, planctonici, eterotrofi morfologicamente simili agli attuali dinoflagellati. Compaiono quindi gli acritarchi. Organismi di questo tipo provengono probabilmente da processi di simbiosi mutualistica tra organismi procarioti come proposto dalla teoria endosimbiotica sull'origine del mitocondrio il quale presenta un DNA simile a quello batterico.



*Rappresentazione artistica del Precambriano in cui è visibile la densa atmosfera e l'aspetto inospitale dei suoli.*

Non è ancora presente la respirazione cellulare, tutti gli organismi sono decompositori o eucarioti fotosintetici. Dopo un miliardo di anni dagli eventi che stiamo descrivendo, quindi intorno ad 1-1.3 miliardi di anni fa compare la respirazione cellulare. Si chiude il ciclo del carbonio. Con l'aumento delle rese energetiche compare anche la pluricellularità. Questo fenomeno permette di possedere una

maggiore stabilità strutturale e maggiore funzionalità. Aumentano le dimensioni, aumentano le capacità rigenerative con conseguente aumento della vita media, gli organismi si specializzano, si dividono i compartimenti, si formano gli organi, i tessuti, etc. I primi fossili interpretati come animali appartengono ai chitinozoi e sono stati rinvenuti in Arabia e Groenlandia.

Il più antico fossile di animale pluricellulare di cui si ha certezza è stato però scoperto in Australia meridionale ed è stato datato tra i 670 ed i 580 milioni di anni fa. Risale al Precambriano e si riferisce ad un organismo dal corpo molle medusoide il quale potrebbe essere l'antenato degli attuali Cnidari, Ctenofori, Anellidi, Artropodi ed Echinodermi.

## L'Eone Fanerozoico: L'Esplosione della Vita Visibile

*Da 541 milioni di anni fa ad oggi*

Il Fanerozoico, che significa "vita visibile", è l'eone in cui viviamo e in cui la vita animale e vegetale si è diversificata in modo esplosivo. È suddiviso in tre ere principali: Paleozoica, Mesozoica e Cenozoica.

Scheda riassuntiva dei quattro Eoni

<b>Eone</b>	<b>Periodo</b> Milioni di anni	<b>Eventi particolari</b>	<b>Specie dominante</b>
<b>ADEANO</b>	<b>4600 – 4000</b>	Formazione della Terra, raffreddamento crosta, comparsa delle prime acque.	<b>Nessuna forma di vita certa</b>
<b>ARCHEANO</b>	<b>4000 – 2500</b>	Prime forme di vita procariote (batteri e archeobatteri), comparsa dei primi stromatoliti.	<b>Procarioti</b>
<b>PROTEROZOICO</b>	<b>2500 – 541</b>	Grande Ossidazione, prime cellule eucariote, primi organismi pluricellulari.	<b>Procarioti</b> <b>Eucarioti</b>
<b>FANEROZOICO</b>	<b>541 – oggi</b>	Esplosione Cambriana, sviluppo piante e animali, conquista delle terre emerse, grandi estinzioni, comparsa dei mammiferi e dell'uomo.	<b>Invertebrati</b> <b>Vertebrati</b> <b>Mammiferi</b>

## Le Ere del Fanerozoico

### Era Paleozoica: La Vita Conquista il Pianeta

(Da 541 a 252 milioni di anni fa)



L'era Paleozoica, o "vita antica", iniziò con la cosiddetta "esplosione cambriana", un periodo di rapida diversificazione evolutiva in cui comparvero quasi tutti i principali phyla animali oggi conosciuti. I mari brulicavano di vita, con organismi come trilobiti, brachiopodi e pesci primitivi. Durante il Paleozoico, la vita iniziò a colonizzare anche le terre emerse: comparvero le prime piante terrestri, seguite da insetti, anfibi e rettili. I continenti, inizialmente frammentati, si riunirono gradualmente per formare il supercontinente Pangea. Quest'era si concluse con la più grande estinzione di massa della storia della Terra, l'estinzione del Permiano-Triassico, che spazzò via circa il 96% delle specie marine e il 70% di quelle terrestri.

### Era Mesozoica: l'Era dei Dinosauri

(Da 252 a 66 milioni di anni fa)



Conosciuta come l'"era di mezzo". L'Era Mesozoica, iniziata circa 252 milioni di anni fa e durata fino a 66 milioni di anni fa, rappresenta uno dei capitoli più affascinanti della storia della Terra. Viene spesso ricordata come "l'età dei dinosauri", ma fu molto più di questo: un lungo arco temporale in cui il pianeta cambiò profondamente aspetto, sia dal punto di vista geologico che biologico.

Durante il Mesozoico, la Terra attraversò un periodo di clima generalmente caldo, con mari più estesi rispetto a oggi e vaste aree ricoperte da foreste rigogliose. La disposizione dei continenti non era

ancora quella attuale: si stavano lentamente separando da un'unica grande massa, e questo movimento influenzava la formazione di catene montuose, bacini oceanici e nuove coste.

Dal punto di vista della vita, fu un'epoca di straordinaria diversificazione. I dinosauri dominarono le terre emerse, occupando nicchie ecologiche molto diverse, dai piccoli predatori agili fino ai giganteschi erbivori. Accanto a loro prosperavano rettili marini di grandi dimensioni, come ittiosauri e plesiosauri, e nei cieli volavano i primi vertebrati alati, i pterosauri. Le piante subirono un'importante trasformazione: alle grandi foreste di conifere e felci si affiancarono le prime piante a fiore, che cambiarono radicalmente gli ecosistemi terrestri.

Ma il Mesozoico non fu solo il tempo dei giganti. In questo periodo comparvero anche forme di vita più piccole e apparentemente marginali, come i primi mammiferi e gli antenati degli uccelli. Questi gruppi, pur restando secondari rispetto ai dinosauri, gettarono le basi per l'evoluzione che avrebbe caratterizzato l'era successiva.

L'Era Mesozoica si concluse con una delle più celebri estinzioni di massa della storia: un evento improvviso e catastrofico che cancellò gran parte della vita allora esistente, inclusi i dinosauri non aviani. Tuttavia, questa fine drammatica aprì la strada a nuove opportunità evolutive e permise ai mammiferi di assumere un ruolo da protagonisti.

In sintesi, il Mesozoico fu un'era di trasformazioni profonde, un lungo equilibrio tra stabilità climatica e dinamismo geologico, tra la potenza dei grandi rettili e la comparsa silenziosa di forme di vita che avrebbero costruito il mondo moderno.

*Era Cenozoica: l'Era dei Mammiferi, fino ad oggi* \_\_\_\_\_ (Da 66 milioni di anni fa ad oggi)



L'era Cenozoica, o "vita recente", è l'Era in cui viviamo. L'era Cenozoica è l'ultima delle grandi ere geologiche della storia della Terra, iniziata circa 66 milioni di anni fa, subito dopo l'estinzione di massa che segnò la fine dei dinosauri, e continua ancora oggi. È spesso chiamata anche "l'era dei mammiferi", perché questi animali, fino ad allora rimasti in secondo piano rispetto ai grandi rettili

del Mesozoico, poterono espandersi e diversificarsi enormemente.

Il Cenozoico viene suddiviso in tre grandi periodi: Paleogene, Neogene e Quaternario. Durante il Paleogene i continenti iniziarono ad assumere una disposizione più simile a quella attuale; comparvero molti gruppi di mammiferi moderni e si svilupparono i primi grandi predatori. Nel Neogene si affermarono gli antenati delle specie attuali, tra cui i primati, mentre le praterie si estesero favorendo erbivori come cavalli e bovidi. Il Quaternario, iniziato 2,6 milioni di anni fa, è il periodo delle grandi glaciazioni e dell'evoluzione del genere *Homo*, fino all'*Homo sapiens*.

Dal punto di vista climatico, il Cenozoico è caratterizzato da un progressivo raffreddamento del pianeta: dalle condizioni più calde e umide del Paleogene, si passò a cicli glaciali e interglaciali nel Quaternario, che plasmarono paesaggi e ecosistemi.

In sintesi, il Cenozoico è l'era in cui il mondo naturale ha assunto l'aspetto che conosciamo oggi: i continenti si sono spostati nelle loro posizioni attuali, le catene montuose più giovani (come l'Himalaya e le Alpi) si sono sollevate, e soprattutto si è compiuta la lunga e complessa storia dell'evoluzione umana, è comparso il genere *Homo* e infine la nostra specie, *Homo sapiens*.

## I Periodi del Paleozoico

### *Cambriano*

Durante il Cambriano (570 milioni di anni fa) incrementa la diversità delle forme di vita sulla Terra. Compaiono i primi organismi dotati di scheletri esterni ed interni. Questo apparato porta a vantaggi morfo-meccanici consentendo una miglior capacità di movimento e migliori capacità difensive ed offensive. La Pangea si frammenta separandosi principalmente in Laurasia e Gondwana.

I continenti vengono invasi dalle acque, si formano vasti mari tropicali poco profondi. Grazie a queste condizioni ambientali si ha l'esplosione del Cambriano (i trilobiti sono i più famosi rappresentanti di questa era geologica). Si trovano tanti fossili grazie alla presenza di uno scheletro in grado di fossilizzare. Il mondo vegetale è rappresentato esclusivamente da alghe come quelle verdi, quelle rosse e le Glaucofite caratteristiche delle acque dolci. Per avere una maggiore differenziazione vegetale bisogna attendere l'Ordoviciano con la comparsa delle Euglenofite, gli Eteroconti (come le Diatomee) ed i Dinoflagellati. Verso la fine del Cambriano la temperatura diminuisce e le forme di vita variano.



*L'esplosione delle forme di vita del Cambriano.*

## *Ordoviciano*

Durante l'Ordoviciano sulla Terra si possono osservare quattro grandi aree emerse, il Gondwana, l'Europa, il Nord America e l'Asia. Si formano grandi mari epicontinentali. Compaiono le prime scogliere coralline con coralli tabulati e rugosi. Durante il medio Ordoviciano si ha la contrazione dei mari interni che determina la comparsa di vaste aree asciutte. Compaiono i molluschi come Bivalvi e Cefalopodi, compaiono gli Echinodermi, i Briozoi ed i Brachiopodi. Insieme ai coralli coesistono numerose alghe rosse calcaree ed alghe verdi calcaree. Compaiono anche i primi pesci primitivi agnati, sprovvisti di pinne ma con lunghe code flessibili.

Nel mondo vegetale prima unicellulare compaiono i primi organismi pluricellulari coloniali. Scompaiono progressivamente i cianobatteri e gli organismi vegetali tentano di colonizzare le terre emerse. Il fallimento di questa conquista da parte di vegetali si ha a causa di un'altra estinzione di massa causata probabilmente da una glaciazione che ha provocato l'abbassamento del livello dei mari con conseguente riduzione di tutti gli habitat marini. L'85% delle forme di vita scompare.



*Alcuni fossili risalenti all'Ordoviciano*

## *Siluriano*

Nel Siluriano si sviluppano tutti quegli organismi legati alle barriere coralline. Continua l'evoluzione dei vertebrati. Dagli agnati compaiono i primi pesci dotati di mascelle mobili. Compaiono i placodermi. La presenza di una bocca mobile causa una forte pressione selettiva che favorisce l'aumento delle dimensioni. Il pianeta si riscalda. Grazie al clima mite del Siluriano compaiono le prime piante terrestri dotate di fusti di sostegno. Il più antico fossile di pianta vascolare, ossia *Cooksonia*, appartiene proprio a questo periodo storico.



*Cooksonia*

## *Devoniano*

Le piante, grazie ai climi sempre più permissivi, conquistano sempre di più le terre emerse. Compaiono le prime felci, le quali avranno il loro periodo di massima espansione nel Carbonifero. Le Equisetofite colonizzano i suoli. Per quanto riguarda le forme di vita animali nei mari si differenziano le Ammoniti, i Molluschi, i Cefalopodi predatori ed i primi pesci derivanti dai Placodermi. Si delineano i pesci ossei ed i pesci cartilaginei, in quelli ossei si possono ritrovare il Paleoniscoidi, i Crossopterigi (antenati degli anfibi) ed i Dipnoi (pesci polmonati).

Grazie alla presenza di nuove nicchie ecologiche terrestri si ha una spinta evolutiva sui vertebrati marini che li fa spostare verso le terre emerse. Dai Crossopterigi probabilmente originano i primi tetrapodi terrestri. Il tegumento ricoperto di scaglie si modifica per diventare impermeabile alla perdita dei liquidi interni. Compaiono quindi i primi anfibi. Il Devoniano si conclude con una estinzione di massa a causa di una glaciazione causata forse da una serie di impatti asteroidale sulla crosta terrestre. La vita sulla Terra rimane decimata.



*Ricostruzione dell'ambiente Devoniano*

## *Carbonifero e Permiano*

Il Carbonifero viene definito in molti modi, “il periodo degli Anfibi”, “l’era degli Insetti”, etc. La vita non è più strettamente legata all’acqua. Laurasia e Gondwana collidono per formare Pangea II e si forma l’oceano della Tetide. Si crea un clima caldo-umido che consente lo sviluppo di estese foreste. L’ossigeno in atmosfera aumenta vertiginosamente. Con l’estinzione del Devoniano si ha la propulsione per il grande sviluppo delle piante vascolari dotate di spore, si hanno grandi equiseti e numerose felci arboree. In tutto questo compare il seme e si hanno piante di grandi dimensioni le quali costituiscono grandi foreste che fanno da rifugio a numerose specie animali. Tra gli artropodi proliferano Araneane (ragni), Chilopodi (centopiedi), Diplopodi (millepiedi), Scorpionidi (scorpioni), etc. Compaiono le prime forme alate appartenenti agli Odonati (libellule). Si ha una forte radiazione evolutiva nell’ambiente aereo probabilmente favorita dalla mancanza di competizione.



*Incisione raffigurante la flora del Carbonifero*

Durante il Permiano si ha lo sviluppo dei rettili, si consolidano invece le felci a semi per quanto riguarda il mondo vegetale. Compaiono i Medullosales, ossia piccoli alberi con fusto eretto, grandi foglie e granuli pollinici enormi. Compaiono le Glossopteridales, Voltziales e Cordaitales, sempre più simili agli attuali alberi. Il Permiano si conclude con una grande estinzione di massa, la metà delle famiglie di invertebrati marini si estingue, i trilobiti scompaiono, molti molluschi e brachiopodi vengono decimati.

La causa di questa catastrofe ecologica è probabilmente dovuta ad un impatto di un grosso asteroide sulla crosta terrestre. L’impatto sollevando probabilmente una grande quantità di polveri ha oscurato il pianeta. Crollano le temperature e si formano piogge acide corrosive. Aumenta l’acidità del suolo, non si ha luce, etc. di conseguenza scompaiono le piante. Spariscono quasi tutte le specie arboree. Gli

erbivori vengono decimati causando forti ritorzioni su tutta la catena trofica. Diradate le nubi la luce solare torna libera di irradiare il suolo e le acque, tuttavia, la grande decomposizione derivante dalla moria di specie animali e vegetali causa un forte incremento dell'anidride carbonica in atmosfera. Si ha un intenso effetto serra con conseguente riscaldamento globale per diversi milioni di anni.

## I Periodi del Mesozoico

### *Triassico*

Come già visto l'era Mesozoica segna grandi modifiche nella vita sulla Terra (Flora e Fauna). Si ha l'espansione del mondo dei rettili e dei dinosauri. Si suddivide in Triassico (comparsa dei dinosauri), Giurassico (loro massima espansione) e Cretaceo (estinzione dei dinosauri). Dal punto di vista floristico il Triassico ha visto la presenza di alcuni taxa di felci a seme come le Caytoniales, piccoli alberi con foglie palmato-composte. Tutta l'era Mesozoica è stata caratterizzata dalla presenza delle Cycadofite, ad oggi diffuse prevalentemente nell'emisfero australe. Possiedono fusti molto corti non ramificati con foglie persistenti.

Nascono sempre durante il Triassico le Ginkgofite di cui oggi rimane solo *Ginkgo biloba* e nascono anche le prime conifere. Tra i vegetali ancora diffusi oggi compaiono anche lo *Gnetum*, un genere che comprende circa 30 specie di piante arboree e lianose con foglie grandi e coriacee e *Welwitschia* con un solo rappresentante *W. Mirabilis*. Questa vive sulla costa del deserto della Namibia ed è caratterizzata da un fusto sotterrato nella sabbia. Compaiono anche probabilmente le prime piante a fiore a causa della pressione selettiva per favorire la propria riproduzione. I vegetali iniziano a servirsi degli animali per permettere il susseguirsi delle generazioni.

### *Giurassico*

Tra il Triassico ed il Giurassico si ha un'estinzione di massa la quale colpisce principalmente i rettili tra i quali i grandi Terapsidi e molti anfibi. Circa l'84% dei bivalvi e dei molluschi si estingue. Iniziano ad evolversi i dinosauri che diventano il gruppo dominante sulla Terra. Durante il Giurassico (210-140 milioni di anni fa) si ha una buona stabilità climatica. Nel mondo vegetale compaiono le angiosperme. Con l'aumento delle piante compaiono anche numerose specie di

animali erbivori e compaiono anche numerosi meccanismi chimici per difendersi da questi.

## *Cretaceo*

Si frammentano definitivamente i supercontinenti. La Laurasia va alla deriva verso nord ed il blocco dell'America e del Sud Africa si stacca dal blocco dell'Australia-Antartide. L'India si avvicina all'equatore ed il Madagascar si stacca dall'Africa. Gli oceani si estendono al di sopra dei continenti e formano mari bassi in molte parti del mondo. Si originano anche le grandi catene montuose come, ad esempio, le Ande. La collisione dell'India con l'Asia meridionale dà origine alla catena dell'Himalaya, si formano nel frattempo anche le montagne europee che creano nuove nicchie ecologiche. I poli liberi dai ghiacci permettono la distribuzione dei rettili a sangue freddo anche ad alte latitudini.

Il Cretaceo si chiude con l'estinzione KT, in questo evento scompaiono il 40% dei generi degli organismi marini mentre sulla terra scompare quasi il 99% della totalità degli organismi viventi. Nei mari le specie più colpite sono quelle dei foraminiferi, delle spugne e dei ricci di mare. Scompaiono completamente i grandi rettili dominanti come il Plesiosauro, il Mosasauo e l'Ittiosauro. Sulla terra scompaiono i dinosauri, i rettili e numerosi mammiferi con dimensioni maggiori di qualche decina di chilogrammi. Nel mondo vegetale scompaiono le grandi foreste del mesozoico. Sopravvivono le felci più piccole e le specie pioniere. Secondo Walter Alvarez, premio Nobel per la fisica, questa estinzione è stata dovuta all'impatto di un grande asteroide di 10 Km di diametro. L'impatto ha innescato un incendio planetario sollevando una monolitica nube nell'atmosfera ricca di iridio che oscurando il cielo ha impedito la fotosintesi, facendo crollare piante, erbivori e di conseguenza carnivori.



*Rappresentazione dell'impatto meteorico che ha causato l'estinzione KT*

## I Periodi del Cenozoico

### *Paleogene*



Da 65 milioni di anni fa a circa 1.8 milioni di anni fa si ha l'era Cenozoica. Viene denominata anche periodo dei mammiferi in quanto si assiste ad una grande radiazione di questi animali. Gli uccelli sostituiscono lentamente i rettili. Il clima passa da caldo tropicale a glaciazioni con una tendenza progressiva. Nel Paleocene i mari riprendono vita, ricompaiono le spugne, i briozoi, i coralli, i crinoidi ed i macro-foraminiferi. Nella flora marina compaiono nuove specie di alghe calcaree. Si ha la grande espansione delle angiosperme. le conifere iniziano a competere con le angiosperme arboree. Ancora una volta proliferano i mammiferi nelle foreste tropicali piovose. Si formano le pianure, i deserti, le savane, etc. Nel Miocene si ha una grande variazione della biodiversità. Si formano piccoli bacini salati.

### *Neogene*



Continuo sollevamento delle catene montuose (Himalaya, Alpi, Ande). Formazione dell'istmo di Panama (fine del Pliocene), con forti effetti sul clima. Clima inizialmente caldo-umido, ma progressivamente più secco e freddo. Grande diversificazione dei mammiferi (in particolare erbivori e carnivori moderni). Espansione delle praterie a scapito delle foreste tropicali. Diffusione e diversificazione dei primati, con i primi ominidi (ad es. Australopithecus).

## *Quaternario*

Periodo segnato da cicli glaciali e interglaciali. Modellamento del paesaggio da parte dei ghiacciai (morene, laghi glaciali, fiordi). Nel corso dell'Olocene: clima più stabile e sviluppo delle civiltà umane. Presenza di grandi mammiferi pleistocenici (mammut, rinoceronti lanosi, megafauna), molti dei quali estinti.

Il Quaternario è l'ultima delle ere geologiche e inizia circa 2,58 milioni di anni fa: in pratica è l'epoca più recente della storia della Terra, quella in cui viviamo tutt'oggi. È suddiviso in due periodi principali: il Pleistocene (fino a circa 11.700 anni fa) e l'Olocene, che rappresenta l'intervallo attuale.

Una delle caratteristiche più evidenti del Quaternario sono i forti cambiamenti climatici: cicli glaciali e interglaciali si sono alternati più volte, con grandi masse di ghiaccio che si espandevano e ritiravano dai continenti. Questi eventi hanno modellato profondamente i paesaggi (catene montuose levigate dai ghiacciai, valli a U, depositi morenici) e hanno influenzato la distribuzione delle specie viventi.

Dal punto di vista biologico, il Quaternario è importantissimo perché segna la comparsa e l'evoluzione del genere Homo. È in quest'epoca che i nostri antenati hanno imparato a usare strumenti, dominare il fuoco, sviluppare il linguaggio e infine costruire le prime civiltà. L'Olocene, con il suo clima relativamente stabile, ha reso possibile la nascita dell'agricoltura e delle società complesse.

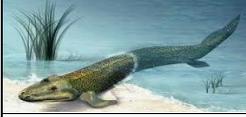
Il Quaternario non è quindi solo una "fase geologica", ma il contesto naturale e ambientale in cui si è svolta l'intera storia dell'umanità. È un periodo dinamico, segnato da oscillazioni climatiche, estinzioni di grandi mammiferi (come i mammut) e dall'impronta sempre più evidente della nostra specie.



Scheda riassuntiva delle tre Ere del Fanerozoico con i loro Periodi

<b>Era</b>	<b>Periodo</b> (Milioni di anni)	<b>Eventi particolari</b>	<b>Specie dominante</b>
<b>PALEOZOICA</b> (o Primaria)	<b>Cambriano 570–505</b>	“Esplosione Cambriana”: comparsa di tutti i principali gruppi di invertebrati.	<b>Invertebrati</b>
	<b>Ordoviciano 505–438</b>	Sviluppo della vita marina, primi pesci senza mascelle.	<b>Invertebrati e Pesci primitivi</b>
	<b>Siluriano 438–408</b>	Prime piante terrestri e artropodi sulla terraferma.	<b>Pesci</b>
	<b>Devoniano 408–360</b>	“Età dei pesci”, compaiono i primi anfibi.	<b>Pesci e Anfibi</b>
	<b>Carbonifero 360–286</b>	Grandi foreste, primi rettili, deposito di carbone fossile.	<b>Anfibi e Rettili primitivi</b>
	<b>Permiano 286–245</b>	Continenti riuniti in Pangea, grande estinzione di massa.	<b>Rettili</b>
<b>MESOZOICA</b> (o Secondaria)	<b>Triassico 245–208</b>	Comparsa dei dinosauri e dei primi mammiferi.	<b>Rettili (dinosauri)</b>
	<b>Giurassico 208–144</b>	Dominio dei grandi dinosauri, primi uccelli.	<b>Rettili</b>
	<b>Cretaceo 144–65</b>	Diffusione delle piante a fiore, estinzione dei dinosauri alla fine.	<b>Rettili, poi Mammiferi</b>
<b>CENOZOICA</b> (o Terziaria + Quaternaria)	<b>Paleogene 65–23</b>	Grande sviluppo dei mammiferi e delle piante a fiore.	<b>Mammiferi</b>
	<b>Neogene 23–2</b>	Comparsa dei primi ominidi, forti cambiamenti climatici.	<b>Mammiferi</b>
	<b>Quaternario 2– oggi</b>	Evoluzione del genere Homo, glaciazioni, civiltà umana.	<b>Uomo</b>

La seguente illustrazione mostra tutte le principali tappe evolutive

	<b>Evento</b>	<b>Data di riferimento (anni fa)</b>
	<b>Si forma la Terra</b>	<b>4.5 miliardi</b>
	<b>Prima forma di vita (cellule procariote)</b>	<b>3.8 miliardi</b>
	<b>Inizio fotosintesi</b>	<b>2.5 miliardi</b>
	<b>Prime cellule eucariote</b>	<b>2 miliardi</b>
	<b>Primi organismi pluricellulari (alghe rosse...)</b>	<b>1.2 miliardi</b>
	<b>Primi organismi animali (spugne, meduse...)</b>	<b>600 milioni</b>
	<b>Atmosfera respirabile</b>	<b>600 milioni</b>
	<b>Primi vegetali (felci, equiseti...)</b>	<b>450 milioni</b>
	<b>Primi artropodi (trilobiti...)</b>	<b>450 milioni</b>
	<b>Primi anfibi</b>	<b>450 milioni</b>
	<b>Primi rettili</b>	<b>350 milioni</b>

	<b>Prime piante (conifere...)</b>	<b>300 milioni</b>
	<b>Primi dinosauri</b>	<b>230 milioni</b>
	<b>Primi mammiferi</b>	<b>200 milioni</b>
	<b>Scomparsa dei dinosauri</b>	<b>66 milioni</b>
	<b>Compare il genere Homo</b>	<b>2 milioni</b>
	<b>Homo sapiens</b>	<b>250 000</b>
	<b>Nasce la civiltà</b>	<b>10 000</b>
	<b>Nasce la scrittura – Inizia la Storia</b>	<b>5 000</b>

Se comprimessimo i 4.5 miliardi di anni della vita della Terra in un solo anno

Avremo la seguente corrispondenza:

1 giorno ~12,33 milioni di anni

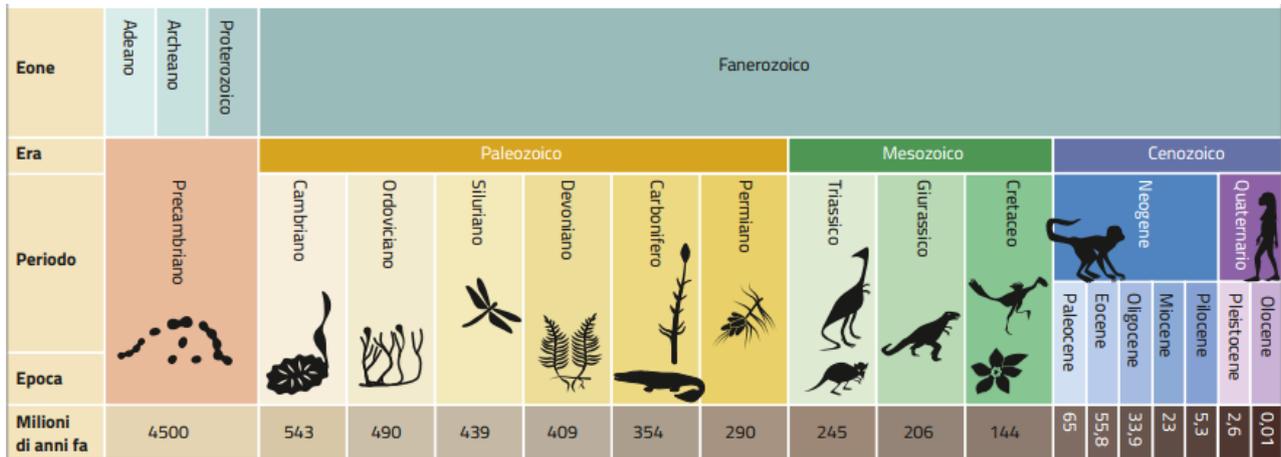
1 mese ~ 375 milioni di anni

E' suggestivo allora riscrivere le tappe principale dell'evoluzione come se tutto fosse accaduto durante un solo anno: il calendario della vita!

Gennaio		Febbraio		Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	
1	<b>Formazione della Terra</b>	1		1	1	1	1	1	<b>Inizio della fotosintesi</b>
2		2		2	2	2	2	2	
3	4,5 miliardi di anni fa	3		3	3	3	3	3	
4		4		4	4	4	4	4	
5		5		5	5	5	5	5	
6		6		6	6	6	6	6	
7		7		7	7	7	7	7	
8		8		8	8	8	8	8	
9		9		9	9	9	9	9	
10		10		10	10	10	10	10	
11		11		11	11	11	11	11	
12		12		12	12	12	12	12	
13		13		13	13	13	13	13	
14		14		14	14	14	14	14	
15		15		15	15	15	15	15	
16		16		16	16	16	16	16	
17		17		17	17	17	17	17	
18		18		18	18	18	18	18	
19		19		19	19	19	19	19	
20		20		20	20	20	20	20	
21		21		21	21	21	21	21	
22		22		22	22	22	22	22	
23		23		23	23	23	23	23	
24		24		24	24	24	24	24	
25		<b>25</b>	<b>Comparsa della vita</b>	25	25	25	25	25	
26		<b>26</b>		26	26	26	26	26	
27		<b>27</b>	<b>prime cellule procariote</b>	27	27	27	27	27	
28		28		28	28	28	28	28	
29		29	3,8 miliardi di anni fa	29	29	29	29	29	
30				30	30	30	30	<b>30</b>	<b>Prime cellule eucariote</b>
31				31		31		<b>31</b>	
									2 miliardi di anni fa

Agosto	Settembre	Ottobre		Novembre		Dicembre	
1	1	<b>1</b>	<b>Primi organismi pluricellulari</b>	1		1	
2	2	2	<b>(alghе rosse, ...)</b>	2		<b>2</b>	<b>Primi rettili</b>
3	3	3		3		3	350 milioni di anni fa
4	4	4		<b>4</b>	<b>Atmosfera respirabile</b>	4	
5	5	5		5	<b>(composizione attuale)</b>	5	
6	6	6		6		<b>6</b>	<b>Prime piante</b>
7	7	7		7		7	<b>(conifere,...)</b>
8	8	8		<b>8</b>	<b>Primi organismi animali</b>	8	300 milioni di anni fa
9	9	9		9		9	
10	10	10		10	<b>spugne, meduse...</b>	10	
11	11	11		11	<b>600 milioni di anni fa</b>	11	
12	12	12		12		12	
13	13	13		13		<b>13</b>	<b>Primi dinosauri</b>
14	14	14		14		14	250 milioni di anni fa
15	15	15		15		15	
16	16	16		<b>16</b>	<b>Prime forme vegetali</b>	<b>16</b>	<b>Primi mammiferi</b>
17	17	17		<b>17</b>	<b>(felci, equiseti...)</b>	17	200 milioni di anni fa
18	18	18		18		18	
19	19	19		<b>19</b>	<b>primi artropodi</b>	19	
20	20	20		20	<b>(Trilobiti)</b>	20	
21	21	21		21	<b>450 milioni di anni fa</b>	21	
22	22	22		22		22	
23	23	23		23		23	
24	24	24		24		24	
25	25	25		25		25	
26	26	26		<b>26</b>	<b>Primi anfibi</b>	26	
27	27	27		27	<b>400 milioni di anni fa</b>	<b>27</b>	<b>Scomparsa dei dinosauri</b>
28	28	28		28		28	66 milioni di anni fa
29	29	29		29		29	
30	30	30		30		30	
31		31				<b>31</b>	<b>ore 20:00 genere Homo</b>
							<b>ore 23:40 Homo Sapiens</b>
							200 000 anni fa

Questa suggestiva immagine racchiude visivamente tutto il percorso evolutivo della vita sulla Terra.



Tutto quanto detto fino a questo momento ci fa capire quanto sia stata complessa l'evoluzione degli organismi viventi sulla Terra; si sono susseguite diverse specie con le più disparate morfologie e caratteristiche chimiche-fisiche-meccaniche, etc. Lo studio della vita sul nostro pianeta è quindi argomento complesso che si serve di tutti i campi di studio per poter essere compresa.

Alla fine, la storia dell'evoluzione è la storia di un'unica, grande famiglia. Ogni creatura, dal più piccolo microbo all'essere umano, porta in sé l'eco di un antenato comune, un legame invisibile che unisce tutta la vita sulla Terra in un meraviglioso arazzo biologico."

Guardando all'incredibile diversità del mondo vivente, diventa chiaro che le differenze tra le specie sono solo variazioni su un tema antico, scritto nel linguaggio universale del DNA, a testimonianza della nostra profonda e condivisa eredità.

Siamo tutti foglie dello stesso albero della vita, sospese nel respiro del mondo e nutrite dalle radici che affondano nel tempo. Riconoscere questa verità apre il cuore al mistero che tutto avvolge, facendoci sentire parte di una storia più grande di noi, guidata da un ordine invisibile che carezza ogni creatura e ogni istante della creazione.