

M. Besozzi

La nostra casa nell'Universo

Breve cronistoria della Terra e della vita



In copertina: la prima immagine a colori della Terra fotografata dallo spazio [1].

Le immagini sono opera dell'autore o opere di pubblico dominio e quando opera di terzi vengono riportate con la licenza di distribuzione richiesta. Quest'opera è rilasciata con *Licenza Creative Commons Attribuzione-Non commerciale 4.0 Internazionale*. Per leggere una copia della licenza visita il sito web <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

The images are the work of the author or works in the public domain and when they are work of third parties are reported with the required distribution license.

This work is licensed under the *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License*. To view a copy of this license visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

~~Versione 1.0 (24/11/2024)~~

~~Versione 1.1 (08/12/2024) correzioni minori~~

~~Versione 1.2 (12/12/2024) migliorie alla veste grafica~~

Versione 1.3 (15/03/2025) correzione di refusi

[1] Originale della fotografia scattata dall'astronauta William Anders il 24 dicembre 1968 dall'Apollo 8 in orbita intorno alla Luna:

"Image Caption: The rising Earth is about five degrees above the lunar horizon in this telephoto view taken from the Apollo 8 spacecraft near 110 degrees east longitude. The horizon, about 570 kilometers (250 statute miles) from the spacecraft, is near the eastern limb of the Moon as viewed from the Earth. On the earth, the sunset terminator crosses Africa. The south pole is in the white area near the left end of the terminator. North and South America are under the clouds. The lunar surface probably has less pronounced color than indicated by this print".

Credits: the International Space Station program and the JSC Earth Science & Remote Sensing Unit, ARES Division, Exploration Integration Science Directorate.

<https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=AS08&roll=14&frame=2383>

<https://tothemoon.ser.asu.edu/gallery/Apollo/8/Hasselblad%20500EL%2070%20mm#AS08-14-2383>

*"Quod <si> iam rerum ignorem primordia quae sint,
hoc tamen ex ipsis caeli rationibus ausim
confirmare aliisque ex rebus reddere multis,
nequaquam nobis divinitus esse paratam
naturam rerum, tanta stat praedita culpa"*

(Lucrezio)

INDICE

	Prologo	6
Eone	1. Adeano	10
	2. Archeano	18
	3. Proterozoico	37
	4. Fanerozoico	53
<i>Era</i>	<i>Paleozoico</i>	53
Periodo	Cambriano	55
	Ordoviciano	58
	Siluriano	60
	Devoniano	65
	Carbonifero	67
	Permiano	72
<i>Era</i>	<i>Mesozoico</i>	79
Periodo	Triassico	80
	Giurassico	84
	Cretacico	93
<i>Era</i>	<i>Cenozoico</i>	98
Periodo	Paleogene	99
Epoca	Paleocene	99
	Eocene	102
	Oligocene	105
Periodo	Neogene	108
Epoca	Miocene	108
	Pliocene	112
Periodo	Quaternario	115
Epoca	Pleistocene	115
	Olocene	118
	Epilogo	120
	Quadro sinottico	132
	Bibliografia essenziale	133

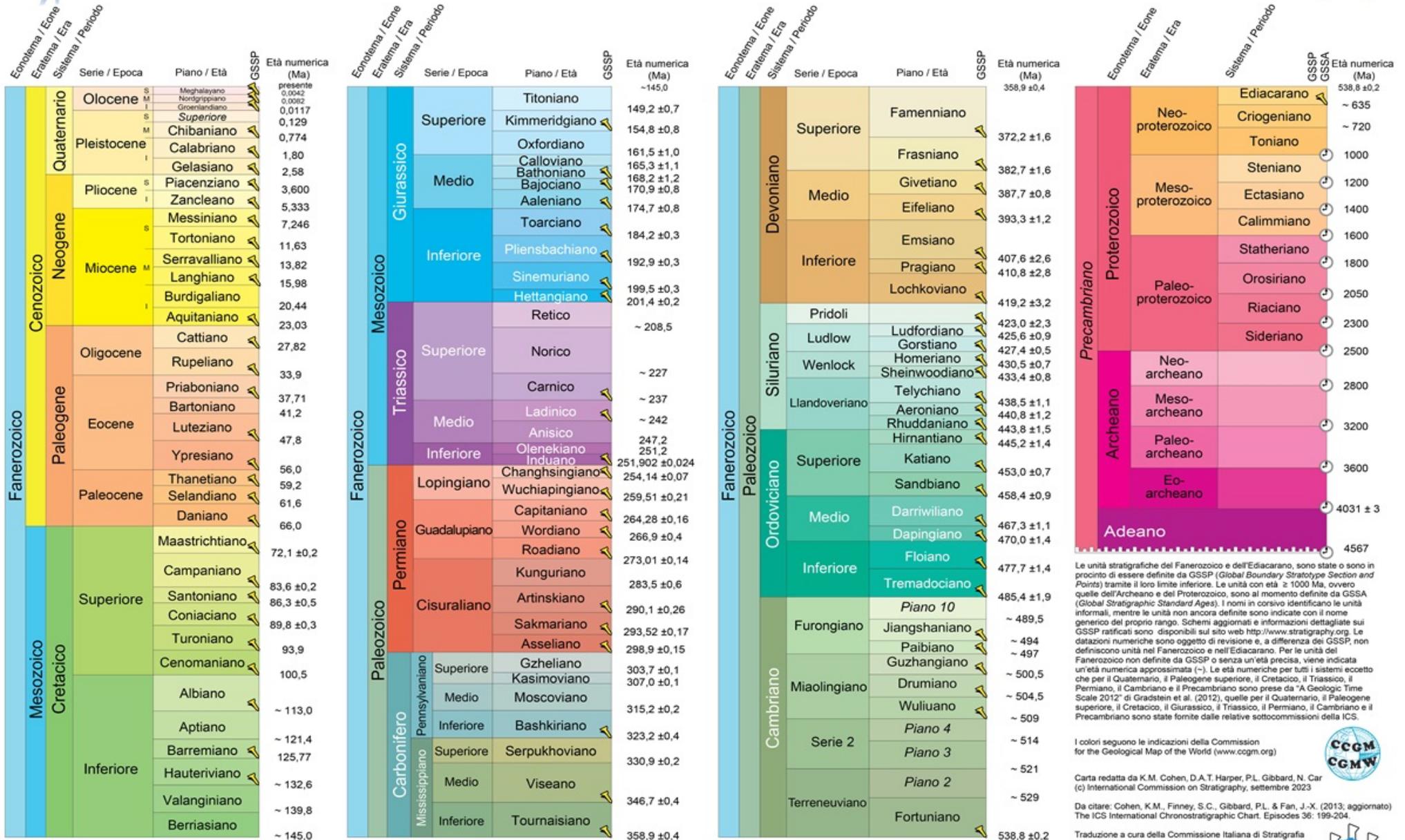


SCALA CRONOSTRATIGRAFICA INTERNAZIONALE

www.stratigraphy.org

Commissione Internazionale di Stratigrafia (ICS)

v 2023/09



PROLOGO

Qualche tempo fa mi sono accorto che, da quando a suo tempo le avevo lasciate in disparte – accontentandomi di quanto avevo letto, in ogni caso di livello scientifico divulgativo – nel campo della geologia, della paleontologia e della paleobiologia di acqua ne è passata veramente molta sotto i ponti. Nel corso degli ultimi 30 anni sono comparse, a documentare il passato della Terra e della vita, evidenze scientifiche sempre più numerose e sempre più importanti.

Ma nel corso delle mie nuove letture su questi argomenti ho incontrato due difficoltà. La prima è che anche nella divulgazione scientifica si è andato diffondendo lo stile narrativo, improntato alla moda dello "storytelling". Se lo scopo era ed è una divulgazione della scienza meno formale per aumentarne il gradimento, si tratta di uno scopo più che lecito, sul quale non avrei da ridire. Ma ho visto qualche volta i contenuti passare in secondo piano rispetto alla narrazione, lasciando al termine della lettura un vago senso di confusione a causa della destrutturazione della logica scientifica soggiacente all'argomento trattato. La seconda difficoltà è che, come tutti i temi scientifici, anche questi si sono andati sviluppando in senso specialistico, con risultati sempre più approfonditi in campi di ricerca sempre più ristretti, cosa che fa inevitabilmente perdere un po' la visione d'insieme.

Queste due difficoltà si sono andate sommando, per cui alla fine ho cercato di riordinarmi le idee e recuperare una visione d'insieme delle materie raccordando cronologicamente, nel modo più accurato che mi fosse possibile, vecchie e nuove conoscenze, tra loro intimamente legate, in tema di geologia, paleontologia e paleobiologia, di fossili, di tassonomia, di filogenesi, di meccanismi evolutivi, di genetica: poiché in questi argomenti il tempo, con la coevoluzione di crosta terrestre, atmosfera, climi e dell'intera biosfera, è il fattore che per un non addetto ai lavori determina la logica esplicativa scientifica, che mi ero un po' persa.

Ma così facendo ho incontrato una terza difficoltà, una difficoltà di fondo ben più grande. I due – presumibilmente paleontologi, che ci avevano autorizzato a riprenderli – che si vedono in questa nostra fotografia, scattata nel 2014 nella Rabbit Valley, al confine tra Colorado e Utah, durante un

viaggio attraverso i grandi parchi degli USA, stavano avvolgendo con uno strato protettivo, per consentirne il trasporto senza danni, un osso di un paio di metri di lunghezza. Questo osso rappresenta un problema scientifico, perché a fronte di un reperto del genere bisogna andare alla ricerca delle altre ossa dell'animale che ha lasciato questa traccia, cercare di ricostruirlo in modo attendibile, estrapolare le parti ossee eventualmente mancanti, aggiungere una

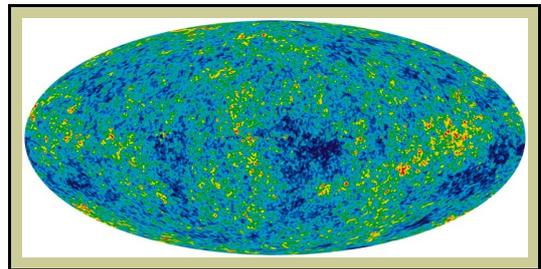


ricostruzione dei tessuti molli, che vengono persi durante la fossilizzazione, stabilire quando è vissuto, in quale contesto climatico, come si nutriva, come si riproduceva e quant'altro. Ma questi ricercatori avevano tra le mani qualcosa di consistente, un osso enorme, tecnicamente una bella "evidenza". Il problema è che via via che si torna indietro nel tempo le testimonianze degli eventi diventano sempre più scarse e di sempre più difficile interpretazione. Se prendiamo come limite

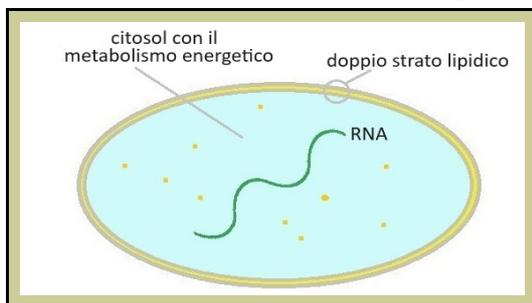
quello tra Fanerozoico e Precambriano, abbiamo 550 milioni di anni di reperti fossili, che comunque si vanno progressivamente riducendo nel tempo: ma oltre questa data abbiamo ben 4 miliardi di anni nei quali, a parte l'Ediacarano, di fossili ve ne sono proprio pochi. Quelli eventuali, a parte le stromatoliti, e appunto i fossili dell'Ediacarano, non sono delle dimensioni dell'osso della foto, ma sono, o dovrebbero essere, fossili di cellule, ovviamente quanto di meno adatto a lasciare tracce consistenti: quello che si trova sono al più minime inclusioni nei diversi strati geologici, che devono essere prima cercate, poi individuate, vagliate per distinguerle da eventuali artefatti inorganici e infine interpretate.

Ed è proprio questo che ha fatto emergere per me la terza e maggiore difficoltà. Per quattro miliardi di anni abbiamo deboli tracce e una miriade di ipotesi per trasformare queste tracce in scenari plausibili e in fenomeni evolutivi. Diciamo subito che la biochimica, e ancor più la genetica, hanno contribuito a chiarire meccanismi che rendono plausibili molte delle attuali interpretazioni della storia passata della Terra. Ma resta il fatto che, solo per citare un esempio, dei meccanismi alla base dello sviluppo della cellula eucariota esistono una decina di teorie diverse (anche se molte convergono verso un denominatore comune). Per non parlare di come la crosta terrestre si è evoluta: i dati scientifici di corrispondenza tra strati geologici e resti fossili e di cambiamento della declinazione magnetica nelle rocce, sono fondamentali, ma la storia dei continenti attraverso l'aggregazione di cratoni, la formazione e la disgregazione di continenti e di supercontinenti, diventa sempre più incerta quando si va oltre qualche centinaio di milione di anni e si arriva ai miliardi di anni fa. Lo stesso vale per quali siano state di volta in volta le cause e la durata dei periodi glaciali, per i quali anche i metodi di datazione basati sulla misura dei rapporti tra i vari isotopi, come ad esempio quelli dell'ossigeno, forniscono datazioni e si prestano a interpretazioni della loro genesi che diventano sempre più incerte ritornando indietro nel tempo.

Vorrei esprimere il concetto generale che ho ricavato da queste "scientifiche incertezze" con una analogia. Se, partendo dalle nostre osservazioni, quindi dalle condizioni attuali, e dalle attuali leggi fisiche, che sono tutto quanto conosciamo, riavvolgiamo a ritroso il



filmato dell'evoluzione del cosmo, arriviamo a questa immagine del CMB [2], il Cosmic Microwave Background, la radiazione di fondo a microonde. Da questo punto in avanti abbiamo evidenze della storia del cosmo nelle stelle, nelle galassie, nelle nubi di polvere e gas che vanno a formare nuove stelle e nuovi sistemi planetari. Ma all'indietro, oltre questo limite, non possiamo vedere. Il Big Bang è l'assunto che poniamo alla base della storia del cosmo, e il CMB il punto di partenza per il suo studio scientifico.



Lo stesso accade anche per la storia della vita. Se, partendo dalle nostre osservazioni, quindi dalle condizioni attuali, e dalle attuali leggi fisiche,

biochimiche e genetiche, che sono tutto quanto conosciamo, riavvolgiamo a ritroso il filmato dell'evoluzione della vita, arriviamo a una immagine (ipotetica) dell'antenato comune di tutte le cellule, la primissima cosa "viva". Da questo punto in poi possiamo impiegare un approccio

[2] NASA / WMAP Science Team, Public domain.
http://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/ilc_9yr_moll4096.png

scientifico e, partendo da tracce inizialmente minime per arrivare con il passare del tempo a evidenze sempre migliori, tentare di ricostruire il quadro evolutivo. Ma all'indietro, oltre questo primo "vivente", non riusciamo a vedere: abbiamo solamente indizi ricavati dalla estrapolazione al passato della fisica terrestre, della biochimica, della genetica. Non abbiamo nulla di adeguato per spiegare il salto di qualità che separa una vescicola delimitata da una membrana e contenente un ammasso di molecole in soluzione acquosa da una cellula vivente: "sappiamo" solamente che a un certo punto la vescicola è diventata "viva". La capacità della materia di auto-organizzarsi in un sistema "vivente" termodinamicamente aperto è l'assunto che poniamo alla base della storia della vita, e la cellula il punto di partenza per il suo studio scientifico.

Il fatto che le evidenze scientifiche degli antichi eventi – fondate su stratigrafia, tracce di antiche glaciazioni, dati paleomagnetici, analisi delle rocce, rapporti isotopici, reperti fossili, analisi genomiche e quant'altro – più si torna indietro nel tempo più diventano incerte, determina inevitabilmente interpretazioni alternative. Per questo quanto via via ho trovato e riportato non fornisce una descrizione monolitica, definitiva e "vera" degli eventi di un remoto passato, ma piuttosto è la presentazione di ricerche scientifiche, competenti e documentate ma in continua evoluzione, di "lavori in corso" che proprio perché tali non escludono che datazioni e ricostruzioni di autori diversi possano, nel corso delle ricerche, essere disallineate e alternative tra di loro: questo vale per la dinamica della crosta terrestre, per le glaciazioni, per i tempi dell'origine e dello sviluppo delle forme di vita, e per tutto il resto.

Insomma, anche procedendo con i piedi di piombo e indagando con metodi scientifici e tecniche all'avanguardia, è assai difficile ricostruire il passato della Terra e della vita, ed esiste nella attuale letteratura scientifica una quantità di ricerche che conducono a visioni diverse, in termini di meccanismi, di datazioni e così via: e cambiando anche lievemente gli assunti, sulla base di qualche nuova osservazione, si arriva spesso a nuove teorie. Data l'impossibilità di riportarle tutte, ho costruito questa cronistoria scegliendo tra quelle che sembrano godere attualmente di maggior credito e/o forniscono un quadro generale evolutivo tra di loro più coerente. Questo significa che anche quando non compare un punto interrogativo [?], ogni affermazione, anche se in un grado diverso per quelle riferite a tempi più recenti rispetto a quelle riferite a tempi viepiù lontani, si intende come "*probabile*" – qualcosa in cui si è propensi a credere [sulla base di dati scientifici], senza però averne certezza – o se si preferisce come preceduta da un più articolato "*sulla base delle evidenze scientifiche attualmente raccolte si ritiene che... / è stato proposto da xyz che...*", con i relativi riferimenti. Il tutto in attesa di nuovi dati, nuove evidenze, nuove teorie, nel processo mai definitivo di sviluppo della conoscenza scientifica.

Questa breve cronistoria è il risultato, spero non indegno, dello sforzo di comprensione e del lavoro di ricerca, di selezione e di ordinamento cronologico delle evidenze scientifiche più recenti. Come base per gli eoni, i periodi, le epoche, ho impiegato la **Scala Cronostratigrafica Internazionale (SCI)**, riportata qui di seguito [3]. La *International Commission on Stratigraphy (ICS)* è il più grande e più antico corpo scientifico nell'ambito della *International Union of Geological Sciences (IUGS)*. Per i possibili aggiornamenti della SCI rimando ai link ufficiali [4].

[3] *Scala Cronostratigrafica Internazionale v 2023/09*.

Credits: Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L. & Fan J.-X. (2013; aggiornato). The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204. | [PDF](#) |

<https://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2023-09Italian.pdf>

[4] International Commission on Stratigraphy.

Nel testo la datazione degli eventi è stata riportata con il segno meno (-) a indicare che si tratta di anni prima della data odierna, espressi come Ga (**G**iga **a**nni = 10^9 anni = miliardi di anni) o come Ma (**M**ega **a**nni = 10^6 anni = milioni di anni). Pur nel rispetto della sequenza cronologica dettata dalla SCI, le datazioni, date le incertezze dichiarate nella Scala Cronostratigrafica Internazionale, sono state riportate con al massimo tre cifre significative, con la sola eccezione della data di inizio della storia geologica della Terra, fissata a 4,567 miliardi di anni fa.

Infine ho riportato il simbolo |PDF| accanto al titolo dei lavori scientifici e dei documenti accessibili gratuitamente (*open-source*) e che possono essere scaricati liberamente in questo formato.

<https://stratigraphy.org/>
<https://stratigraphy.org/chart>

1.

ADEANO

da - 4,567 Ga a - 4,03 Ga [5]

	Eone	Era	Ga	Eventi
Precambriano	Adeano		- 4,567 - 4,5 - 4,4 - 4,3 - 4,1 - 4,1	Inizio della storia geologica della Terra Si origina la Luna e si forma l'atmosfera Inizia la formazione degli oceani Si realizzano le condizioni minime per lo sviluppo della vita [?] Termina la formazione degli oceani Inizia l'Intenso Bombardamento Tardivo
	Termina l'eone Adeano		- 4,03	Inizia l'eone Archeano
	Archeano	Eoarcheano	- 3,8	Termina l'Intenso Bombardamento Tardivo

[5] L'eone è la suddivisione della scala dei tempi geologici di rango superiore. I primi tre eoni, **Adeano**, **Archeano**, **Proterozoico**, sono stati definiti solamente in epoca relativamente recente per cui ancor oggi spesso per semplicità sono collettivamente indicati con la denominazione tradizionale di *Precambriano*, che era in passato impiegata per indicare tutto il tempo precedente il primo periodo, il periodo *Cambriano*, di quello che è diventato il quarto e ultimo eone (**Fanerozoico**), quello in cui – pur con l'intermezzo di cinque grandi estinzioni – si è definitivamente sviluppata la vita sulla Terra e nel quale viviamo.

L'**Adeano** segna il confine tra la storia del cosmo e la storia del nostro pianeta.

Per milioni di anni le prime stelle che si sono formate nel neonato universo hanno bruciato l'idrogeno (${}^1\text{H}$) e l'elio (${}^2\text{He}$), il materiale cosmico primordiale, l'unico combustibile disponibile, nel processo di nucleosintesi che porta alla formazione degli elementi più pesanti [6] – carbonio (${}^6\text{C}$), azoto (${}^7\text{N}$), ossigeno (${}^8\text{O}$), sodio (${}^{11}\text{Na}$), fosforo (${}^{15}\text{P}$), zolfo (${}^{16}\text{S}$), cloro (${}^{17}\text{Cl}$), potassio (${}^{19}\text{K}$), calcio (${}^{20}\text{Ca}$) – e dei loro isotopi. Fino alla produzione del ferro (${}^{26}\text{Fe}$) la gravità, che tende a compattare una stella, e la pressione del gas e della radiazione dovute alle reazioni nucleari che avvengono a suo interno, che tendono a farla espandere, sono in equilibrio tra loro e la stella risulta stabile.

Ma in una stella la fusione nucleare, quando è arrivata al ferro, non può procedere oltre: terminato il suo combustibile la stella inizia a raffreddarsi, la pressione verso l'esterno diminuisce e quando arriva a un livello critico la gravità prende improvvisamente il sopravvento, la stella collassa ed esplose in una supernova [7][8]: le imponenti reazioni di fusione nucleare che generano l'esplosione producono gli elementi più pesanti del ferro, che con tutti gli altri vengono disseminati nel cosmo.

"Durante la vita della nostra galassia, la Via Lattea, ci sono stati qualcosa come 100 milioni di esplosioni di Supernova, che hanno arricchito la galassia con l'ossigeno che respiriamo, il ferro delle nostre auto, il calcio delle nostre ossa e il silicio delle rocce sotto i nostri piedi" [9].

APPROFONDIMENTO

La documentazione di una supernova storica

La "nuova" stella descritta dagli astronomi cinesi e comparsa nel cielo nel 1054, che rimase visibile per quasi due anni, era una *supernova*: i suoi resti sono rappresentati oggi dalla *Nebulosa del Granchio*, riportata nella spettacolare immagine [10] realizzata dall'Hubble Space Telescope nella quale si vede la materia scagliata nello spazio dall'esplosione – e contenente gli elementi riportati sopra – che oggi continua ad espandersi alla velocità di circa 1 500 chilometri al secondo.

La Nebulosa del Granchio è localizzata nella nostra galassia, la *Via Lattea*: dista circa 6 500 anni luce dal Sole, quindi gli astronomi cinesi videro l'esplosione che si era verificata circa 6 500 anni prima. La nebulosa può essere osservata anche con strumenti amatoriali poco potenti e per

[6] Fred Hoyle. *The Synthesis of the Elements from Hydrogen*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 106, Issue 5, October 1946. | [PDF](#) |

<https://doi.org/10.1093/mnras/106.5.343>

[7] Andrea Pastorello. *Supernove: quando esplodono le stelle*. Media Inaf. Il notiziario online dell'Istituto nazionale di astrofisica.

<https://www.media.inaf.it/2017/07/07/supernove/>

[8] *Supernova*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Supernova>

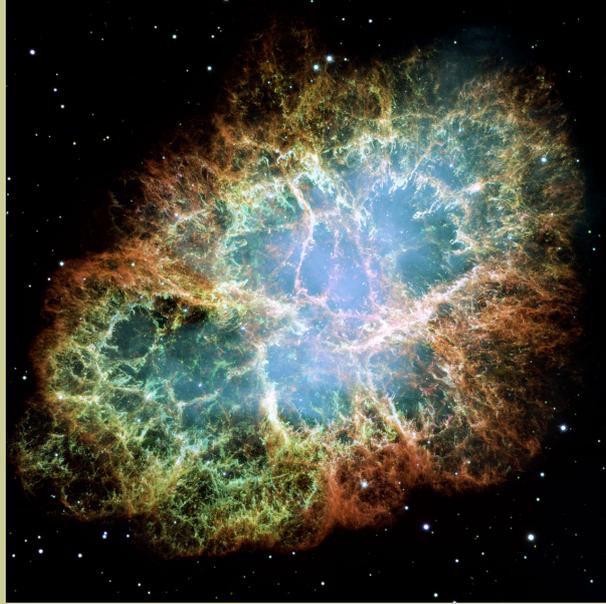
[9] Burrows A. *Supernova explosions in the Universe*. Nature 403, 727–733 (2000).

<https://doi.org/10.1038/35001501>

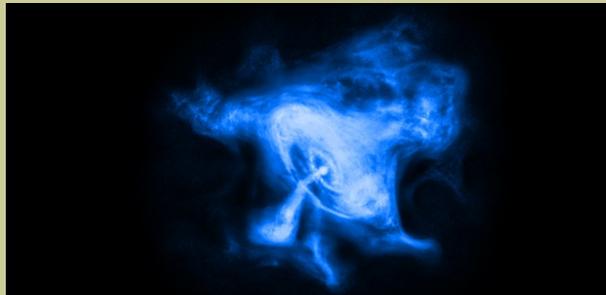
[10] *Most detailed image of the Crab Nebula*. Credits: ESA/Hubble.

<https://esahubble.org/images/heic0515a/>

questo era già stata osservata in passato e venne inserita alla fine del 1700 da Messier [11] con il numero 1 nel suo catalogo (*Catalogo di Messier*): oggi viene spesso citata come M1.



Al suo centro si trova una *stella di neutroni* in cui si è condensata tutta la materia residua della stella che è esplosa, che in rapida rotazione sé stessa emette radiazione elettromagnetica sotto forma di impulsi molto frequenti e regolari. Il *Chandra X-ray Observatory* della NASA ha riportato questa immagine del centro della Nebulosa del Granchio [12]



nella quale l'emissione di raggi-X delinea i getti di materia e antimateria che si generano e si muovono attorno alla stella di neutroni a velocità prossima a quella della luce.

Generazioni di stelle si sono quindi succedute l'una all'altra per miliardi di anni arricchendo il cosmo delle molecole necessarie alla vita, quando l'onda d'urto generata dall'esplosione di una supernova investe una nube di polveri e di gas che si mette in rotazione formando a - 4,6 Ga la

[11] Charles Messier (Badonviller, 26 giugno 1730 - Parigi, 12 aprile 1817).

[12] 509582main_crab_chandra. Credits: NASA.

https://www.nasa.gov/image-detail/509582main_crab_chandra/

nebulosa proto-solare [13], un disco che si evolverà nel nostro sistema solare [14]. Un'idea dell'evento ce la fornisce una spettacolare immagine dell'Hubble Space Telescope nella quale si vedono nubi di polveri e gas della *Nebulosa dell'Aquila*, che si trova nella *Via Lattea*, la nostra galassia, a circa 7 000 anni luce di distanza dalla Terra[15].



Nella nebulosa dell'Aquila, nota anche come M 16 o NGC 6611, è stato documentato essere in corso la formazione di nuove stelle [16] alcune o molte delle quali potrebbero diventare il centro di nuovi sistemi planetari.

Ma siamo arrivati, in termini cosmologici, all'ultimo atto: la Scala Cronostratigrafica Internazionale pone ufficialmente l'inizio della storia geologica della terra e dell'eone **Adeano** a - 4,567 Ga: è l'ora zero della giornata che immaginiamo racchiuda la storia della Terra se ne fissiamo la mezzanotte al giorno d'oggi, sono le 24 ore che raccontano l'intera storia della Terra e della vita.



Il nostro orologio segna le 0:39 della notte quando a - 4,5 Ga si verifica un gigantesco impatto con un protopianeta del sistema solare di dimensioni probabilmente simili a quelle di Marte [17] e che porta alla formazione della Luna.

[13] ScienceDirect. *Solar nebula*.

<https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/solar-nebula>

[14] *Solar System: Facts*. Credits: NASA.

<https://science.nasa.gov/solar-system/facts/>

[15] *Messier 16*. Image credits: NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

<https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/explore-the-night-sky/hubble-messier-catalog/messier-16/>

[16] *The Eagle's EGGs*. VLT ISAAC Looks for Young Stars in the Famous "Pillars of Creation". Credits: ESO.

<https://www.eso.org/public/news/eso0142/>

[17] Canup Robin & Asphaug E. (2001). *Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation*. *Nature*, 412(6848):708-12. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/11836942>

Recenti simulazioni dei moti convettivi che avvengono all'interno del mantello terrestre suggeriscono che due anomalie delle dimensioni di un continente, rivelate dalle immagini sismiche dell'interno della Terra, rappresentano probabilmente i residui sepolti del materiale del mantello di **Theia** – così è stato denominato il protopianeta che si è scontrato con la Terra – che si sono letteralmente conficcati nel proto-mantello della Terra dopo il gigantesco impatto, mentre la parte rimanente di Theia ha formato la Luna [18].

A - 4,5 Ga la Terra è allo stato di magma ed è priva di atmosfera perché la bassa gravità e le elevate temperature non hanno consentito di trattenere l'atmosfera primaria formata dai gas – principalmente idrogeno (H₂) ed elio (He), ma anche acqua (H₂O), metano (CH₄), ammoniaca (NH₃) – della nube primordiale.

L'impatto con Theia causa sulla Terra temperature attorno ai 2 000 °C, che fanno evaporare i silicati, che però rapidamente si raffreddano e precipitano lasciando un'atmosfera secondaria estremamente densa formata prevalentemente da vapore d'acqua e anidride carbonica di origine endogena, prodotti per degassamento del magma [19]. Per forse duecento milioni di anni la situazione rimane fumosa: in senso letterale, perché la Terra è circondata da una cortina quasi impenetrabile di vapore acqueo e anidride carbonica (CO₂) con pressioni atmosferiche dell'ordine della centinaia di bar, quindi centinaia di volte quella attuale (che è circa 1 bar); e in senso figurato, perché il dettaglio dei meccanismi e le datazioni di questi primissimi eventi sono destinati a rimanere per sempre incerti.

Peraltro l'atmosfera si va modificando: secondo alcuni per il contributo determinante dell'intenso vulcanismo, che oltre a H₂O e CO₂ rilascia azoto (N₂) con piccole quantità di H₂ e ossido di carbonio (CO); secondo altri anche perché si vanno aggiungendo H₂, N₂, NH₃ e CH₄ provenienti dalle condriti, il principale materiale roccioso – che oggi troviamo nei meteoriti – di cui sono formati i planetesimi che hanno dato origine a pianeti e asteroidi e che in questa fase continuamente bombardano la Terra; infine per trasformazioni chimiche come – in assenza del filtro assicurato dallo strato di ozono – la degradazione di metano e ammoniaca da parte dei raggi ultravioletti che portano rispettivamente alla produzione di altra CO₂ e di altro N₂ [20]. Le incertezze che permangono derivano dal fatto che sono solo le rocce a conservare le tracce della primitiva atmosfera e che, a causa dell'evoluzione della crosta terrestre, le rocce risalenti a - 4,0 Ga o precedenti sono scomparse [21]. Oggi si concorda sul fatto che queste progressive trasformazioni portano al termine dell'eone a una atmosfera anossica, priva di ossigeno, composta in prevalenza da CO₂ e da N₂ [22].

[18] Yuan Q., Li M., Desch S.J. et al. *Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies*. Nature 623, 95–99 (2023).

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06589-1>

[19] Paul J. Wallace, Terry Plank, Marie Edmonds, Erik H. Hauri. *Chapter 7 - Volatiles in Magmas*. Editor(s): Haraldur Sigurdsson. *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition), Academic Press, 2015, Pages 163-183, ISBN 9780123859389.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123859389000079>

[20] Zahnle K, Schaefer L, Fegley B. *Earth's earliest atmospheres*. Cold Spring Harb Perspect Biol. 2010 Oct;2(10):a004895. doi: 10.1101/cshperspect.a004895. | **PDF** |

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2944365/>

[21] Hastie A.R., Law S., Bromiley G.D. et al. *Deep formation of Earth's earliest continental crust consistent with subduction*. Nat. Geosci. 16, 816–821 (2023). | **PDF** |

<https://www.nature.com/articles/s41561-023-01249-5>

[22] Bernard Marty, Guillaume Avice, Yuji Sano, Kathrin Altwegg, Hans Balsiger, et al. *Origins of volatile*

Nel frattempo il magma superficiale si va consolidando e si va formando una iniziale sottile crosta terrestre. Il calore irradiato va diminuendo e attorno a - 4,4 Ga la temperatura superficiale scende attorno a 350 °C, cosa che, grazie a una pressione atmosferica elevatissima dell'ordine delle centinaia di bar, consente al vapore d'acqua contenuto nell'atmosfera di condensare e di precipitare. Inizia, con un vero e proprio diluvio durato forse un migliaio di anni, la formazione degli oceani [23]. In questa fase la miscela H₂O/CO₂ si trova in uno stato supercritico [24] e in parte precipita andando a formare le prime rocce carbonatiche: inizia quindi il processo di rimozione della CO₂ dall'atmosfera [25].



Ma la temperatura dell'acqua continua ad essere troppo elevata anche per un eventuale sviluppo di microrganismi estremofili e solamente a circa - 4,3 Ga, quando la temperatura è scesa tra i 110 °C e i 60 °C, proprio nell'acqua dell'oceano primordiale si ritiene possibile che si siano realizzate le condizioni minime per la comparsa della vita [26].

Il nostro orologio segna le ore 2:06 dall'inizio dell'Adeano quando la formazione degli oceani si conclude e il raffreddamento del magma consente il consolidamento di un minimo di crosta oceanica attorno a - 4,1 Ga, con l'uno o l'altro di questi possibili due scenari (immagine alla pagina seguente):

- crosta oceanica, oceani poco profondi e assenza di terre emerse come sostengono alcuni **(a)**;
- terre emerse che altri assumono essere state possibili ma probabilmente limitate a isole oceaniche, disperse nella distesa di acqua oceanica poco profonda che quasi tutto ricopre **(b)** [27].

L'ipotesi della presenza di isole è importante in quanto funzionale ad un'ipotesi ulteriore: che la vita si sia sviluppata in un ambiente terrestre, in piccoli stagni caldi – i "warm little ponds" citati da Darwin [28] – diffondendosi poi da questi agli oceani. Questa ipotesi viene oggi valutata in

elements (H, C, N, noble gases) on Earth and Mars in light of recent results from the ROSETTA cometary mission. Earth and Planetary Science Letters, 2016, ff10.1016/j.epsl.2016.02.031ff. | **PDF** |

<https://hal.science/hal-01345988/document>

[23] Pinti D.L. (2005). *The Origin and Evolution of the Oceans*. In: Gargaud M., Barbier B., Martin H., Reisse J. *Lectures in Astrobiology. Advances in Astrobiology and Biogeophysics*. Springer, Berlin, Heidelberg. | **PDF** |

<https://www.researchgate.net/publication/225807338>

[24] *Supercritical fluid*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Supercritical_fluid

[25] Lin-gun Liu. *The inception of the oceans and CO₂-atmosphere in the early history of the Earth*. Earth and Planetary Science Letters, Volume 227, Issues 3–4, 2004, Pages 179-184, ISSN 0012-821X.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X04005345>

[26] "Earth has been habitable for 4.3 billion years, and the earliest rock record indicates the presence of a microbial biosphere by at least 3.4 billion years ago - and disputably earlier".

Javaux E.J. *Challenges in evidencing the earliest traces of life*. Nature 572, 451–460 (2019).

<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1436-4>

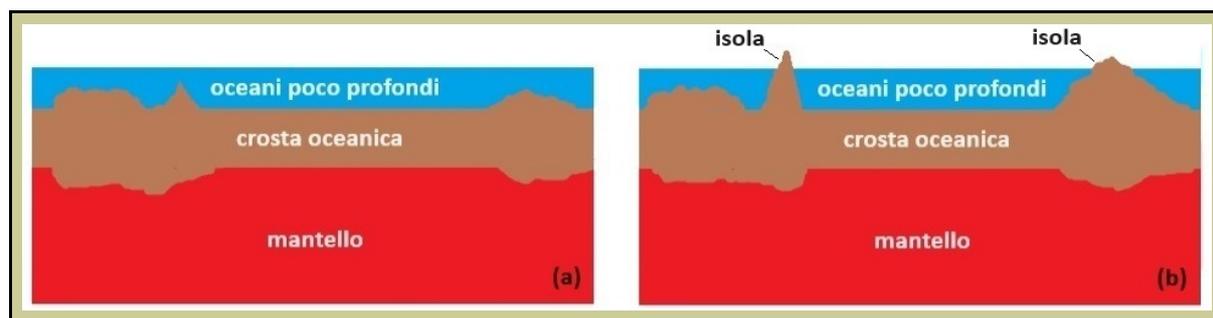
[27] Korenaga J. *Was There Land on the Early Earth?* Life (Basel). 2021 Oct 26;11(11):1142. | **PDF** |

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8623345/>

[28] Lettera a J. D. Hooker, 1 febbraio 1871

<https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docId=letters/DCP-LETT-7471.xml>

alternativa ad un'altra: che la vita invece si sia sviluppata attorno alle "fumarole", sorgenti idrotermali di origine vulcanica sul fondo dell'oceano primordiale, come vediamo tra poco.



Da notare che il vulcanismo, che ha contribuito a formare e modificare l'atmosfera, genera in piccole quantità anche una serie di altri gas: zolfo sotto forma di anidride solforosa (SO_2) e di acido solfidrico (H_2S), cloruro di idrogeno (HCl), fluoruro di idrogeno (HF), bromuro di idrogeno (HBr), solfuro di carbonile (OCS), esafluoruro di zolfo (SF_6), idrocarburi alogenati. Questi composti sono molto importanti in quanto contribuiscono a forgiare un ambiente con la reattività chimica necessaria per generare le molecole organiche che precedono la comparsa della vita [29].

Di recente è stato dimostrato che il vulcanismo contribuisce anche con una molecola la cui disponibilità si faceva fatica a spiegare, l'acido fosforico, che sotto forma di *fosfato* è presente in due eventi cruciali:

→ aggiunto a un nucleoside forma un nucleotide, il monomero alla base di DNA e RNA, e lega tra loro i nucleotidi nelle catene che formano gli acidi nucleici;

→ forma i legami chimici ad alta energia che immagazzinano nella molecola di ATP l'energia che, liberata per idrolisi, viene impiegata per le esigenze metaboliche:

"Il fosforo svolge un ruolo assolutamente importante in tutte le forme di vita ... tuttavia, la disponibilità dei fosfati nella chimica prebiotica è stata messa in discussione ... la maggior parte del fosforo sulla terra primitiva era insolubile in acqua ed esisteva sotto forma di apatite ... studi hanno rivelato che l'attività vulcanica può provocare la formazione di polifosfati idrosolubili, come il trimetafosfato (P_3m) ... il P_3m , in quanto agente di condensazione significativo nella chimica prebiotica, mostra una capacità di condensazione superiore e una maggiore solubilità in acqua rispetto ad altri agenti di condensazione, rafforzando la teoria secondo cui la vita ha avuto inizio nell'oceano [o] in una pozza poco profonda" [30].

La Terra è ancora bombardata da bolidi che contribuiscono a disegnarla [31]. Si tratta di un fenomeno che coinvolge peraltro tutti i corpi del sistema solare: questo ad esempio – fotografato

[29] Vedere ad esempio il capitolo "Evoluzione chimico-organica abiogena dei composti del carbonio" in Oparin: *The origin of life on the Earth*. Third Revised and enlarged edition. Translated from the Russian by Ann Synge. Academic Press Inc., Publishers. New York. 1957. | PDF |

<https://www.redstarpublishers.org/originoflifeOrig.pdf>

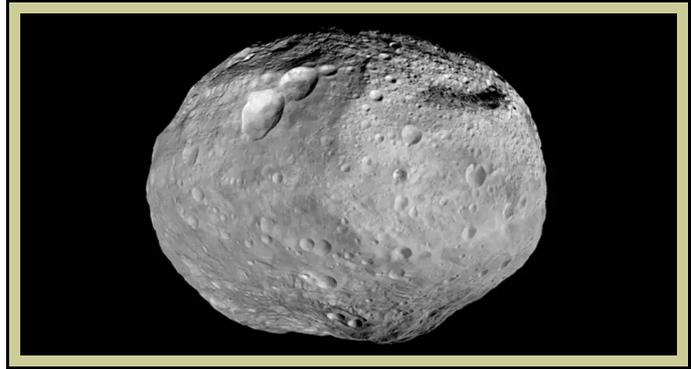
[30] Gan D, Ying J, Zhao Y. Prebiotic Chemistry: *The Role of Trimetaphosphate in Prebiotic Chemical Evolution*. Front Chem. 2022 Jul 13;10:941228. doi: 10.3389/fchem.2022.941228. PMID: 35910738; PMCID: PMC9326000. | PDF |

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9326000/>

[31] Maura Sandri. *Così gli asteroidi disegnarono la Terra*. Media Inaf. Il notiziario online dell'Istituto nazionale di astrofisica.

<https://www.media.inaf.it/2022/08/12/impatti-meteoriti-continenti/>

dalla sonda Dawn, che lo ha studiato dal luglio 2011 al settembre 2012 – è Vesta, un asteroide di soli (circa) 500 km di diametro, che come la Luna e come tutti gli asteroidi finora fotografati conserva indelebili i segni degli impatti primordiali [32].



E al termine dell'Adeano a - 4,1 Ga inizia per la Terra l'*Intenso Bombardamento Tardivo* [33] – la cui esistenza è stata dedotta dalle analisi sulle rocce lunari raccolte nel corso delle missioni Apollo – del quale vediamo le vestigia nei crateri

sulla superficie della Luna. Durerà circa 300 milioni di anni durante i quali corpi celesti ricchi di acqua che investono la Terra ne aggiungono molta altra a quella già presente negli oceani [34][35].

RIASSUMENDO

Nell'**Adeano** abbiamo i primi quattro passi fondamentali sul percorso che porterà alla realizzazione della nostra casa nell'Universo:

- formazione della crosta terrestre;
- sviluppo di una atmosfera;
- formazione degli oceani;
- realizzazione delle condizioni minime per la comparsa della vita.

Manca un ultimo passo: l'evidenza di segni di vita.

[32] *Full View of Asteroid Vesta*. Image credit: NASA/JPL-Caltech.

<https://www.nasa.gov/image-article/full-view-of-asteroid-vesta/>

[33] Gomes R, Levison H, Tsiganis K, et al. *Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets*. Nature 435, 466–469 (2005).

<https://doi.org/10.1038/nature03676>

[34] Francois Robert. *The Origin of Water on Earth*. Science 293, 1056-1058 (2001). | PDF |

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1064051>

<https://courses.seas.harvard.edu/climate/eli/Courses/EP281r/Sources/Origin-of-oceans/more/>

[35] *Origin of water on Earth*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Origin_of_water_on_Earth

2.

ARCHEANO

da - 4,031 Ga a - 2,5 Ga

	Eone	Era	Ga	Eventi / Fossili	
Precambriano	Adeano		- 4,1	Inizia l'Intenso Bombardamento Tardivo	
	Termina l'eone Adeano		- 4,03	Inizia l'eone Archeano	
	Archeano	Eoarcheano		- 3,8	Termina l'Intenso Bombardamento Tardivo Inizia la formazione su larga scala di cratoni
		Paleoarcheano		- 3,43	Tracce della prima biosfera microbica e dei batteri fotosintetici / <i>Stromatoliti</i>
				- 3,2	Si va riducendo la formazione di cratoni
		Mesoarcheano		- 3,0 - 2,9	Emergere diffuso di crosta continentale Tracce di una possibile prima glaciazione (Pongola) durata circa 0,1 Ga
	Neoarcheano		- 2,9 - 2,5	Stabilizzazione dei cratoni maggiori e loro assemblaggio in supercratoni	
Termina l'eone Archeano		- 2,5	Inizia l'eone Proterozoico		

All'inizio dell'eone **Archeano** a - 3,8 Ga termina l'Intenso Bombardamento Tardivo. A partire da questo momento la situazione negli oceani diventa più favorevole allo sviluppo della vita mentre la crosta terrestre si va evolvendo.

Oggi sappiamo che la **litosfera**, la parte esterna più rigida del pianeta, comprendente la *crosta terrestre* e la porzione più superficiale del mantello esterno, è frammentata in *placche tettoniche*, letteralmente zattere che "galleggiano" sullo strato immediatamente sottostante del mantello, l'*astenosfera*, che pur essendo allo stato solido si comporta come un fluido a elevata viscosità. Inoltre nuova crosta viene continuamente creata lungo le dorsali oceaniche mentre la crosta in eccesso scompare lungo le fosse oceaniche [36].

Questi due processi hanno portato nei quattro miliardi di anni che ci separano dall'inizio dell'Archeano a un continuo rimaneggiamento, che prosegue tuttora, della morfologia e della estensione delle terre emerse, per avvicinamento o allontanamento delle placche tettoniche e per creazione o distruzione di crosta terrestre, rimaneggiamento che su una scala di tempi geologica, dell'ordine delle decine e delle centinaia di milioni di anni, è in grado di determinare cambiamenti imponenti nella forma e distribuzione dei continenti [37].

I **cratoni**, le parti più antiche, rigide e stabili della crosta terrestre, sono i primi ad emergere quando la situazione della superficie terrestre è simile a quella riportata in questa ricostruzione e altra crosta continentale attende di emergere. Alcuni tra i più antichi – il *Kaapvaal* attualmente localizzato in Sudafrica, e il *Pilbara*, attualmente localizzato in Australia – emergono probabilmente a - 3,8 Ga, agli inizi di un periodo di formazione di cratoni su larga scala che sembra essere durato fino a - 3,2 Ga. La crosta terrestre si sta trasformando.



"La crosta continentale formatasi nell'eone Archeano (2,5 miliardi di anni o più) costituisce oggi meno del 3% della superficie terrestre, ma tutti i continenti contengono crosta di questa età ... Questi antichi blocchi di crosta, comunemente ricoperti da sequenze stratigrafiche lunghe e ininterrotte, sono noti come cratoni e comprendono la litosfera coerente più antica della Terra. Sono caratterizzati da una deformazione penetrativa, un magmatismo calcio-alcalino o un metamorfismo minimi o nulli per centinaia di milioni di anni ... Geofisicamente, i cratoni rappresentano un sistema accoppiato crosta-mantello in cui alla base della crosta dell'Archeano si

[36] Plate tectonics.

https://en.wikipedia.org/wiki/Plate_tectonics

[37] Santosh, M. *Evolution of Continents, Cratons and Supercontinents: Building the Habitable Earth*. Current Science, vol. 104, no. 7, 2013, pagg. 871–79. JSTOR. | PDF |

<http://www.jstor.org/stable/24092100>

trova uno spesso (> 150 km) zoccolo di mantello litosferico ... I cratoni conservano un'importante documentazione sulla formazione e crescita della crosta, forniscono la documentazione più antica dei processi che hanno portato a una Terra differenziata e consentono osservazioni geologiche critiche per testare modelli teorici dell'evoluzione primordiale della Terra" [38].

APPROFONDIMENTO

Formazione e sviluppo della crosta terrestre [39]

Iniziazione e formazione della Terra (4,57 - 4,45 Ga)

Il collasso gravitazionale di una nube molecolare nella nebulosa solare, dalla quale nell'arco di pochi milioni di anni si formano sole, pianeti e planetesimi, inclusa la proto-Terra, è datato - 4,567 Ga dal decadimento di ^{238}U e ^{235}U a ^{206}Pb e ^{207}Pb e di inclusioni di Ca-Al nelle condriti carbonacee meteoriche [40]. Fino a 4,45 Ga la superficie terrestre è in gran parte roccia fusa.

Formazione della crosta mafica e formazione iniziale della crosta felsica ca. 4,45 - 3,80 Ga

Le rocce formatesi in questo periodo sono state in gran parte riciclate nel mantello o distrutte durante gli impatti dei meteoriti. La conoscenza di questo periodo deriva dall'analisi di resti di crosta di questa età eccezionalmente rari e spazialmente ristretti (da km a decine di metri) – rocce felsiche (da feldspato e silice, sono minerali ricchi di elementi leggeri come il silicio, l'ossigeno, l'alluminio, il sodio e il potassio) – e dai corpi nel sistema solare che preservano intatti la crosta e il mantello primordiali (meteoriti, Marte e Luna). Si formano oceani ed atmosfera, e si realizzano le condizioni minime per lo sviluppo della vita.

Formazione di cratoni su larga scala a ca. 3,8 - 3,2 Ga

Tra 3,8 - 3,2 Ga si ha la formazione su larga scala di cratoni. Le successioni di roccia verde nei cratoni Pilbara e Kaapvaal, generate da molteplici cicli di attività vulcanica e di sedimentazione estesi per centinaia di milioni di anni, e che raggiungono uno spessore fino 1 000 metri, sono una delle testimonianze di questa epoca di formazione su larga scala di cratoni. Le rocce sedimentarie sono una componente relativamente minore all'interno della successione vulcanica delle cinture di roccia verde, ma implicano l'emergere dei cratoni in cui si trovano e forniscono prove dell'azione di agenti atmosferici (erosione) con conseguenze per l'evoluzione chimica dell'atmosfera e dell'oceano. Inoltre, queste associazioni sedimentarie vulcaniche contengono le prime prove dello sviluppo di forme di vita produttrici di ossigeno e metano.

[38] Carol D. Frost, Paul A. Mueller, David W. Mogk, B. Ronald Frost, Darrell J. Henry. *Creating Continents: Archean Cratons Tell the Story*. GSA today. Vol.33, n. 1, January 2023. | PDF |

<https://rock.geosociety.org/net/gsatoday/science/G541A/GSATG541A.pdf>

[39] Peter A. Cawood, Priyadarshi Chowdhury, Jacob A. Mulder, Chris J. Hawkesworth, Fabio A. Capitanio, Prasanna M. Gunawardana, Oliver Nebel. *Secular Evolution of Continents and the Earth System*. First published: 07 December 2022 <https://doi.org/10.1029/2022RG000789>. | PDF |

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022RG000789>

[40] J.N. Connelly, J. Bollard, M. Bizzarro. *Pb–Pb chronometry and the early Solar System*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 201, 2017, Pages 345-363, ISSN 0016-7037. | PDF |

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.10.044>

Stabilizzazione dei cratoni a 3,2 - 2,5 Ga

Termina il magmatismo cratonico. Le forze tettoniche che finora hanno agito sulla crosta terrestre verticalmente si trasformano in forze che agiscono orizzontalmente, fornendo la spinta che consentirà la deriva di cratoni e continenti. L'ispessimento e la stabilizzazione della litosfera cratonica in questo periodo determina l'emergere diffuso di crosta continentale, che a sua volta influenza la composizione atmosferica e oceanica attraverso l'erosione e il deflusso di nutrienti nell'oceano, con successivi effetti sulla biosfera. I depositi terrestri e marini poco profondi del Mesoarcheano (ca. 3,1 - 3,0 Ga), di vasta estensione, come quelli depositati sulla crosta dei cratoni Singhbhum e Kaapvaal, segnano la diffusa presenza di terre emerse stabili. Compaiono evidenze di un vasto riciclo della crosta terrestre più antica. Il tardo Archeano corrisponde alla stabilizzazione dei cratoni maggiori e al loro assemblaggio in supercratoni.

Dispersione dei cratoni e assemblaggio continentale iniziale a 2,5 – 1,8 Ga

Il passaggio dall'Archeano al Proterozoico segna una transizione importante nell'evoluzione del sistema Terra. I presunti supercratoni del tardo Archeano, variamente chiamati Superia, Sclavia, Kenor e Vaalbara, si disgregano nei cratoni costituenti più piccoli che riconosciamo oggi – come Pilbara, Kaapvaal, Yilgarn, Zimbabwe e i cratoni Superiori, gli scudi Aldan e Anabar in Siberia e i blocchi archeani di Baltica e India – che vanno incontro poi a fenomeni di convergenza e di assemblaggio, a loro volta alla base della successiva formazione del primo supercontinente, noto come Columbia (o Nuna o Hudsonlandia).

Apparente stabilità globale di gran parte del sistema terrestre a ca. 1,8 - 0,8 Ga

Anche se nel periodo che va dal tardo Paleo-proterozoico intorno a 1,8 Ga al Neo-proterozoico a ca. 0,8 Ga si ha una fase relativa stabilità, i dati paleomagnetici e geologici documentano significativi movimenti relativi delle placche e attività di orogenesi. Avvengono l'assemblaggio del supercontinente Columbia (Nuna) e la disgregazione del successivo supercontinente Rodinia. Ci sono prove di una collisione continente-continente tra l'Australia orientale-Antartide e la Laurentia occidentale a ca. 1,60 Ga, e di un'ampia separazione tra Australia e Laurentia a ca. 1,20 Ga.

Si stabilisce la moderna tettonica a placche a partire da 0,8 Ga.

Nel 2006 in Australia, in una roccia sedimentaria del cratone di Pilbara che risale al **Paleoarcheano**, la "*Strelley Pool Chert*" [41], poi ridenominata "*Strelley Pool Formation*", viene rilevata la presenza di *Stromatoliti* che risalgono a - 3,43 Ga [42]. Sono trascorsi quasi 900 milioni di anni da quando si sono probabilmente realizzate le condizioni minime per l'origine della vita e il fondo marino

[41] La "chert" è la selce, una roccia sedimentaria a grana fine composta da quarzo microcristallino o criptocristallino, la forma minerale del biossido di silicio (SiO₂).

[42] Allwood A., Walter M., Kamber B. et al. *Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia*. Nature 441, 714–718 (2006).

<https://doi.org/10.1038/nature04764>

Abigail C. Allwood, Malcolm R. Walter, Ian W. Burch, Balz S. Kamber. *3.43 billion-year-old stromatolite reef from the Pilbara Craton of Western Australia: Ecosystem-scale insights to early life on Earth*. Precambrian Research, Volume 158, Issues 3–4, 2007, Pages 198-227, ISSN 0301-9268.

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.013>

raggiunto dalla luce del sole è ora rivestito da un tappeto di cianobatteri che ricavano la loro energia dalla fotosintesi.



La precipitazione, sulla mucillagine prodotta dal tappeto di cianobatteri, di sali inorganici (prevalentemente carbonati), la nascita di un nuovo tappeto di cianobatteri, una nuova precipitazione di sali e così via, porta alla formazione della successione degli strati caratteristica delle *Stromatoliti* visibile qui sotto in una sezione longitudinale [43].

Il nostro orologio segna le 6 del mattino e la comparsa delle stromatoliti è l'evento che documenta l'alba della vita.

APPROFONDIMENTO

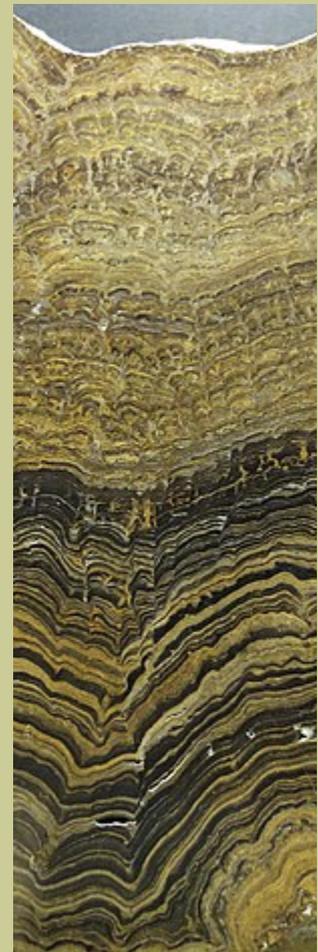
Il Precambriano, i dubbi di Darwin e le stromatoliti

Scrivendo Darwin:

"Sebbene oggi sappiamo che gli esseri viventi apparvero su questa terra in un periodo incalcolabilmente remoto, molto prima del depositarsi di strati inferiori del sistema cambriano, perché non troviamo sotto questo sistema grandi cumuli di strati contenenti i resti degli antenati dei fossili del cambriano? Infatti, in base a questa teoria, tali strati devono essere stati depositati da qualche parte in quelle epoche lontane e completamente sconosciute della storia della terra. Posso rispondere a queste questioni e obiezioni solo supponendo che i documenti geologici siano molto più incompleti di quanto non creda la maggior parte dei geologi" [44].

Ecco come Prothero riporta la scoperta di un reperto geologico cruciale:

"Nel 1859, quando Charles Darwin pubblicò L'origine delle specie, l'assenza di reperti era un punto debole della sua tesi. E neppure erano noti significativi fossili di transizione ... La prima scoperta decisiva fu l'Archaeopteryx, nel 1861. Ancora più preoccupante era l'assenza di fossili risalenti al tempo che precedeva il Cambriano (primo periodo dell'Era paleozoica, circa 550 milioni di anni fa). Ovviamente, a metà del XIX secolo dati e documenti sui fossili erano poco diffusi e solo da sei decenni gli studiosi ne indagavano in dettaglio la successione. In ogni caso, Darwin era sconcertato dal fatto che nei pochi letti 'precambriani' non vi fossero resti che mostrassero la transizione dagli



[43] Particolare tratto dall'immagine: Daderot, CCO, da Wikimedia Commons.

Stromatolite_-_National_Museum_of_Nature_and_Science,_Tokyo_-_DSC07686.JPG

Per questa e molte altre immagini di stromatoliti vedere:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Stromatolites>

[44] Charles Darwin (1872), pag. 530.

animali più semplici ai trilobiti e agli altri organismi del Cambriano... Darwin attribuì questa sconcertante assenza di fossili alla "imperfezione della colonna stratigrafica" e all'improbabile eventualità che la maggior parte degli organismi non si fossilizzasse. In gran parte aveva ragione. Manifestò i suoi dubbi alla comunità scientifica, che nel corso del secolo successivo tentò disperatamente di trovare qualsiasi tipo di reperto più antico dei trilobiti ... Molti geologi conoscevano già i problemi relativi alle ricerche di resti risalenti al Precambriano. Le rocce di quel periodo sono così antiche da trovarsi quasi tutte a profondità estreme, e spesso le forti pressioni e il calore le hanno trasformate in rocce metamorfiche, distruggendo tutto ciò che custodivano; anche l'erosione, inoltre, ha fatto la sua parte. Laddove sembrano relativamente ben conservate, sono sepolte sotto spessi strati più recenti e quasi ovunque, sulla Terra, le esposizioni sono molto limitate. Tutti questi fattori hanno contribuito alla difficoltà di reperire fossili di questo periodo, diversamente da quanto avviene per le Ere geologiche successive. E c'è dell'altro. Si è scoperto che le condizioni ambientali del Precambriano (in particolare, ossigeno scarso o assente e nessuno strato di ozono) possono aver impedito per molto tempo agli organismi primordiali di formare gusci o altre parti dure. In realtà, per 2 miliardi di anni il mondo fu dominato da un 'manto' di batteri e (molto dopo) alghe, che crescevano in acque poco profonde lungo le coste o nelle piane tidali e ricoprivano le rocce. Quindi in realtà esistono fossili precambriani, solo che sono quasi tutti minuscoli e non possono essere visti senza polverizzare con cura sottili sezioni di pietra su un vetrino da microscopio. Per un geologo sul campo rimangono inaccessibili ...

Nel 1956, il geologo Brian W. Logan e altri colleghi della University of Western Australia di Perth, durante un'esplorazione lungo la costa settentrionale dell'Australia occidentale, s'imbattono in una laguna, nota come Shark Bay, situata a circa 800 chilometri a nord di Perth. Al ritirarsi della marea nella Hamelin Pool, sulla costa meridionale della baia, comparve uno scenario antico di 500 milioni di anni, che nessuno scienziato aveva mai scorto sulla Terra! ... il fondo della baia era costellato di torri cilindriche alte da 1 a 2 metri con sommità a cupola ... sosia di altre stromatoliti precambriane, ma ancora viventi e in pieno sviluppo!"





"Un'ispezione più accurata dimostrò che queste formazioni erano costituite da stratificazioni millimetriche di sedimenti, proprio come le antiche stromatoliti. Sulla superficie più esterna era presente un tappeto mucillaginoso di cianobatteri (spesso definiti erroneamente alghe blu-verdi; in realtà le alghe sono organismi vegetali eucariotici, ossia dotati di nucleo) ... studi sulle stromatoliti di Shark Bay hanno svelato come si originano tali strutture così finemente stratificate. Le coltri gelatinose di cianobatteri hanno un rapido accrescimento alla luce del sole, quando sale la marea che le sommerge, e producono una mucillagine vischiosa che, soprattutto durante la notte o quando la marea si abbassa, trattiene microscopiche particelle di sedimento. Quando arrivano di nuovo marea e luce solare, i batteri si riattivano sviluppando nuovi filamenti che intrappolano le particelle depositate durante la notte. Giorno dopo giorno, anno dopo anno, se le condizioni ambientali si mantengono favorevoli, centinaia di microscopici strati continuano ad accumularsi sulla superficie. In seguito, i resti organici dei batteri scompaiono senza lasciare qualsivoglia traccia della loro esistenza, e rimangono solo i sedimenti stratificati ... Per 3 miliardi di anni, le forme di vita più complesse sono state questi tappeti di batteri (e successivamente di alghe), senza nulla che ne ostacolasse la diffusione... Dopo la scoperta di Shark Bay nel 1956 (pubblicata per la prima volta nel 1961), le stromatoliti sono state rinvenute in altri luoghi del pianeta" [45].

Nelle immagini le stromatoliti della Shark-Bay (foto in alto) [46] e del Lake Thetis (foto in basso) [47], Western Australia.

[45] Donald R. Prothero (2021), cap. 1.

[46] Paul Harrison, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stromatolites_in_Sharkbay.jpg

[47] Ruth Ellison, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lake_Thetis-Stromatolites-LaRuth.jpg

A testimonianza del fatto che più si torna indietro nel tempo, più i reperti diventano di difficile interpretazione – e più le scoperte ogni volta dichiarate del "più antico fossile della Terra" diventano controverse – la possibile presenza nel sud-ovest della Groenlandia nella "*Cintura di rocce verdi di Isua*" di *Stromatoliti* risalenti a - 3,7 Ga [48] è stata messa in dubbio: si ritiene che queste strutture siano di origine non-biologica [49]. Sono state messe in dubbio anche la descrizione di batteri e cianobatteri nella "*Apex chert*", in Australia (datati a - 3,465 Ga), e la presenza di fossili tubolari nei depositi idrotermali datati tra - 4,3 e - 3,8 Ga della "*Cintura di rocce verdi di Nuvvuagittuq*", in Canada, nel Quebec [50].

Invece, pochi anni dopo la scoperta delle stromatoliti, sempre nella "*Strelley Pool Formation*", sono state descritte selci nere, massicce, carbonacee e ricche di solfuri, che, a differenza delle stromatoliti, si sono formate prevalentemente attraverso processi fisico-chimici legati all'attività idrotermale, che contengono fossili di dimensioni micrometriche identificati come batteri [51].

I due reperti della "*Strelley Pool Formation*", le stromatoliti e i batteri fossili, attualmente sono considerati un punto di svolta nello studio della storia della Terra: forniscono la prima evidenza riconoscibile e accettata della comparsa della vita. Da notare che a causa del rimodellamento della crosta terrestre oggi di rocce originarie precedenti - 4,0 Ga non ne restano, quindi questa data resta un limite invalicabile in termini di reperti geologici con gli annessi reperti fossili. Ma i cianobatteri che hanno dato origine alle stromatoliti ci forniscono quella che attualmente viene considerata l'evidenza che la vita era nata da tempo.

Siamo arrivati quindi a quello che possiamo definire "il mistero dei misteri": come si è realizzato il salto di qualità che ha portato una vescicola delimitata da una membrana e contenente un ammasso di molecole organiche in soluzione acquosa a diventare una cellula vivente?

Per capirlo è necessario fare un passo indietro nel tempo: torniamo a Francesco Redi [52] che nel 1687 dimostra con un esperimento semplice ma dai risultati inequivocabili che le larve di mosca non si generano spontaneamente dalla carne putrescente [53].

[48] Nutman A, Bennett V, Friend C. et al. *Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures*. Nature 537, 535–538 (2016). | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/307528213>

[49] Allwood AC, Rosing MT, Flannery DT, Hurowitz JA, Heirweh CM. *Reassessing evidence of life in 3,700-million-year-old rocks of Greenland*. Nature. 2018 Nov;563(7730):241-244. doi: 10.1038/s41586-018-0610-4. Epub 2018 Oct 17. Erratum in: Nature. 2018 Nov 29;: PMID: 30333621.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30333621/>

[50] Michael J. Benton, David A. T. Harper. *Introduction to Paleobiology and the Fossil Record*, pp, 230-232.

[51] Sugitani K, Mimura K, Takeuchi M, Yamaguchi T, Suzuki K, Senda R, Asahara Y, Wallis S, Van Kranendonk MJ. *A Paleoproterozoic coastal hydrothermal field inhabited by diverse microbial communities: the Strelley Pool Formation, Pilbara Craton, Western Australia*. Geobiology. 2015 Nov;13(6):522-45. doi: 10.1111/gbi.12150.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26189535/>

[52] Francesco Redi (Arezzo, 18 febbraio 1626 - Pisa, 1 marzo 1697).

[53] *Esperienze intorno alla generazione degl'insetti fatte da Francesco Redi Accademico della Crusca, e da lui scritte in una lettera all'Illustriss. Signor Carlo Dati*. In Napoli. MDCLXXXVII. Nella Stamperia di Giacomo Raillard. Con Licenza de' Superiori. | PDF |

<https://play.google.com/books/reader?id=4fv3zFK8IkIC>

Quasi due secoli dopo, il 19 maggio 1861 a Parigi Louis Pasteur⁵⁴, un chimico che dopo essersi occupato di dissimmetrie molecolari⁵⁵ da qualche anno si sta occupando della fermentazione applicata alla produzione industriale di birra, vino e aceto, tiene alla "Società Chimica di Parigi" una relazione sul tema: "Sui corpuscoli organizzati che esistono nell'atmosfera, esame della dottrina delle generazioni spontanee"⁵⁶.

Scrive Pasteur: "Ci sono circostanze in cui abbiamo visto avvenire generazioni spontanee, in cui abbiamo visto la materia appartenuta a esseri viventi conservare in qualche modo un residuo di vita e auto-organizzarsi? Questa è la questione da risolvere. Non si tratta qui di religione, né di filosofia, né di alcun sistema. Le asserzioni o le opinioni a priori non contano. È una questione di fatto. E, noterete, non pretendo di stabilire che le generazioni spontanee non esistano mai. In questioni di questo ordine non si può provare il negativo. Ma pretendo di dimostrare con rigore che in tutti gli esperimenti in cui si è creduto di riconoscere l'esistenza di generazioni spontanee, negli esseri più inferiori, a cui oggi è relegato il dibattito, l'osservatore è stato vittima di illusioni o cause di errore che non percepiva o che non poteva evitare ... Redi, famoso membro dell'Accademia del Cimento, dimostrò che i vermi della carne in putrefazione erano le larve delle uova di mosca. Le sue prove furono tanto semplici quanto decisive, poiché dimostrò che bastava avvolgere una garza fine sul materiale in putrefazione per impedire assolutamente la nascita di queste larve..." [57].

E Pasteur conclude: "Le teorie sull'origine delle generazioni spontanee non sono più applicabili... In materie così delicate, dobbiamo saperci fermare laddove l'esperienza si ferma... Ritengo rigorosamente dimostrato dai miei esperimenti che tutti gli infusori e tutte le crittogame... [derivano] da germi sospesi nell'aria" [58].

Tre anni prima, nel 1858, Rudolf Virchow⁵⁹ aveva pubblicato venti lezioni tenute nei mesi di febbraio, marzo e aprile 1858 all'Istituto patologico di Berlino in un libro che aveva intitolato "Die Cellularpathologie in ihrer Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre"⁶⁰. Lo scopo di Virchow è indicato già nelle prime righe della prefazione: dimostrare che la cellula è il denominatore comune di tutti i processi vitali, fisiologici e patologici, animali e vegetali. ⁶¹.

[54] Louis Pasteur (Dole, 27 dicembre 1822 - Marnes-la-Coquette, 28 settembre 1895).

[55] Il fenomeno concerne le molecole che presentano un asse di simmetria ordinario, che per questo non sono sovrapponibili alla loro immagine speculare e sono otticamente attive. Nel mondo inorganico esistono soltanto molecole achirali, cioè sovrapponibili alla loro immagine speculare, e mescolanze racemiche di molecole chirali (in cui i due opposti enantiomeri sono presenti in quantità uguali). Invece le sostanze otticamente attive estratte da organismi viventi sono alcune solo destrogire, altre solo levogire (ad esempio sulla Terra nelle proteine di tutti gli organismi conosciuti sono presenti solo L-amminoacidi). Pasteur contribuì alla comprensione di questo problema che sta alla base della biochimica.

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k7356c>

[56] "Sur les corpuscules organisés qui existent dans l'atmosphère, examen de la doctrine des générations spontanées: leçon professée à la Société chimique de Paris, le 19 mai 1861". | PDF |

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9761522s>

[57] Ibidem, pagg. 3-4.

[58] Ibidem, pag. 35.

[59] Rudolf Ludwig Karl Virchow (Świdwin, 13 ottobre 1821 - Berlino, 5 settembre 1902).

[60] "La Patologia cellulare fondata sull'istologia fisiologica e patologica".

<https://play.google.com/books/reader?id=Ybpfu5w0614C>

[61] "Le lezioni, che offro al ceto medico, furon dettate nel principio di quest'anno a un gran numero di Colleghi, la maggior parte Medici pratici di Berlino, nel nuovo Istituto patologico della Università. Furono dirette principalmente allo scopo di espor loro quei fatti, sui quali a mio avviso devonsi al presente fondare

Scrive Virchow: "Se noi non ammettiamo che dal muco saburrato si formi un lombrico, che dalle reliquie della decomposizione d'un animale, o di una pianta si formi un infusorio, un fungo od un'alga, tanto meno nella formazione dei tessuti fisiologici o patologici possiamo ammettere che da una sostanza non cellulare si possa formare una cellula. Dove una cellula si forma ivi deve preesistere una cellula (*Omnis cellula e cellula*)" [62].

Si tratta di un passo fondamentale sulla strada dello sviluppo scientifico e della biologia ma, come già Pasteur aveva intuito quando, molto sottilmente, affermava che "... non pretendo di stabilire che le generazioni spontanee non esistano mai...", ora siamo arrivati al cuore del problema. Se "*Omnis cellula e cellula*" prima o poi, risalendo di generazione in generazione, è inevitabile: dobbiamo arrivare alla madre di tutte le cellule, e alla "causa prima" della vita sulla Terra. Questa volta evitando filosofia aristotelica e metafisica, e ricorrendo alla scienza.

Quale sia la direzione da seguire lo si intravede già nelle motivazioni dei premi Nobel assegnati per la chimica: il primo in assoluto, nel 1901, a Jacobus H. van 't Hoff "*in riconoscimento degli straordinari servizi resi dalla scoperta delle leggi della dinamica chimica e della pressione osmotica nelle soluzioni*"; quello del 1902 a Emil Fisher "*in riconoscimento degli straordinari servizi resi dal suo lavoro sulla sintesi dello zucchero e delle purine*"; quello del 1907 a Eduard Büchner "*per le sue ricerche biochimiche e la scoperta della fermentazione senza cellule*"; quello del 1909 a Guglielmo Ostwald "*in riconoscimento del suo lavoro sulla catalisi e per le sue indagini sui principi fondamentali che governano gli equilibri chimici e le velocità di reazione*". A Eduard Büchner si fa risalire ufficialmente la nascita della biochimica. Ed è un biochimico russo, Alexander Oparin [63], che propone che la vita sulla Terra si sia originata da un ambiente interamente inorganico attraverso la formazione di molecole organiche semplici; con la successiva comparsa di macromolecole che interagendo in un ambiente acquoso danno origine a microstrutture organizzate; e con la loro evoluzione in proto-cellule metabolicamente attive funzionanti come sistemi termodinamicamente aperti. Nel complesso, Oparin descrive uno sviluppo della vita basato sulla chimica-fisica e sulla selezione naturale, quest'ultima che agisce sulla microstruttura.[64].

Nel 1953 un chimico americano, Stanley Miller [65], con un apparato piuttosto semplice riproduce quelle che potevano essere le condizioni presenti nella Terra primordiale: vapore d'acqua, gas semplici (CH₄, H₂, NH₃) più scariche elettriche che simulano le condizioni del primitivo e intenso vulcanesimo [66]. L'acqua di condensazione raccolta dall'apparato sperimentale dopo una

la Dottrina biologica e la Teoria patologica, e a tal uopo si aggiunse il maggior numero possibile di microscopiche dimostrazioni. Tendono, dimostrando la natura cellulare di tutti i processi della vita, fisiologici e patologici, animali e vegetali, in una maniera più precisa e ordinata che non fu fatto finora, a convincere gli animi della unità della vita in tutti gli organismi contro le dottrine umorale e nevristica (solidistica) che si sono propagate dai miti dell'antichità a giorni nostri, e in pari tempo a sostituire alla grossolana meccanica e chimica dei tessuti la più fine meccanica e chimica delle cellule".

[62] Una traduzione dell'opera si trova nella "*Prima traduzione italiana fatta sull'ultima edizione tedesca dal Dott. Gio. Batt. Mugna*" pubblicata da Dottor Francesco Vallardi Tipografo-Editore, Milano, 1865.

<https://play.google.com/books/reader?id=jjXgLVuN1cAC>

[63] Alexander Ivanovich Oparin (Uglič, 2 marzo 1894 - Mosca, 21 aprile 1980).

[64] Pennazio S. *Alexandr Oparin and the origin of life on Earth*. Riv Biol. 2009 Jan-Apr;102(1):95-118.

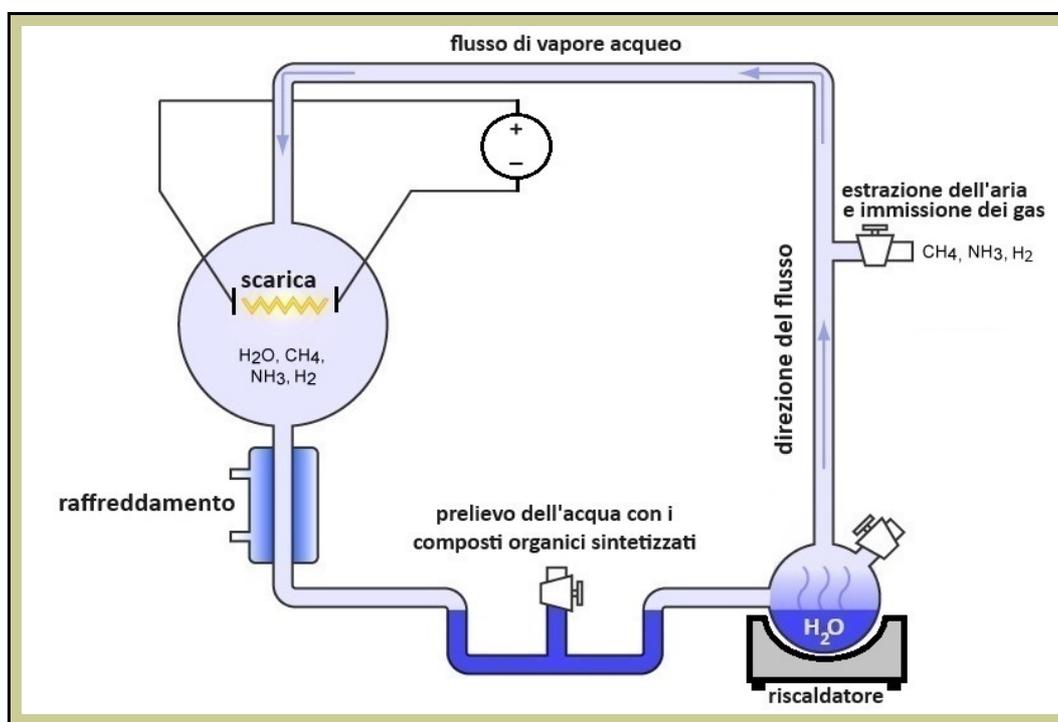
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19718625/>

[65] Stanley Lloyd Miller (Oakland, 7 marzo 1930 - National City, 20 maggio 2007).

[66] *Miller-Urey experiment*. Immagine modificata da: Carny, CC BY 2.5, da Wikimedia Commons.

https://en.wikipedia.org/wiki/Miller%E2%80%93Urey_experiment

settimana contiene amminoacidi: è la conferma che molecole organiche si possono formare spontaneamente a partire da molecole inorganiche molto semplici, in presenza di una fonte di energia in un'atmosfera di composizione molto semplice [67].



Analisi successive effettuate nel 2010 sui campioni archiviati da Miller impiegando tecniche analitiche moderne molto più sensibili della cromatografia su carta da lui impiegata, hanno confermato la presenza di 23 amminoacidi, 6 dei quali contenenti zolfo, e 4 ammine, della quali 1 solforata [68].

APPROFONDIMENTO

Molecole organiche negli asteroidi

Il 27 giugno 2018 la sonda *Hayabusa 2* dell'Agenzia Spaziale Giapponese (JAXA) ha raggiunto *Ryugu*, un asteroide con un diametro di circa 500 metri. L'11 luglio 2019 ha terminato la raccolta dei campioni dell'asteroide e il 6 dicembre 2020 ha sganciato nel deserto australiano una capsula contenente i campioni raccolti [69]. L'analisi dei campioni ha rilevato idrocarburi aromatici, inclusi alchilbenzeni, fluorantene e pirene, e ben 15 amminoacidi, inclusi

[67] Stanley L. Miller. *A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions*. Science (1953), Vol 117, Issue 3046, pagg. 528-529.

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.117.3046.528>

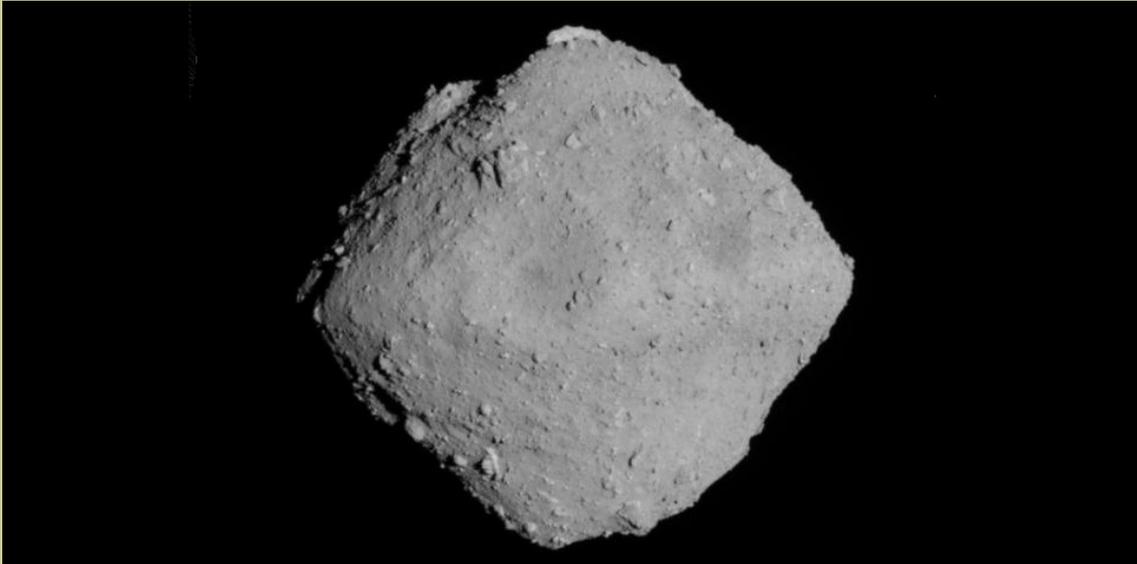
[68] Eric T. Parker et al. *Primordial synthesis of amines and amino acids in a 1958 Miller H₂S-rich spark discharge experiment*. PNAS, 2011. 108 (14) 5526-5531. | PDF |

<https://doi.org/10.1073/pnas.1019191108>

[69] *Hayabusa 2*.

https://it.wikipedia.org/wiki/Hayabusa_2

glicina, alanina e acido α -amminobutirrico [70]. Come se non bastasse, ulteriori recenti analisi hanno rilevato nei campioni la presenza di uracile, una delle delle due basi azotate pirimidiniche che formano i nucleotidi dell'acido ribonucleico (RNA), e la presenza di niacina, la vitamina B3 [71]. Si tratta di una delle più importanti conferme scientifiche del fatto che le molecole organiche, non solo quelle più semplici, ma anche quelle complesse, legate non solo al metabolismo ma anche al codice genetico, sono diffuse in tutto il sistema solare e precedono la comparsa della vita [72].



Oggi giorno "... si dubita che l'atmosfera primitiva avesse la composizione altamente riducente utilizzata da Miller. Tuttavia ... i gas ridotti e i fulmini associati alle eruzioni vulcaniche ... potrebbero essere stati prevalenti sulla Terra primordiale prima che si formassero estesi continenti. In questi pennacchi vulcanici potrebbero essere stati prodotti HCN, aldeidi e chetoni che, dopo essere stati dilavati dall'atmosfera [dalle precipitazioni], avrebbero potuto essere coinvolti nella sintesi di molecole organiche. Gli amminoacidi formati nei sistemi di isole vulcaniche potrebbero essersi accumulati nelle aree di marea, dove potrebbero essere stati polimerizzati dal solfuro di carbonile [COS], un gas vulcanico semplice che ha dimostrato di formare peptidi in condizioni blande" [73].

[70] Hiroshi Naraoka et al. *Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu*. Science 379, eabn9033 (2023). DOI:10.1126/science.abn9033. | PDF |

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn9033>

[71] Oba Y., Koga T., Takano Y. et al. *Uracil in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu*. Nat Commun 14, 1292 (2023). | PDF |

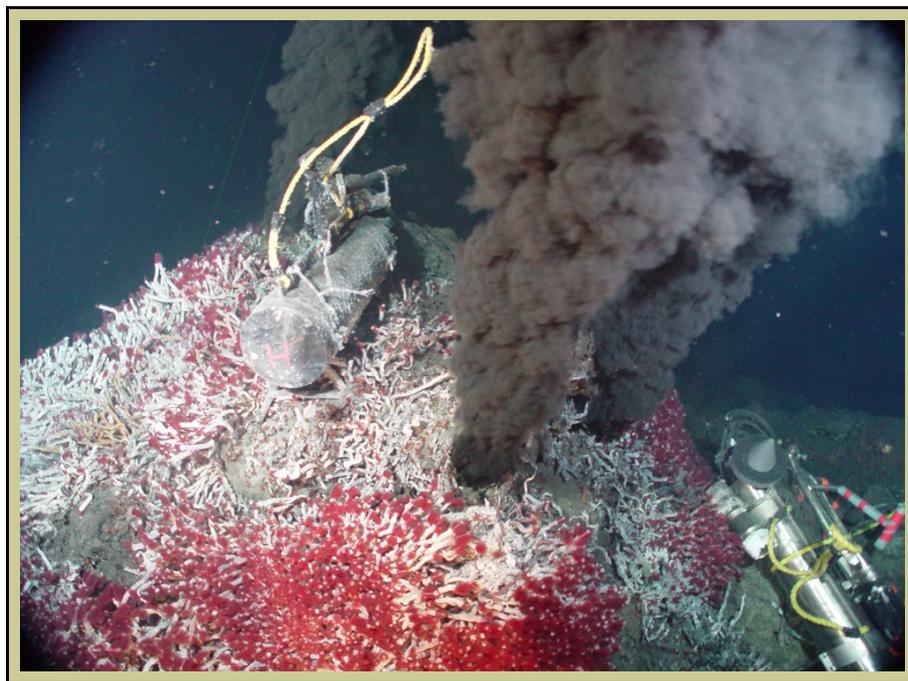
<https://www.nature.com/articles/s41467-023-36904-3>

[72] Image credits: JAXA, Chiba Institute of Technology, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Meiji University, University of Aizu, AIST.

[73] Johnson Adam & Cleaves Henderson & Dworkin Jason & Glavin Daniel & Lazcano Antonio & Bada Jeffrey. (2008). *The Miller Volcanic Spark Discharge Experiment*. Science (New York, N.Y.). 322. 404. 10.1126/science.1161527. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/23391255>

Ma ecco la svolta, inattesa. Nel 1977 un gruppo di ricercatori che impiega il sommergibile Alvin riporta la presenza la largo delle Isole Galápagos di una sorgente termale sottomarina accanto alla quale, alla profondità di 2 500 metri, documenta la presenza di vermi tubolari e grossi mitili [74].



Due anni dopo, il 21 aprile del 1979, Bill Normark dello U.S. Geological Survey e Thierry Juteau, un vulcanologo francese, che si immergono con l'Alvin, pilotato da Dudley Foster, scoprono il primo "black smoker" o "fumarola nera". L'idea di quello che videro ce la fornisce l'immagine qui riportata della sorgente idrotermale "Sully Vent" nel campo idrotermale "Main Endeavour Vent", nel Pacifico nordorientale: un letto di vermi tubolari ricopre la base della fumarola nera a 2 250 metri di profondità [75].

Le fumarole nere rappresentano il modo nel quale l'energia geotermica emerge dalla Terra – nella vicinanza di zone vulcaniche attive e delle aree in cui le placche tettoniche si stanno allontanando lungo le dorsali medio-oceaniche – portando in superficie zolfo, metano, idrogeno, idrogeno solforato, e ioni metallici: quello che serve ai batteri anaerobi per la chemiosintesi [76] basata su molecole inorganiche. Esistono anche "white smokers" o "fumarole bianche", nelle quali l'energia geotermica si libera attraverso camini formati da depositi di bario, calcio e silicio.

In effetti oggi *"si ritiene che il metabolismo sia emerso da antichi percorsi metabolici autotrofi"*

[74] Corliss JB, Dymond J, Gordon LI, Edmond JM, von Herzen RP, Ballard RD, Green K, Williams D, Bainbridge A, Crane K, van Andel TH. *Submarine thermal springs on the galapagos rift*. Science. 1979 Mar 16;203(4385):1073-83. doi: 10.1126/science.203.4385.1073.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17776033/>

[75] I due dispositivi che si vedono sono un idrofono acustico e una sonda per la misura di resistività, temperatura e idrogeno impiegati durante l'immersione, avvenuta nel 2004.

Credits: NOAA PMEL EOI Program.

https://www.pmel.noaa.gov/eoi/gallery/R852_DSC_092004_070004_03772.JPG

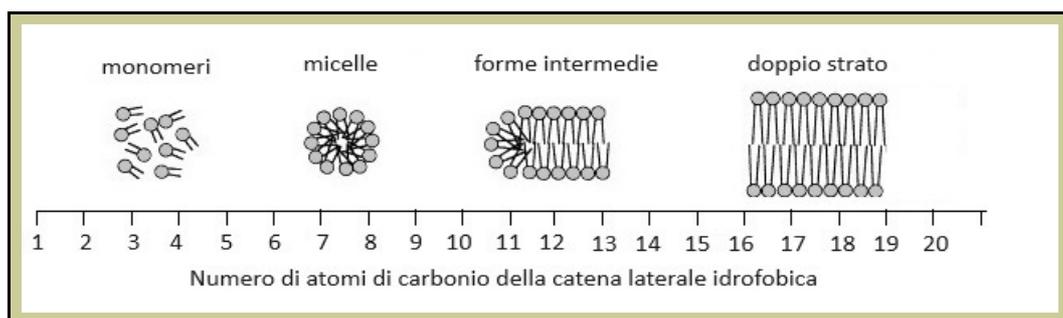
[76] *Chemosynthesis*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Chemosynthesis>

alimentati da gas vulcanici sotto forma di fonti di carbonio e sorgenti di energia. Varianti di questi percorsi metabolici rimangono nei moderni autotrofi nei rami più profondi dell'albero della vita. Il metabolismo energetico degli autotrofi moderni è simile alle interazioni geologiche di H_2 e CO_2 nelle sorgenti idrotermali, indicando una origine metabolica della biochimica all'interfaccia tra litosfera e idrosfera" [77].

Importantissima in questo senso è stata la scoperta, nel 2008 sulla dorsale medio-oceanica situata nell'artico a nord dell'Islanda, del "Loki's Castle", un campo di sorgenti idrotermali con quattro fumarole nere attive, con l'acqua emessa alla temperatura di 310-320 °C, accanto alle quali sono stati trovati due accumuli di solfuri larghi alla base 150-200 metri e alti 20-30 metri [78]. Proseguendo nelle ricerche nel 2015 a 15 km a nord-ovest del Locki's Castle, in un campione prelevato e 3 283 metri è stato rinvenuto un nuovo gruppo di *Archea*, antichi batteri che condividono un'ascendenza comune con gli eucarioti [79]: ne parleremo a proposito di questi ultimi.

Ma a un ammasso di molecole in soluzione acquosa, per diventare una cellula vivente, manca ancora qualcosa di fondamentale: una membrana che delimiti un interno, contenente il suo macchinario individuale metabolico (e le informazioni da trasmettere alla discendenza), e lo separi da un esterno, con il quale deve però, pur conservando la propria identità, essere in grado di scambiare materia ed energia.



Ebbene anche per questo abbiamo indizi: le *molecole anfifiliche*, che includono un estremo polare, idrosolubile, e una catena laterale carboniosa, idrofobica, tendono spontaneamente a formare, all'aumentare della lunghezza della catena, prima micelle, poi un doppio strato, come quello che osserviamo oggi nella membrana cellulare. La sorpresa è che molecole anfifiliche in grado di formare membrane sono state rinvenute nei meteoriti carboniosi ed è stato provato che, una volta

[77] Amir Akbari, Bernhard O. Palsson. *Metabolic homeostasis and growth in abiotic cells*. PNAS 2023 Vol. 120 No. 19. | PDF |

<https://doi.org/10.1073/pnas.2300687120>

[78] Pedersen RB, Rapp HT, Thorseth IH, Lilley MD, Barriga FJ, Baumberger T, Flesland K, Fonseca R, Früh-Green GL, Jørgensen SL. *Discovery of a black smoker vent field and vent fauna at the Arctic Mid-Ocean Ridge*. Nat Commun. 2010 Nov 23;1:126. doi: 10.1038/ncomms1124. PMID: 21119639; PMCID: PMC3060606. | PDF |

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3060606/>

[79] Spang A, Saw JH, Jørgensen SL, Zaremba-Niedzwiedzka K, Martijn J, Lind AE, van Eijk R, Schleper C, Guy L, Ettema TJG. *Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes*. Nature. 2015 May 14;521(7551):173-179. doi: 10.1038/nature14447. Epub 2015 May 6. PMID: 25945739; PMCID: PMC4444528. | PDF |

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4444528/>

estratti dal materiale meteorico e posti in ambiente acquoso, queste molecole sono in grado di autoassemblarsi in membrane a doppio strato [80].

Quindi oggi abbiamo:

→ indizi che portano alla formazione inizialmente spontanea di una membrana a doppio strato, il punto di partenza per realizzare una vescicola nella quale assemblare una biochimica;

→ indizi della biochimica che nell'Archeano, su una Terra priva di ossigeno [81], ha reso possibile il passaggio da una vescicola a una cellula in grado di impiegare per la produzione di energia una chemiosintesi [82] basata su idrogeno, idrogeno solforato (H₂S) e ioni ferro;

→ un primo scenario, che la vita si sia sviluppata in un ambiente terrestre, in piccoli stagni caldi – i "warm little ponds" di Darwin [83] – sulle isole oceaniche forse già formatesi nell'Archeano, in un ambiente strutturato dalle emissioni vulcaniche, diffondendosi poi da queste agli oceani;

→ uno scenario alternativo, che la vita si sia sviluppata nell'oceano primordiale attorno alle fumarole sottomarine, risalendo poi alla superficie e alla luce.

Questi indizi e questi scenari ci portano – con una serie di passaggi che, in assenza di testimoni oculari, rimarranno per sempre avvolti nel mistero – dalle reazioni chimiche che da molecole inorganiche semplici, nelle condizioni presenti nell'Archeano e nell'Archeano, sono state in grado di generare molecole organiche complesse [84], a proto-microrganismi che condividevano metaboliti e informazione genetica, al Last Universal Common Ancestor – LUCA, l'ultimo antenato comune universale, che possedeva DNA, ribosomi, proteine, una rete metabolica ben sviluppata e funzioni geniche in grado di promuovere una anteprema della riproduzione sessuata, il trasferimento di DNA tra individui della popolazione:

"C'è stato un tempo in cui non c'era vita sulla Terra, e c'è stato un tempo in cui c'erano cellule che ereditavano il DNA. Le transizioni sono difficili da immaginare... [ma] da qualche parte sulla Terra primordiale coperta di oceano e in una ristretta finestra di tempo di soli circa 200 milioni di anni, vennero all'esistenza le prime cellule. Poiché il codice genetico e la chiralità degli amminoacidi sono universali, tutte le forme di vita moderne risalgono in ultima analisi a quella fase dell'evoluzione. Quello era il periodo in cui viveva l'ultimo antenato comune universale (LUCA) di tutte le cellule ... I geni che riconducono a LUCA, antichi percorsi biochimici e le reazioni acquose della CO₂ con ferro e acqua sembrano tutti convergere su insiemi simili di reazioni chimiche semplici ed esergoniche come quelle che si verificano spontaneamente nelle sorgenti idrotermali" [85].

[80] Fiore M., Strazewski P. *Prebiotic Lipidic Amphiphiles and Condensing Agents on the Early Earth*. Life 2016, 6, 17. | PDF |

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27043635/>

[81] Catling DC, Zahnle KJ. *The Archean atmosphere*. Sci Adv. 2020 Feb 26;6(9):eaax1420. doi: 10.1126/sciadv.aax1420. PMID: 32133393; PMCID: PMC7043912. | PDF |

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32133393/>

[82] *Chemosynthesis*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Chemosynthesis>

[83] Damer B. *A Field Trip to the Archean in Search of Darwin's Warm Little Pond*. Life 2016, 6, 21. | PDF |

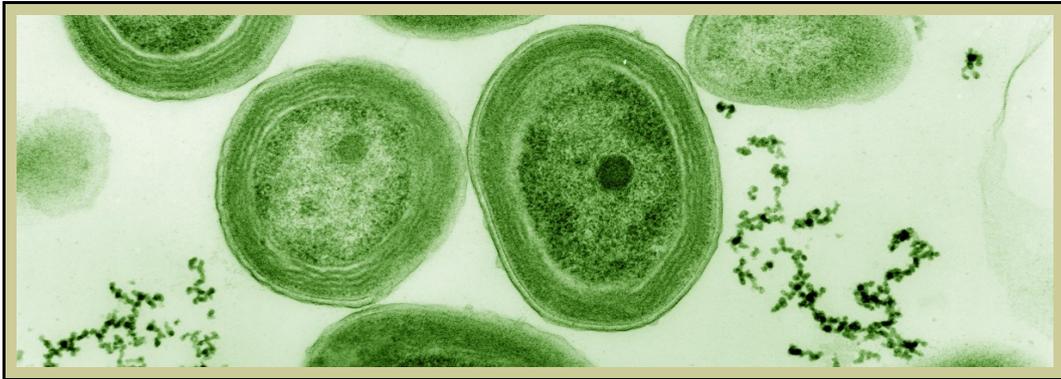
<https://doi.org/10.3390/life6020021>

[84] Vedere: Oparin. *The origin of life on the Earth*. Third Revised and enlarged edition. Translated from the Russian by Ann Synge. Academic Press Inc., Publishers. New York. 1957. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/334576155>

[85] Weiss MC, Preiner M, Xavier JC, Zimorski V, Martin WF. *The last universal common ancestor between ancient Earth chemistry and the onset of genetics*. PLoS Genet. 2018 Aug 16;14(8):e1007518. doi: 10.1371/journal.pgen.1007518. PMID: 30114187; PMCID: PMC6095482. | PDF |

Possiamo immaginare che nel corso delle centinaia di milioni di anni siano stati fatti miliardi di miliardi di tentativi falliti di generare il LUCA, e che per converso questo potrebbe anche essere stato realizzato, in tempi ravvicinati, in versioni diverse, prima che qualcuna di esse si sia imposta quantitativamente in una forma ancestrale che si è poi andata evolvendo.



E i primi segnali importanti di questa ulteriore evoluzione li abbiamo nell'Archeano, nei tappeti di cianobatteri che hanno contribuito alla formazione delle stromatoliti del cratone di Pilbara: cianobatteri che hanno iniziato a sfruttare come fonte energetica per il loro metabolismo la luce del sole, sviluppando la fotosintesi. Inizialmente una fotosintesi anossigenica, che impiega H_2S come donatore di elettroni, alla quale al termine dell'eone si è andata sostituendo una fotosintesi ossigenica, che impiega come donatore di elettroni H_2O e libera O_2 come sottoprodotto (nell'immagine: *Prochlorococcus marinus*, il cianobatterio marino che produce gran parte dell'ossigeno della Terra) [86].

L'**Archeano** è anche l'eone in cui i cratoni iniziano a confluire e si formano i primi continenti. Ma con il solito problema. Mentre proiettando a ritroso il filmato dell'evoluzione della crosta terrestre è relativamente facile immaginare l'incastro degli attuali continenti nel precedente supercontinente Pangea – incastro peraltro confermato dalla corrispondenza, nei diversi continenti attuali, di strati geologici e di reperti fossili – continuando ulteriormente a ritroso anche i metodi scientifici più sofisticati che si possono impiegare per ricostruire morfologia e dinamica dei continenti riescono a fornire solamente dati scarsi e incerti lasciando spazio a teorie scientifiche alternative, dibattute e spesso in contrasto tra di loro, qui solo parzialmente riassunte:

→ tra - 3,1 e - 2,7 Ga il cratone Kaapvaal, oggi in Sudafrica, e il cratone Pilbara, oggi in Australia occidentale, si sarebbero uniti a formare il continente **Vaalbara** [87] [88], una ipotesi scientifica che riportata in una fonte divulgativa diventa un azzardato “*Vaalbara è il nome che è stato dato al primo supercontinente esistito sulla Terra, circa 3,3 miliardi di anni fa*” [89];

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6095482/>

[86] *Cyanobacteria*. Immagine: Luke Thompson from Chisholm Lab and Nikki Watson from Whitehead, MIT, CCO, via Wikimedia Commons.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Cyanobacteria>

[87] Michiel O. de Kock, David A.D. Evans, Nicolas J. Beukes. *Validating the existence of Vaalbara in the Neoproterozoic*. Precambrian Research, Volume 174, Issues 1–2, 2009, Pages 145-154, ISSN 0301-9268.

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.002>

[88] Zegers De Wit, Dann White. *Vaalbara, Earth's oldest assembled continent? A combined structural, geochronological, and palaeomagnetic test*. | PDF |

<https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.1998.00199.x>

[89] *Vaalbara*.

→ secondo un'altra teoria, incompatibile con la precedente, a - 3,0 Ga si sarebbe invece formato il continente **Ur** ^[90] in merito al quale Rogers riporta: “*Ur (3,0 Ga). Le uniche grandi aree cratoniche stabilizzate risalenti a 3,0 Ga si trovano tutte in una parte della Pangea. Includono il cratone Kaapvaal, il cratone Dharwar occidentale dell'India, il cratone Singhbhum dell'India (recentemente datato come 3,2 Ga) e il cratone Pilbara dell'Australia. Piccole esposizioni di cratoni da 3,0 Ga si verificano anche sul margine dell'Antartide orientale, che si unì all'India e all'Australia non più tardi del Proterozoico medio e probabilmente prima ... la probabilità che tutti questi antichi cratoni si siano assemblati in una stessa area della Pangea è estremamente piccola, se fossero stati separati in qualsiasi momento tra 3 Ga e la fine del Paleozoico. Poiché sono i cratoni più antichi conosciuti, il supercontinente da loro creato è stato chiamato Ur, da una parola tedesca che significa “originale”. Le prove dell'esistenza di Ur sono molto difficili a causa della sua età*” ^[91];

→ a - 2,8 Ga si sarebbe formato **Lauroscandia**, i cui residui si troverebbero nei cratoni dell'America settentrionale e dell'Europa orientale ^[92];

→ a - 2,7 Ga si sarebbe formato **Kenorlandia** la prima estesa massa continentale che includeva *Laurentia* (America settentrionale e cratone Nord Atlantico), *Baltica* (Penisola scandinava, Baltico e Bassopiano Sarmatico), *Australia* e il cratone *Kalahari* ^[93] o che in alternativa si suppone potesse essere formata da una aggregazione di cratoni, poi dispersi tra Laurentia (Slave e Superior), Africa (Kraapvaal), Australia (Pilbara), India (Dharwar), Nord Cina e Baltica ^[94];

→ al termine dell'eone, a circa - 2,5 Ga, si sarebbe formato il continente **Arctica**: “*Artica (2,5 Ga). Cratoni stabilizzati a circa 2,5 Ga si trovano principalmente nel Nord America e in Siberia, e il continente che li conteneva è stato chiamato Artica perché l'Oceano Artico si è aperto attraverso di loro*” ^[95].

Nella figura alla pagina seguente sono riportate in colore le aree più conservate dell'Archeano insieme con alcuni (in azzurro) dei 35 cratoni che ci sono pervenuti da questo eone. La figura aiuta a interpretare i dati delle ipotesi riportate, ma è utile anche come guida per gli eventi del successivo Proterozoico. Le linee tratteggiate stanno a indicare strutture che si ritiene fossero un tempo unite e che si sono separate in seguito ai movimenti della crosta terrestre.

<https://it.wikipedia.org/wiki/Vaalbara>

[90] Rogers J.W. (1996). *A History of Continents in the Past Three Billions Years*. The Journal of Geology, 104, 91-107. | **PDF** |

<https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/629803>

[91] John J. W. Rogers, M. Santosh. *Continents and Supercontinents*. Oxford University Press, 2004, ISBN 9780195347333.

https://books.google.it/books/about/Continents_and_Supercontinents.html?id=jKzh0KFWLw8C

[92] Mints M. & Eriksson P.G. (2016). Secular changes in relationships between plate-tectonic and mantle-plume engendered processes during Precambrian time. *Geodynamics & Tectonophysics*. 7. 173-232. 10.5800/GT-2016-7-2-0203. | **PDF** |

<https://www.researchgate.net/publication/304787931>

[93] L.J. Pesonen, S.-Å. Elming, S. Mertanen, S. Pisarevsky, M.S. D'Agrella-Filho, J.G. Meert, P.W. Schmidt, N. Abrahamsen, G. Bylund. *Palaeomagnetic configuration of continents during the Proterozoic*. *Tectonophysics*, Volume 375, Issues 1–4, 2003, Pages 289-324, ISSN 0040-1951.

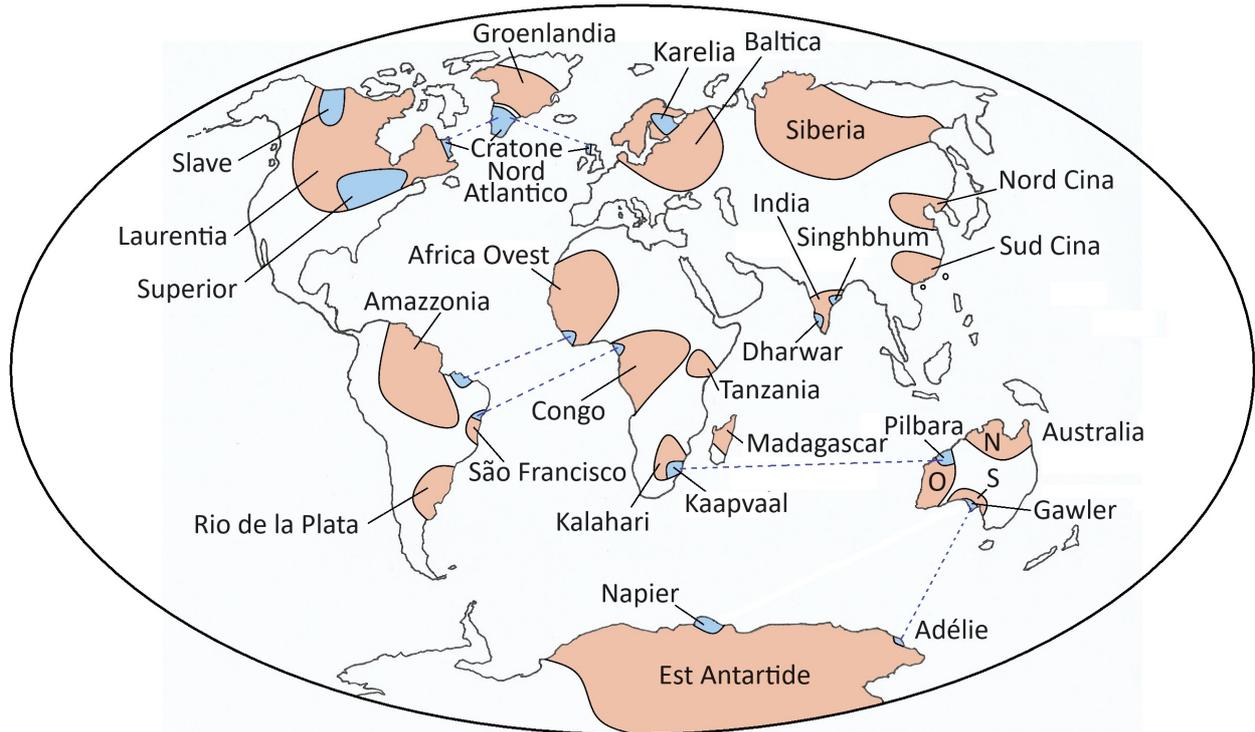
[https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00343-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00343-3)

[94] R. Damian Nance. *The supercontinent cycle and Earth's long-term climate*. *Ann NY Acad Sci*. 2022; 1515: 33–49. | **PDF** |

<https://doi.org/10.1111/nyas.14849>

[95] John J. W. Rogers, M. Santosh. *Continents and Supercontinents*. Oxford University Press, 2004, ISBN 9780195347333.

https://books.google.it/books/about/Continents_and_Supercontinents.html?id=jKzh0KFWLw8C



Vi sono infine nell'Archeano indizi di una possibile glaciazione avvenuta a - 2,9 Ga, la prima di cui siamo a conoscenza, la *glaciazione di Pongola*, alla quale è stata attribuita una durata di circa 100 Ma [96].

RIASSUMENDO

A - 2,5 Ga, al termine dell'Archeano:

- la Terra è in gran parte ricoperta dall'acqua [97];
- l'atmosfera è composta in prevalenza da CO₂ e da N₂ ed è priva di ossigeno;
- i cratoni hanno iniziato ad assemblarsi e si formano i primi continenti;
- è probabilmente avvenuta una prima glaciazione;
- dal Last Universal Common Ancestor, l'ultimo antenato comune universale, è originata una cellula senza nucleo (procariota) dalla quale sono originati i batteri;
- data l'assenza di ossigeno nell'atmosfera i batteri hanno un metabolismo anaerobico;
- alcuni batteri anaerobi hanno realizzato la fotosintesi e iniziato a impiegare la luce del sole come fonte di energia;

[96] Grant M. Young, Victor Von Brunn, Digby J. C. Gold, W. E. L. Minter. *Earth'S Oldest Reported Glaciation: Physical and Chemical Evidence From the Archean Mozaan Group (~2.9 Ga) of South Africa*. |PDF|

<https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/516039>

[97] Da notare che attualmente gli oceani ricoprono il 71% della superficie della Terra.

→ la fotosintesi anossigenica originariamente basata su H_2S viene progressivamente affiancata da una fotosintesi ossigenica basata su H_2O che libera O_2 come sottoprodotto e che finirà con il prevalere;

→ nei bassi fondali marini, rivestiti da un tappeto di cianobatteri fotosintetici, si sono formati i primi e più antichi fossili, le *Stromatoliti* [98].

È iniziata la storia della vita.

[98] I cianobatteri esistono tuttora, ma le stromatoliti sono quasi scomparse a causa degli altri animali marini, che consumano i cianobatteri a una velocità tale da impedire il processo di formazione delle stromatoliti, che è molto lento. Oggi sopravvivono solo in pochissime località, come nella Shark Bay nel Western Australia, ove l'acqua ipersalina ostacola la maggior parte delle altre forme di vita.

3.

PROTEROZOICO

da - 2,5 Ga a - 538,8 Ma

	Eone	Era	Periodo	Ga/Ma	Eventi / Fossili	
Precambriano	Termina l'eone Archeano			- 2,5	Inizia l'eone Proterozoico	
	Proterozoico	Paleo-proterozoico	Sideriano	-2,45 -2,4	Inizia il Grande Evento Ossidativo Inizia l'Era glaciale Uroniana	
			Riaciano	-2,3 - 2,1	Termina l'Era glaciale Uroniana Termina il Grande Evento Ossidativo	
			Orosiriano	-2,0	Continua la formazione dei continenti	
			Statheriano	-1,8	O ₂ atmosferico si stabilizza tra il 2% e il 4% Primi fossili di cellule eucariote / <i>Acritarchi</i>	
		Meso-proterozoico	Calimmiano	-1,5	Si forma il supercontinente Columbia (Nuna) <i>Tappania plana</i>	
			Ectasiano	-1,4	<i>Shuiyousphaeridium macroreticulatum</i>	
			Steniano	-1,2	Negli eucarioti compaiono multicellularità, fotosintesi e riproduzione sessuata <i>Bangiomorpha pubescens</i>	
		Neo-proterozoico	Toniano	- 1,0	Si forma il supercontinente Rodinia Evidenza di uno dei primi funghi <i>Ourasphaira giraldae</i> Associazioni simbiotiche di alghe e funghi (licheni) compaiono sulla terraferma	
				- 825	Inizia la frammentazione di Rodinia	
			Criogeniano	- 715 - 640	Glaciazione Sturtiana, termina a - 663 Transizione dai cianobatteri alle alghe Glaciazione Marinoana, termina a - 635	
		Ediacariano	- 580 - 547	Inizia lo sviluppo del mondo animale <i>Treptichnus, Cloudina, Dickinsonia, Kimberella, Yilingia, Spriggina</i> Glaciazione Gaskiers, termina a - 565 Glaciazione Baikonuriana, termina a - 542		
		Termina l'eone Proterozoico Termina il Precambriano			- 539	Inizia l'eone Fanerozoico

Siamo a - 2,45 Ga, all'inizio del *Paleoproterozoico*, la prima era dell'eone. Sono trascorsi 900 milioni di anni dalle prime stromatoliti e ne sono trascorsi il doppio da quando si sono probabilmente realizzate le condizioni minime per la comparsa della vita. L'atmosfera è stata fino a questo momento priva di ossigeno (O₂) [99], ma la sua concentrazione va ora aumentando nell'arco di quello che è denominato il "*Great Oxidation Event*" (GOE o Grande Evento Ossidativo) [100].

APPROFONDIMENTO

La comparsa dell'ossigeno nell'atmosfera terrestre

Oggi l'atmosfera terrestre, depurata del contenuto, variabile, in vapore d'acqua, è formata per il 78% da N₂, con il 21% di O₂, lo 0,9% di argon, lo 0,04% di CO₂ e tracce di altri gas (neon, elio, metano, krypton). Questa composizione è stata raggiunta attraverso varie fasi [101]:

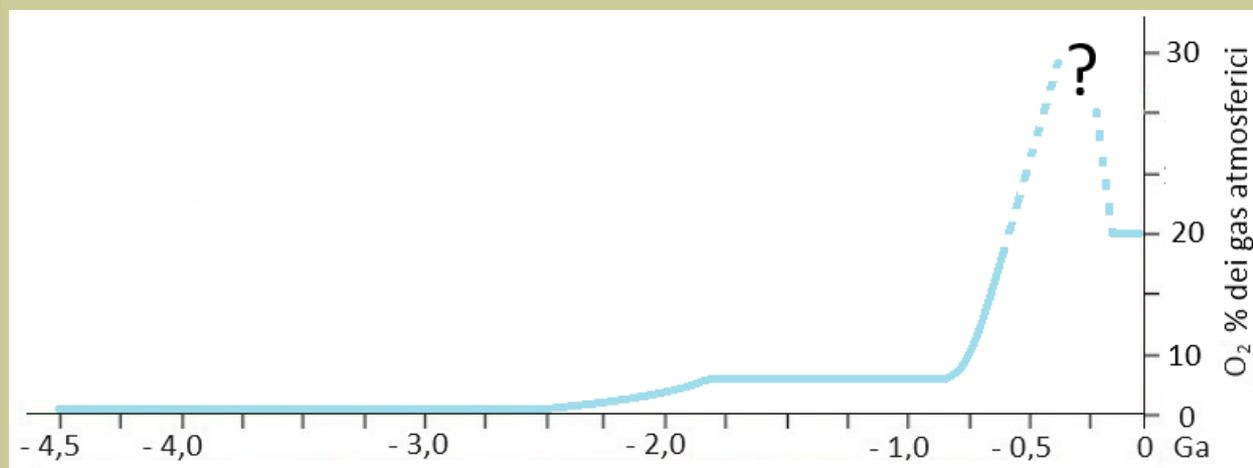
→ da - 3,85 Ga a - 2,45 Ga l'atmosfera è anossica, così come lo sono gli oceani;

→ da - 2,45 Ga a - 1,85 Ga, periodo all'interno del quale si verifica il GOE, i livelli di ossigeno atmosferico salgono a valori compresi tra il 2% e il 4%, gli oceani poco profondi diventano leggermente ossigenati, gli oceani profondi sono anossici;

→ da - 1,85 Ga a - 850 Ma i livelli di ossigeno atmosferico non cambiano in modo significativo, la maggior parte degli oceani è moderatamente ossigenata;

→ da - 850 Ma a - 540 Ma l'ossigeno atmosferico aumenta a valori non molto inferiori al 20%, gli oceani poco profondi seguono questo andamento, gli oceani profondi sono anossici;

→ da - 540 Ma a oggi probabilmente salgono fino a un valore massimo di circa il 30% durante il *Carbonifero* prima di tornare al valore attuale. Gli oceani poco profondi sono ossigenati, mentre l'ossigenazione degli oceani profondi fluttua considerevolmente [102].



[99] A.A. Pavlov and J.F. Kasting. *Mass-Independent Fractionation of Sulfur Isotopes in Archean Sediments: Strong Evidence for an Anoxic Archean Atmosphere*. *Astrobiology* 2002 2:1, 27-41

<https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/153110702753621321>

[100] *Great Oxidation Event*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Oxidation_Event

[101] Heinrich D. Holland. *The oxygenation of the atmosphere and oceans*. *Phil. Trans. R. Soc. B* (2006) 361, 903–915. | PDF |

<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2006.1838>

[102] Rappresentazione schematica dai dati di H. D. Holland.

Il GOE dura all'incirca da - 2,45 Ga a - 2,1 Ga ed è la fase culminante di processi che hanno inizio nell'Archeano e si estendono fino al Proterozoico che così si sviluppano:

→ l'atmosfera è inizialmente anossica;

→ compare la fotosintesi anossigenica fondata su H_2 e H_2S (primitivi batteri fototropici e cianobatteri);

→ compare nei cianobatteri l'enzima in grado di ossidare l'acqua e inizia la fotosintesi ossigenica fondata su H_2O [103];

→ inizia la produzione di O_2 e inizia l'ossigenazione delle acque;

→ si genera una fase di ossidazione del ferro da parte dell' O_2 con comparsa di una "*banded iron formation*" (BIF, "formazione ferrose a bande"), roccia sedimentaria contenente strati, da pochi millimetri a pochi centimetri di spessore, di ossidi di ferro, magnetite (Fe_3O_4) o ematite (Fe_2O_3);

→ in seguito alla sequestrazione da parte del ferro ridotto di tutto l'ossigeno (e possibilmente altri meccanismi in grado di arrestare il processo di ossidazione) si ha la formazione di uno strato sedimentario senza ossidi di ferro;

→ si alternano per centinaia di milioni di anni le due precedenti fasi con formazione di BIF che hanno una diffusione planetaria, si trovano oggi dovunque negli scudi continentali e sono la fonte di tutto il ferro che viene estratto – nell'immagine "*banded iron formation, Karijini National Park, Western Australia*" [104];



→ si esauriscono le fonti di ferro ridotto (ossidabile), si saturano gli altri "pozzi dell'ossigeno" cioè gli altri meccanismi in grado di sequestrarlo e inizia l'innalzamento della concentrazione di ossigeno nell'atmosfera, si verifica il GOE;

[103] Cardona T, Murray JW, Rutherford AW. *Origin and Evolution of Water Oxidation before the Last Common Ancestor of the Cyanobacteria*. Mol Biol Evol. 2015 May;32(5):1310-28. | PDF |

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4408414/>

[104] Graeme Churchard from Bristol, UK, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>, da Wikimedia Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Banded_iron_formation_Dales_Gorge.jpg

→ l'ossigeno ossida il metano atmosferico (un potente gas serra) e indebolisce l'effetto serra dell'atmosfera terrestre, causando un raffreddamento planetario, che innesca l'**era glaciale Uroniana** [105].

APPROFONDIMENTO

Ere glaciali e glaciazioni

La Terra ha vissuto finora cinque **ere glaciali** – che sono per definizione i periodi nei quali alcune parti della Terra sono ricoperte da ghiaccio permanente – all'interno delle quali si sono verificate una o più *glaciazioni* ciascuna delle quali a sua volta ha visto l'alternanza di *periodi glaciali* e di *periodi interglaciali* [106] [107] come riassunto in questa tabella (periodi glaciali e periodi interglaciali non sono riportati).

Eone	Periodo	Era glaciale	Glaciazione	da...	a...	unità
Archeano			<u>Pongola</u>	- 2,9	- 2,8	<u>Ga</u>
Proterozoico	<u>Sideriano</u>	Uroniana (Makganyene)		- 2,4	- 2,3	<u>Ga</u>
	<u>Criogeniano</u>	Criogeniana	<u>Sturtiana</u> <u>Marinoana</u>	-720 -717 -640	-635 -663 -635	Ma
	<u>Ediacarano</u>		<u>Gaskiers</u>	-580	-565	Ma
	<u>Ediacarano</u>		<u>Baikonuriana</u>	-547	542	Ma
Fanerozoico	Ordoviciano Siluriano	Andino-Sahariana		-450	-420	Ma
	Carbonifero Permiano	Tardo Paleozoica (Karoo)		-360	-260	Ma
	Giurassico		(?)	160	157	Ma
	Paleogene Neogene Quaternario	Tardo Cenozoica	<u>Antartide</u> <u>Groenlandia</u> <u>Quaternaria</u>	-34 -28 -2,9 -2,6	0 -14 -2,6 0	Ma

[105] Haoshu Tang, Yanjing Chen. *Global glaciations and atmospheric change at ca. 2.3 Ga*. Geoscience Frontiers, Volume 4, Issue 5, 2013, Pages 583-596, ISSN 1674-9871. | PDF |

<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.02.003>

[106] R. Damian Nance. *The supercontinent cycle and Earth's long-term climate*. Ann NY Acad Sci. 2022; 1515: 33–49. | PDF |

<https://doi.org/10.1111/nyas.14849>

[107] Nick Eyles. *Glacio-epochs and the supercontinent cycle after ~3.0 Ga: Tectonic boundary conditions for glaciation*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Volume 258, Issues 1–2, 2008, Pages 89-129, ISSN 0031-0182.

<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.09.021>

La presenza in Sudafrica di *diamictite* – un tipo di roccia sedimentaria litificata contenente particelle di dimensioni variabili dall'argilla ai massi, sospesi in una matrice di pietra fangosa o arenaria, considerata un indicatore specifico di fenomeni di erosione glaciale – suggerisce che queste ere glaciali siano state precedute a - 2,9 Ga da quella che potrebbe essere stata la prima glaciazione, la *glaciazione di Pongola*, durata circa 100 Ma [108].

Alla prima era glaciale, l'**era glaciale Uroniana** – nella quale la caduta della temperatura è così importante da fare ritenere che si sia arrivati a una Terra “a palla di neve”, cioè completamente ricoperta dai ghiacci – dopo un lunghissimo periodo di clima stabile e temperato ne segue una seconda, l'**era glaciale Criogeniana**, nella quale avvengono la *glaciazione Sturtiana* e la *glaciazione Marinoana*, entrambe con ogni probabilità con una Terra “a palla di neve”. Dopo un intervallo durante il quale si sono probabilmente verificate la *glaciazione Gaskiers* [109] e la *glaciazione Baikonuriana* [110], nel Fanerozoico si verificano la terza, l'**era glaciale Andino-Sahariana** e la quarta, l'**era glaciale Tardo-Paleozoica (Karoo)** mentre nel Giurassico si sarebbe verificata una ulteriore glaciazione, anche se di minore intensità [111], prima della quinta era glaciale, quella in cui viviamo, l'**era glaciale Tardo Cenozoica**, così definita per il fatto che alcune parti della Terra sono ricoperte da ghiaccio permanente (Antartide, Groenlandia, Oceano Artico), la cui formazione ha occupato la parte più cospicua dell'era. Ci troviamo ora nella *glaciazione Quaternaria*, iniziata circa 2,56 milioni di anni fa, che si è sviluppata in una alternanza di *periodi glaciali e periodi interglaciali*, diversamente denominati negli strati geologici rinvenuti nelle varie parti del mondo

Dalla somma di ossigenazione dell'atmosfera, glaciazione e possibilmente di altri eventi (gas da intense eruzioni vulcaniche e quant'altro) deriva una pressione selettiva che fa emergere un nuovo tipo di cellula, più efficiente dal punto di vista energetico e dotata di nucleo, **la cellula eucariota** che a - 1,8 Ga appare già moderatamente diversificata [112].

Anche se le strutture – nucleo, DNA lineare, ribosomi, mitocondri, sistema di endomembrane (reticolo endoplasmatico liscio e rugoso, apparato di Golgi), lisosomi – e le funzioni della cellula

[108] G. M. Young, V. Von Brunn, Digby J. C. Gold, W. E. L. Minter. *Earth'S Oldest Reported Glaciation: Physical and Chemical Evidence From the Archean Mozaan Group (~2.9 Ga) of South Africa*. | PDF |

<https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/516039>

[109] Judy P. Pu, Samuel A. Bowring, Jahandar Ramezani, Paul Myrow, Timothy D. Raub, Ed Landing, Andrea Mills, Eben Hodgin, Francis A. Macdonald. *Dodging snowballs: Geochronology of the Gaskiers glaciation and the first appearance of the Ediacaran biota*. *Geology* 2016;; 44 (11): 955–958.

<https://doi.org/10.1130/G38284.1>

[110] Chumakov Nikolay. (2009). *The Baykonurian glaciohorizon of the Late Vendian. Stratigraphy and Geological Correlation*. 17. 373-381. 10.1134/S0869593809040029. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/225411188>

[111] G. Dromart, J.-P. Garcia, S. Picard, F. Atrops, C. Lécuyer, S.M.F. Sheppard. *Ice age at the Middle–Late Jurassic transition?* *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 213, Issues 3–4, 2003, Pages 205–220, ISSN 0012-821X.

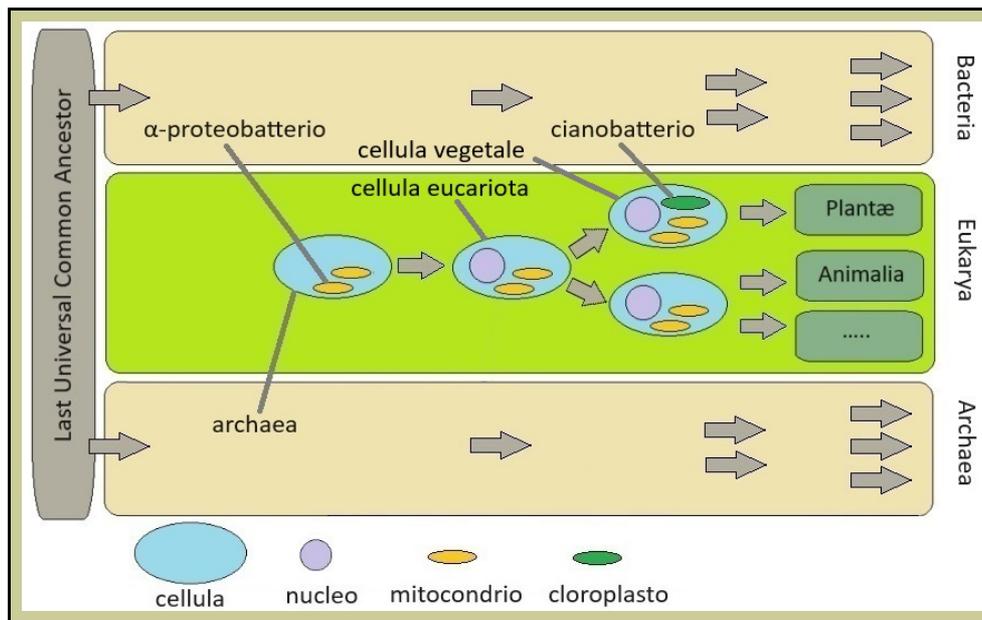
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00287-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00287-5)

[112] D.M. Lamb, S.M. Awramik, D.J. Chapman, S. Zhu. *Evidence for eukaryotic diversification in the ~1800 million-year-old Changzhougou Formation, North China*. *Precambrian Research*, Volume 173, Issues 1–4, 2009, Pages 93–104, ISSN 0301-9268

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.05.005>

eucariota sono ben note, per cui mi limito a indicare un riferimento divulgativo [113], "... dobbiamo essere preparati a confrontarci con l'idea che la nostra conoscenza [sulla sua formazione] rimarrà per sempre incompleta" [114].

Nonostante questo limite, le evidenze fornite dalla genetica molecolare, come la presenza nella cellula eucariota di una quantità di geni batterici e la presenza nei mitocondri di DNA che codifica ribosomi molto simili per dimensione e struttura a quelli batterici, sono tali che oggi è sostanzialmente accettato lo scenario delineato dalle **teorie di simbiogenesi**, secondo le quali la cellula eucariota è nata dalla fusione di precursori procarioti [115].



L'antenato comune universale degli *Eukarya* sarebbe pertanto una chimera. Lo schema generale dei vari modelli proposti per la sua formazione prevede che:

- inizialmente un *α-proteobatterio* è riuscito a sopravvivere all'interno di un *archaea*;
- si è generata tra *α-proteobatterio* e *archaea* una simbiosi che ha fornito a quest'ultimo un vantaggio in termini di produzione e quindi di disponibilità di energia;
- il proteobatterio si è progressivamente trasformato in **mitocondrio**, trasferendo il proprio codice genetico all'archaea – cosa che ha portato allo sviluppo del **nucleo**, caratteristica fondamentale delle cellule eucariote – mentre tracce residue del codice genetico del batterio originale le troviamo ancor oggi all'interno dei mitocondri, anche in quelli dell'uomo;
- successivamente un cianobatterio si è adattato a vivere in simbiosi all'interno della cellula eucariota trasformandosi in **cloroplasto** e originando la cellula vegetale [116].

[113] *Eukaryote*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Eukaryote>

[114] Toni Gabaldón. *Origin and Early Evolution of the Eukaryotic Cell*. Annual Review of Microbiology 2021 75:1, 631-647. |PDF|

<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-micro-090817-062213>

[115] Martin WF, Garg S, Zimorski V. *Endosymbiotic theories for eukaryote origin*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2015 Sep 26;370(1678):20140330. doi: 10.1098/rstb.2014.0330. PMID: 26323761; PMCID: PMC4571569. |PDF|

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4571569/>

[116] Nobs SJ, MacLeod FI, Wong HL, Burns BP. *Eukarya the chimera: eukaryotes, a secondary innovation of*

APPROFONDIMENTO

La cellula dal microscopio alla filogenesi molecolare

Nel 1624 Galileo Galilei [117] in una lettera indirizzata al principe Federico Cesi, fondatore dell'Accademia dei Lincei scrive:

“Firenze, 23 Settembre 1624 – Invio a V. E. un occhialino per vedere da vicino le cose minime, del quale spero ch'ella sia per prendersi gusto e trattenimento non piccolo, che così accade a me. Ho tardato a mandarlo, perchè non l'ho prima ridotto a perfezione, avendo avuto difficoltà nel ritrovare il modo di lavorare i cristalli perfettamente ... Io ho contemplato moltissimi animali con infinita ammirazione: tra i quali la pulce è orribilissima, la zanzara e la tignuola sono bellissime; e con gran contento ho veduto come facciano le mosche ed altri animalucci a camminare attaccati agli specchi, ed anche di sotto in su ... In somma ci è da contemplare infinitamente la grandezza della natura, e quanto sottilmente ella lavora, e con quanta indicibile diligenza” [118].

Il 28 novembre 1660 viene fondata a Londra la Royal Society allo scopo di promuovere l'eccellenza scientifica. Quattro anni dopo, il 23 novembre del 1664 viene emesso dalla Società l'ordine di stampa per la prima grande opera, la *“Micrographia”* [119] di Robert Hooke [120] che con il testo riportato a pag. 113 lascia in eredità il termine cellula:

“... our Microscope informs us that the substance of Cork is altogether fill'd with Air, and that that Air is perfectly enclosed in little Boxes or Cells distinct from one another...” [121].

Le ricerche di Hooke sono ispirate dai contatti che aveva avuto con l'olandese Antoni van Leeuwenhoek¹²² e che gli avevano permesso di costruire un microscopio. A sua volta a pagina 284 delle sue *“Epistolae”*, [123] in una lettera datata *“Delphis 5. Novembris 1716”* Leeuwenhoek – un commerciante di tessuti, dei quali controllava le caratteristiche impiegando lenti in grado di ingrandire, ma che attratto irresistibilmente dalle meraviglie del “piccolo”, si costruisce da solo i propri microscopi, li perfeziona incessantemente e per diletto con questi osserva di tutto – ci lascia una delle primissime evidenze dell'esistenza di "animaletti" unicellulari:

“Retro ad ædes meas ... quoddam est plumbeum planâ superficie tectum; in quo aqua pluvia, per aliquot dies postquam pluere desitum est, inexcicata superesse solet. In ista aqua quædam compluries animalcula vidi, corpusculo subrotundo, & magnitudine varia. Illorum diameter, cum adultâ magnitudine essent, tribus circiter diametris respondebat globulorum sanguineorum, qui

the two domains of life? Trends Microbiol. 2022 May;30(5):421-431. doi: 10.1016/j.tim.2021.11.003. Epub 2021 Dec 1. PMID: 34863611.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34863611/>

[117] Galileo Galilei (Pisa, 15 febbraio 1564 - Arcetri, 8 gennaio 1642).

[118] Galileo Galilei. *Lettera a Federico Cesi*, Firenze, 23 settembre 1624. In: *Le opere di Galileo Galilei. Prima edizione completa condotta sugli autentici manoscritti Palatini e dedicata a S.A.I. e R. Leopoldo II Granduca di Toscana*. Tomo VI, Firenze, Società Editrice Fiorentina, 1847, pag. 297.

<https://play.google.com/books/reader?id=Rv3Pb7orJcUC>

[119] Robert Hooke. *Micrographia*. London, 1667. |PDF|

<https://play.google.com/books/reader?id=W5FqAAAAMAAJ>

[120] Robert Hooke (Freshwater, 18 luglio 1635 - Londra, 3 marzo 1703).

[121] *“... il nostro microscopio ci informa che la sostanza del sughero è completamente piena di Aria, e che quell'Aria è perfettamente racchiusa in piccole Scatole o Cellule distinte l'una dall'altra...”*

[122] Anton van Leeuwenhoek (Delft, 24 ottobre 1632 - Delft, 27 agosto 1723).

[123] *Epistolæ Physiologicae Super Compluribus Nauræ Arcanis*, Delft, 1719.

<https://play.google.com/books/reader?id=fylOgaVf97gC>

sanguinem humanum colore tingunt rubicundo ... Animalcula ista pauculos intra dies sic numero aucta fuerunt, ut visu obstupescerem ... Quod si unicum animalculum octo enitatur pullos; & singuli pulli octo pullos eniti pergant; ex uno Animalculo, intra novenos dies, Animalcula 262144 exorientur" [124].

Nel 1756 Carlo Linneo [125] pubblica la sua opera nella quale, accanto a un inanimato "regno delle pietre" che non avrà seguito, riporta una classificazione degli esseri viventi suddividendoli in due regni, regno animale e regno vegetale, descrivendo i loro componenti con una nomenclatura binomia ancor oggi impiegata e organizzando i loro componenti in classi, ordini, generi e specie, con una struttura gerarchica che, pur con gli ampliamenti che si sono successivamente resi necessari, è tuttora alla base della classificazione dei viventi [126]. Nel 1875 il botanico Ferdinand Julius Cohn [127] nel primo volume del suo "*Contributi alla biologia delle piante*" [128] riporta tre capitoli dedicati a "*Untersuchungen über Bacterien*" [129] con i quali inizia a mettere ordine in un (allora) nuovo argomento, i batteri, che vengono classificati come appartenenti al regno vegetale. Alla fine del 1800 si fa strada l'idea di un terzo regno, il regno dei Protisti cui assegnare le forme che non sono né animali né piante e le forme di vita primitive, che diventa il regno degli esseri viventi unicellulari [130].

Édouard Chatton è il primo che osservando i diversi tipi di organizzazione cellulare propone i termini Procarioti ed Eucarioti, che riporta in un lavoro pubblicato nel 1925 [131]. Nel 1938 il regno dei protisti viene suddiviso separando da questo i procarioti, quindi si arriva a quattro regni: Animalia, Plantæ, Protista, Monera (unicellulari procarioti) [132].

[124] "*Dietro a casa mia ... c'è un tetto di piombo con una superficie piana; in cui l'acqua della pioggia, per diversi giorni dopo che ha cessato di piovere, di solito non si asciuga. In quell'acqua ho visto diversi animaletti, piccoli e rotondi, e di varie dimensioni. Il loro diametro, quando erano di taglia adulta, corrispondeva a circa tre diametri dei globuli sanguigni, che tingono di rosso il sangue umano ... Nel giro di pochi giorni questi animaletti erano aumentati così tanto di numero che rimasi stupito alla vista ... Ma se un solo animale alleva otto pulcini; e ciascuno dei pulcini produce otto pulcini; da un animaletto, in nove giorni, nascono 262.144 animaletti*".

[125] Carl Nilsson Linnaeus (Råshult, 23 maggio 1707 - Uppsala, 10 gennaio 1778).

[126] CAROLI LINNÆI ARCHIATR. REG. MED, ET BOT. PROFESS. UPSAL. SYSTEMA NATURÆ SISTENS REGNA TRIA NATURÆ IN CLASSES ET ORDINES GENERA ET SPECIES REDACTA, TABULISQUE ÆNEIS ILLUSTRATA, Accedunt vocabula Gallica. Editio multo auctior & emendatior. LUGDUNI BATAVORUM, Apud THEODORUM HAAK, MDCCLVI . | [PDF](#) |

<https://play.google.com/books/reader?id=WfQTAAAAQAAJ>

[127] Ferdinand Julius Cohn (Breslavia, 24 gennaio 1828 - Breslavia, 25 giugno 1898).

[128] *Beiträge zur Biologie der Pflanzen*. Breslau, 1875. | [PDF](#) |

https://play.google.com/books/reader?id=3Y_PAAAAMAAJ

[129] "*Studi sui batteri*".

[130] Rothschild, Lynn J.. "*Protozoa, protista, protoctista: What's in a name?*" *Journal of the History of Biology* 22 (1989). | [PDF](#) |

<https://zenodo.org/records/1232387/files/article.pdf>

[131] Édouard Chatton. "*Pansporella perplexa. Amœbien a spores protégées parasite des Daphnies. Réflexions sur la biologie et la phylogénie des Protozoaires*". In: ANNALES DES SCIENCES NATURELLES - ZOOLOGIE - COMPRENANT L'ANATOMIE, LA PHYSIOLOGIE, LA CLASSIFICATION ET L'HISTOIRE NATURELLE DES ANIMAUX. PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE M. E.-L. BOUVIER. DIXIEME SERIE. TOME VIII. PARIS MASSON ET CM, ÉDITEURS LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE. 120, Boulevard Saint-Germain. 1925, pagg. 5-86. | [PDF](#) |

<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k55415433/>

[132] Herbert F. Copeland. *The kingdoms of organisms*. *The Quarterly Review of Biology*, Volume 13,

Nel 1962 Roger Stanier e C. B. van Niel riprendono il lavoro di Chatton e pongono le basi per una suddivisione a monte del regno, il dominio (o impero o superregno). La gerarchia di Linneo diventa ora dominio > regno > tipo (phylum) > classe > ordine > famiglia > genere > specie e questa diventa la suddivisione degli esseri viventi:

→ dominio Prokaryota che include il regno Monera;

→ dominio Eukaryota che include i regni Animalia, Plantæ, Protista [133].

Nel 1969 in base alle differenze nella nutrizione – piante multicellulari autotrofi, animali multicellulari eterotrofi e funghi multicellulari saprofiti – la suddivisione diventa:

→ dominio Prokaryota che include il regno Monera;

→ dominio Eukaryota che include i regni Animalia, Fungi, Plantæ, Protista [134].

La rivoluzione della tassonomia si realizza quando per la tassonomia dei procariotici vengono impiegati il sequenziamento dell'RNA ribosomiale 16S e la sua analisi comparativa per mezzo degli alberi filogenetici e quando nel 1977 Carl Woese dimostra l'esistenza degli Archaea [135]. Nel 1990 la tassonomia basata sulla filogenesi molecolare riporta le origini della vita a tre domini: Archaea, Bacteria, Eucarya [136] e visto che è ampiamente accettato che gli Eucarya siano originati per endosimbiosi dagli Archaea, i domini possono forse essere ridotti a due: **Archaea** e **Bacteria** [137].

Per le ulteriori suddivisioni vale ancora la tassonomia tradizionale, che resta comunque didatticamente valida e con una solida base scientifica, che nel 2015 ha cassato il regno Protista, non più accettato come categoria a parte a causa della sua eterogeneità, e ora prevede:

→ un superregno **Prokaryota** che include i regni Bacteria e Archaea;

→ un superregno **Eukaryota** che include i regni Animalia, Fungi, Plantæ, Protozoa, Chromista [138].

Number 4, Dec., 1938. | **PDF** |

<https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/394568>

[133] Sapp J. *The prokaryote-eukaryote dichotomy: meanings and mythology*. Microbiol Mol Biol Rev. 2005 Jun;69(2):292-305. doi: 10.1128/MMBR.69.2.292-305.2005. | **PDF** |

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1197417/>

[134] R.H. Whittaker. *New Concepts of Kingdoms of Organisms: Evolutionary relations are better represented by new classifications than by the traditional two kingdoms*. SCIENCE, 10 Jan 1969, Vol 163, Issue 3863, pagg. 150-160.

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.163.3863.150>

[135] Balch William & Magrum Linda & Fox George & Wolfe Ralph & Woese Carl. (1977). *An ancient divergence among the bacteria*. Journal of molecular evolution. 9. 305-11. 10.1007/BF01796092. | **PDF** |

<https://www.researchgate.net/publication/22732598>

[136] Woese CR, Kandler O, Wheelis ML. *Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya*. Proc Natl Acad Sci U S A. 1990 Jun;87(12):4576-9. doi:

10.1073/pnas.87.12.4576. PMID: 2112744; PMCID: PMC54159. | **PDF** |

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC54159/>

[137] W. Ford Doolittle. *Evolution: Two Domains of Life or Three?* Current Biology, Volume 30, Issue 4, 2020, Pages R177-R179, ISSN 0960-9822, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.01.010>. | **PDF** |

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982220300105>

[138] Ruggiero MA, Gordon DP, Orrell TM, Bailly N, Bourgoin T, et al. (2015). *A Higher Level Classification of All Living Organisms*. PLOS ONE 10(4): e0119248. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119248>. | **PDF** |

<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0119248>

La formazione a - 1,6 Ga del supercontinente Columbia ci riporta all'ultima grande serie di cambiamenti di questo eone, che si verificano nell'evoluzione della crosta terrestre e che Rogers così ipotizza e riassume:

“Tre grandi blocchi continentali con età pari o superiore a 2,0 Ga potrebbero essere stati coinvolti nell'accrescimento di tutti i supercontinenti più giovani. Si chiamano Atlantica, Artica e Ur e sono riconosciuti principalmente dal modello di età di stabilizzazione cratonica all'interno di Pangea ...

Ur (3,0 Ga): le uniche grandi aree cratoniche stabilizzate risalenti a 3,0 Ga si trovano tutte in una parte della Pangea. Includono il cratone Kaapvaal, il cratone Dharwar occidentale dell'India, il cratone Singhbhum dell'India e il cratone Pilbara dell'Australia

Artica (2,5 Ga): cratoni di età di stabilizzazione di circa 2,5 Ga si trovano principalmente nel Nord America e in Siberia, e il continente che li contiene è stato chiamato Artica perché l'Oceano Artico si è aperto attraverso di loro. [“Kenorlandia” è il nome proposto per un continente di 2,5 Ga che includeva i cratoni canadesi di Artica] ...

Atlantica (2,0 Ga): numerosi cratoni ~2 Ga del Sud America e dell'Africa occidentale sembrano aver formato un continente coerente che non si fratturò fino alla disgregazione della Pangea...

Un supercontinente chiamato Columbia [Nuna] iniziò a formarsi a ~ 1,9 – 1,8 Ga ... [seguito da Rodinia un supercontinente formatosi a 1 Ga” [139]. Altrove aggiungendo: *“Il Gondwana orientale e occidentale si unirono per formare Gondwana a ~ 500 Ma, che si unì con Laurasia per formare Pangea a ~ 250 Ma” [140].*

Nance, che si limita ai più vasti blocchi continentali, riporta l'esistenza in successione dei seguenti “supercontinenti” (esclude Gondwana che non considera tale):

“Ur a circa 3.0 Ga; Kenorland e Lauroscandia a circa 2,7 – 2,5 Ga; Columbia (Nuna) a 1.6 – 1,4 Ga; Rodinia a 950 – 800 Ma; Pannotia (la cui esistenza è dibattuta) a 650 – 580 Ma; Pangea, dalla cui frammentazione derivano i continenti attuali, a 325 – 200 Ma” [141].

Se le differenti opinioni già viste su quanto accaduto nell'Archeano sono difficilmente riconciliabili in quanto legate alle difficoltà oggettive e probabilmente insormontabili nella ricostruzione di eventi così lontani, è possibile per i **supercontinenti** fornire una ricostruzione degli eventi che si sono succeduti a partire dal Proterozoico oggi ampiamente accettata soprattutto per le fasi che si sviluppano nel *Fanerozoico*, che vede nell'ordine la formazione di **Columbia** a - 1,5 Ga, **Rodinia** a - 1,0 Ga, **Gondwana** a - 500 Ma, **Pangea**, la cui frammentazione ha portato alla formazione dei continenti attuali a - 250 Ma [142].

[139] John J. W. Rogers, M. Santosh. *Continents and Supercontinents*. Oxford University Press, 2004, ISBN 9780195347333

[140] Rogers, John & Santosh, M. (2003). *Supercontinents in Earth History*. Gondwana Research. 6. 357-368. 10.1016/S1342-937X(05)70993-X. | [PDF](#) |

<https://www.researchgate.net/publication/222049723>

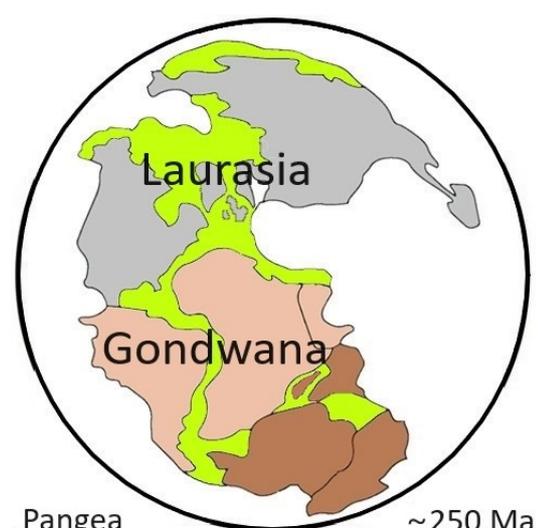
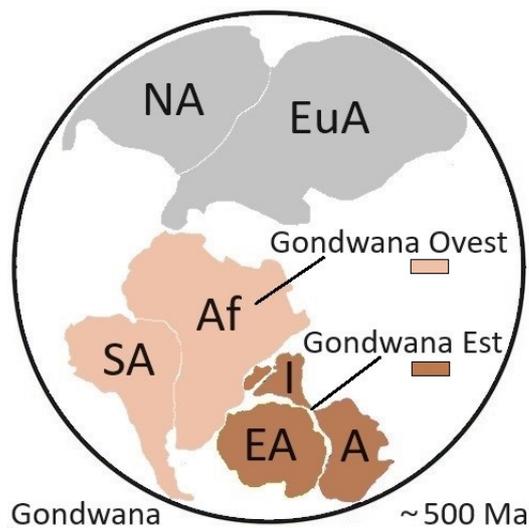
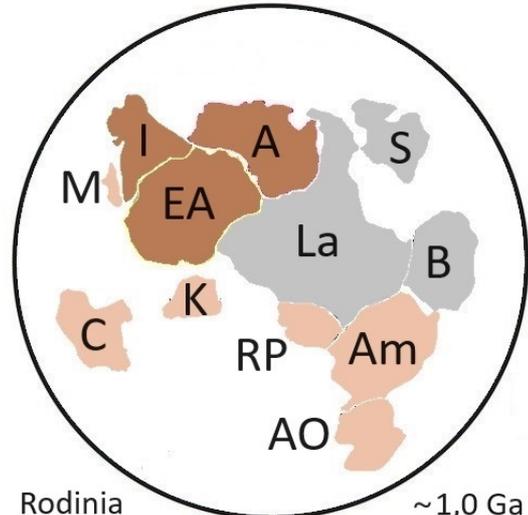
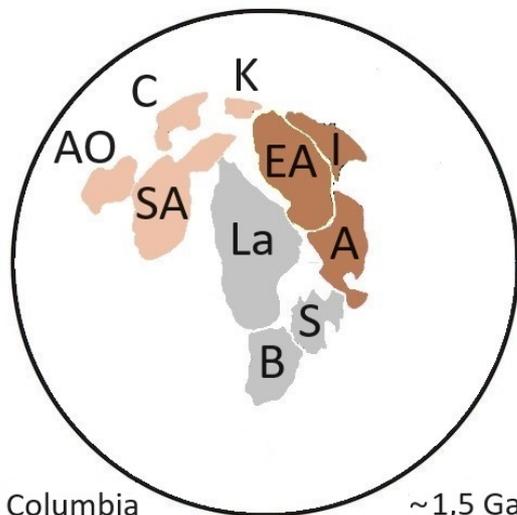
[141] R. Damian Nance. *The supercontinent cycle and Earth's long-term climate*. Ann NY Acad Sci. 2022; 1515: 33–49. | [PDF](#) |

<https://doi.org/10.1111/nyas.14849>

[142] Pangea: ricostruzione tratta integrando varie fonti. Columbia, Rodinia e Godwana, immagini CC BY 3.0 adattate da: Pant, N. C. & Dasgupta, S. (eds) 2017. *Crustal Evolution of India and Antarctica: The Supercontinent Connection*. Geological Society, London, Special Publications, 457, 1–6. First published online August 22, 2017. | [PDF](#) |

<https://doi.org/10.1144/SP457.14>

Nell'immagine l'evoluzione dei supercontinenti nella ricostruzione oggi condivisa, le sigle sono: **A** Australia, **Af** Africa, **Am** Amazonia, **AO** Africa Ovest, **B** Baltica, **C** Congo, **EA** Est Antartide, **EuA** Eurasia, **I** India, **K** Kalahari, **La** Laurentia, **M** Madagascar, **NA** Nord America, **RP** Rio de la Plata, **S** Siberia, **SA** Sud America.



Siamo nell'eone **Proterozoico**, a circa - 2 Ga, finora sono state le forme di vita bentoniche, cioè quelle sviluppatesi sul fondo del mare a partire dal Paleoarcheano a - 3,45 Ga, e precisamente i batteri, l'unica forma di vita sul pianeta. E i batteri fotosintetici, i cianobatteri, hanno lasciato tracce con le *Stromatoliti*, che se da un lato oggi forniscono una testimonianza preziosa del fatto che a questo punto la vita fosse già presente sulla Terra da un miliardo e mezzo di anni, dall'altro non consentono di individuare i singoli organismi che le compongono tanto che fino a tempi molto recenti non si era compresa l'origine della loro formazione.

Adesso sono invece le forme di vita planctoniche, cioè in grado di muoversi attivamente, a lasciarci i primissimi veri e propri fossili: sono gli *Acritarchi*, importanti in quanto sono ritenuti i fossili delle prime cellule eucariote.

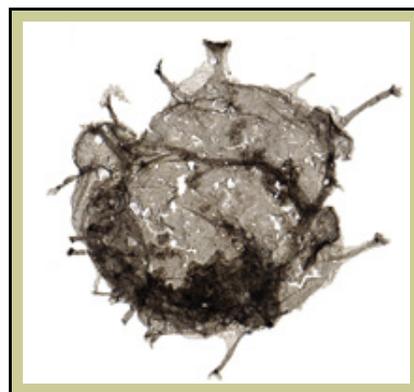
Nel nord della Cina sono stati trovati strati geologici che contengono "gli acritarchi eucariotici più antichi e meglio conservati conosciuti" risalenti a circa - 1,8 Ga:



"Questi fossili ... hanno dimensioni e complessità morfologica su scala fine che li fanno attribuire al dominio eucariotico ... variano in dimensioni da 62 μm a 216 μm . Le forme sono sferoidale, ellissoidale e fusiforme ... [alcuni] hanno una struttura di parete complessa con tre o più strati sono state identificate tredici entità morfologiche distinte. Questi risultati indicano che la vita microbica eucariotica era ben consolidata alla fine del Paleoproterozoico e aveva già subito una moderata diversificazione" [143].

Il tempo scorre in fretta, è già pomeriggio e il nostro orologio segna le 14:30.

Nel Montana (USA) nella "Greyson Formation" sono stati trovati microfossili di *Tappania plana* risalenti a circa - 1,5 Ga [144]. "Le complesse morfologie e microstrutture delle pareti degli esemplari di *Tappania* ... sono diagnosticamente eucariotiche. Tali caratteristiche sono completamente al di fuori della capacità di qualsiasi organismo privo di un citoscheletro completamente mobile e di un sistema di endomembrane ... almeno tre componenti separati (estensioni simili a un collo, processi e parete esterna dispiegata indipendentemente) dimostrano un livello di controllo morfogenetico paragonabile a quello di protisti viventi" [145].



Microfossili ben conservati di Acritarchi (*Shuiyousphaeridium macroreticulatum*) che popolavano gli oceani del Proterozoico sono stati documentati in depositi (*Ruyang Group*) nel nord della Cina risalenti a - 1,4 Ga. Anche in questo caso esistono evidenze che si tratti di cellule eucariote [146].

[143] D.M. Lamb, S.M. Awramik, D.J. Chapman, S. Zhu. *Evidence for eukaryotic diversification in the ~1800 million-year-old Changzhougou Formation, North China*. Precambrian Research, Volume 173, Issues 1–4, 2009, Pages 93-104, ISSN 0301-9268.

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.05.005>

[144] Nell'immagine *Tappania plana*, immagine riprodotta per cortesia del Prof. David W. Mogk, Montana State University.

[145] Adam Zachary, Skidmore Mark, Mogk David, Butterfield Nicholas. (2017). *A Laurentian record of the earliest fossil eukaryotes*. Geology. 45. G38749.1. 10.1130/G38749.1. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/315316943>

[146] Knoll Andrew & Javaux E.J & Hewitt David & Cohen Phoebe. (2006). *Eukaryotic organisms in Proterozoic oceans*. Philos Trans R Soc B Biol Sci 361: 1023-1038. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences. 361. 1023-38. 10.1098/rstb.2006.1843. | PDF |

<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2006.1843>

<https://www.researchgate.net/publication/7027647>

Sono state collegate a *Bangiomorpha pubescens*, un'alga rossa, attorno a - 1,2 Ga, ben tre fondamentali innovazioni: la comparsa nella cellula eucariota della fotosintesi, della multicellularità e della riproduzione sessuata:

"I filamenti multicellulari della Formazione Hunting di ca. 1 200 Ma (Isola di Somerset, Canada artico) sono identificati come alghe rosse [*Bangiomorpha pubescens*] ... La formazione differenziale di spore/gameti mostra che *Bangiomorpha pubescens* si riproduceva sessualmente, il più antico evento riportato nei fossili. Il sesso era fondamentale per il successivo successo degli eucarioti, non tanto per i vantaggi della ricombinazione genetica, ma perché consentiva una complessa multicellularità. I vantaggi selettivi della multicellularità sono considerati sufficienti per essere sorti immediatamente dopo la comparsa della riproduzione sessuale ... *Bangiomorpha pubescens* è la prima occorrenza della multicellularità complessa nei fossili ... la multicellularità eucariotica è l'innovazione che ha reso la morfologia degli organismi un fattore significativo nel processo evolutivo ... che può quindi spiegare la radiazione mesoproterozoica / neoproterozoica degli eucarioti" [147] [148].

Strati risalenti a - 1 Ga dell'Artico Canadese hanno restituito una quantità rilevante di microfossili, tra i quali *Ourasphaira giraldae* che viene considerata come il primo fungo [149]. Sulla terraferma, finora nuda e brulla, iniziano a comparire associazioni simbiotiche di alghe e funghi: i licheni [150].

Sempre a - 1 Ga si ha la formazione del supercontinente Rodinia:

"La disgregazione del supercontinente chiamato Rodinia ebbe inizio circa 825 milioni di anni fa e proseguì per quasi cento milioni di anni, generando un anello di continenti sparsi intorno all'equatore ... [e] fece precipitare la Terra in una serie di ere glaciali globali, che iniziarono circa 715 milioni di anni fa e durarono quasi 80 milioni di anni" [151].

Ed è nell'intervallo tra la glaciazione Sturtiana e la glaciazione Marinoana quindi attorno a - 650 Ma che il mondo finora dominato dai cianobatteri diventa progressivamente un mondo dominato dalle alghe [152]. Con il prevalere degli *Eukaria* sui *Bacteria* si creano i presupposti per un ultimo evento

[147] Butterfield NJ. *Bangiomorpha pubescens* n. gen., n. sp.: implications for the evolution of sex, multicellularity, and the Mesoproterozoic/Neoproterozoic radiation of eukaryotes. *Paleobiology*. 2000;26(3):386-404. doi:10.1666/0094-8373(2000)026<0386:BPNGNS>2.0.CO;2. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/278693786>

[148] Timothy M. Gibson, Patrick M. Shih, Vivien M. Cumming, Woodward W. Fischer, Peter W. Crockford, Malcolm S.W. Hodgskiss, Sarah Wörndle, Robert A. Creaser, Robert H. Rainbird, Thomas M. Skulski, Galen P. Halverson. *Precise age of Bangiomorpha pubescens dates the origin of eukaryotic photosynthesis*. *Geology* 2017;; 46 (2): 135–138.

<https://doi.org/10.1130/G39829.1>

[149] Loron Coentini & Rainbird Robert & Turner Elizabeth C & Greenman J. Wilder & Javaux Emmanuelle. (2018). *Organic-walled microfossils from the late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic lower Shaler Supergroup (Arctic Canada): Diversity and biostratigraphic significance*. *Precambrian Research*. 321. 10.1016/j.precamres.2018.12.024. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/329839018>

[150] Donald R. Prothero (2021), cap. 7.

[151] Henry Gee (2022), pag. 19.

[152] Timothy W. Lyons, Mary L. Droser, Kimberly V. Lau, Susannah M. Porter, Jochen J. Brocks; *The transition from a cyanobacterial to algal world and the emergence of animals*. *Emerg Top Life Sci* 28 September 2018; 2 (2): 181–190.

<https://doi.org/10.1042/ETLS20180039>

al termine del Proterozoico: la comparsa dei metazoi, che pone fine al dominio incontrastato degli organismi unicellulari durato quasi tre miliardi di anni.

Il nostro orologio segna le 20:30, si è già fatta sera quando inizia il periodo *Ediacarano* come ci racconta Donald R. Prothero:

"L'assenza di fossili del Precambriano ha costituito per molto tempo un grande problema per la biologia evolutiva. Charles Darwin ne era tormentato, e così altri studiosi, fino all'indubbio ritrovamento del 1954 e alla conferma, alla fine degli anni cinquanta, che le stromatoliti erano il risultato dell'attività di tappeti di cianobatteri.

Queste scoperte mostravano che, da circa 3,5 miliardi a 630 milioni di anni fa, le uniche forme di vita erano organismi unicellulari. Non esistevano fossili di esemplari pluricellulari prima della cosiddetta 'esplosione del Cambriano', e molti pensavano che non fosse possibile trovare la vita in quel misterioso e sconcertante intervallo temporale che precedeva la comparsa dei trilobiti.

In seguito, alcuni frammenti insoliti cominciarono a comparire all'interno delle rocce. La maggior parte era di creature dal corpo molle piuttosto grandi (alcune di quasi 1 metro di diametro) che non avevano sviluppato parti dure. Si trattava di impronte fossili imprigionate nelle arenarie o nelle argilliti dei fondali marini, e nessuna presentava un corpo intero (un problema, in mancanza di conchiglie o altri rivestimenti più spessi) ...

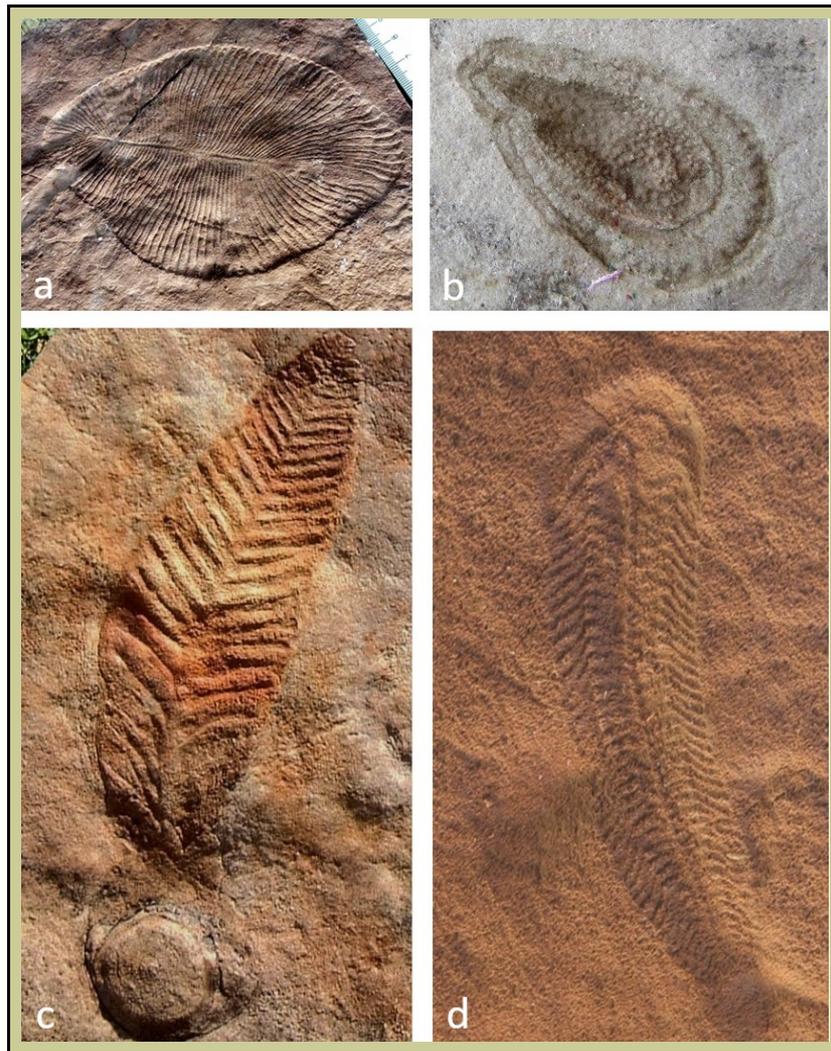
... La più rilevante e meglio studiata tra queste strane associazioni faunistiche proviene dalle colline di Ediacara, nella catena dei Flinders Ranges, in Australia meridionale, circa 300 chilometri a nord di Adelaide ... conformati più come un materasso ad acqua, con una struttura a 'mosaico trapuntato' e nessuna evidenza di un tubo digerente o neurale, come avviene nei vermi più semplici: ciò suggeriva che la fauna di Ediacara non avesse organi o apparati. Per contro, questi 'materassi' riempiti di fluidi possedevano la massima superficie rispetto al volume, poiché la 'trapuntatura' consentiva loro di espandersi. Assorbivano nutrienti e ossigeno direttamente attraverso una membrana altamente avviluppata, rilasciando allo stesso modo i prodotti di scarto ... l'enorme superficie rispetto al volume potrebbe aver permesso a queste creature di ospitare un gran numero di cianobatteri o di alghe simbiotiche all'interno dei tessuti.

Questi microrganismi fotosintetici fornivano ossigeno e assorbivano l'anidride carbonica, come avviene oggi all'interno delle barriere coralline e in molte associazioni simbiotiche marine ... [e] hanno dimostrato senza ombra di dubbio [che] il salto dalla vita unicellulare alle grandi creature pluricellulari è avvenuto 630 milioni di anni fa. Dopo una glaciazione planetaria che ha avviluppato la Terra dai poli all'equatore, condizioni più favorevoli hanno innescato la loro diversificazione. Per i successivi 90 milioni di anni sono state praticamente le uniche forme di vita, fino al momento in cui, durante la fine del loro dominio, hanno iniziato ad apparire piccoli organismi dotati di guscio. Dopo che questi hanno preso il sopravvento, si sono drasticamente ridotte e 500 milioni di anni fa la fauna di Ediacara si era ormai estinta del tutto, lasciandosi alle spalle il mistero della sua biologia" [153].



Nell'immagine alla pagina seguente sono riportati alcuni dei fossili più significativi dell'Ediacarano, le cui specie rappresentano il prologo alla successiva evoluzione e alla diffusione dei metazoi.

[153] Prothero, Donald R (2021), cap. 2.



(a) *Dickinsonia costata* ^[154] per la quale abbiamo la conferma che si tratti di un metazoo ^[155], (b) *Kimberella quadrata* ^[156], (c) *Charniodiscus arboreus* ^[157], (d) *Spriggina floundersi* ^[158].

[154] Verisimilus at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DickinsoniaCostata.jpg>

[155] Renee S. Hoekzema, Martin D. Brasier, Frances S. Dunn, Alexander G. Liu. *Quantitative study of developmental biology confirms Dickinsonia as a metazoan*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 2017-09-13 284(1862): 20171348. | [PDF](#) |

<https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspb.2017.1348>

<https://www.researchgate.net/publication/319665688>

[156] Aleksey Nagovitsynderivative work: Martin, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kimberella_crop.jpg

[157] tina negus from UK, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charniodiscus_arboreus.jpg

[158] Merikanto~commonswiki assumed (based on copyright claims)., CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spriggina_Floundensi_4.png

RIASSUMENDO

Nel Proterozoico, il più lungo degli eoni, che si estende per ben 2 miliardi di anni, si verificano numerosi eventi, alcuni dei quali saranno fondamentali nel determinare il futuro della vita sulla Terra:

- nell'atmosfera compare l'ossigeno;
- compare la cellula eucariota;
- negli eucarioti compaiono fotosintesi, riproduzione sessuata e multicellularità;
- nei tappeti bentonici ai batteri si vanno sostituendo le alghe;
- sulla terraferma compaiono funghi e associazioni simbiotiche di alghe e funghi;
- nell'Ediacarano, al termine del Proterozoico, compaiono i primi metazoi.

Ci sono oramai tutte le condizioni per il successivo spettacolare sviluppo della vita.



4.

FANEROZOICO

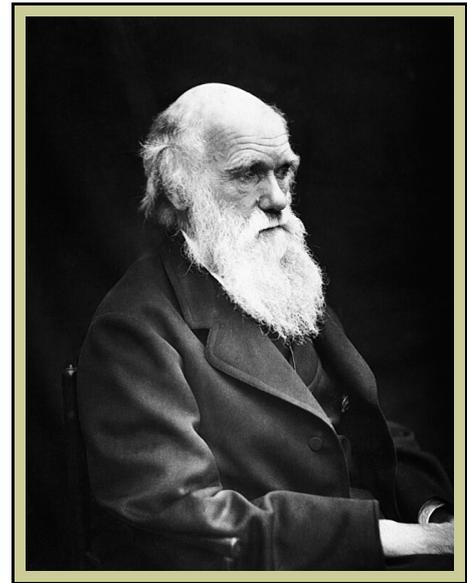
da - 538,8 Ma a oggi

Eone	Era	Periodo	Ma	Eventi / Fossili
Termina l'eone Proterozoico			- 539	Inizia l'eone Fanerozoico Inizia l'era Paleozoica
Fanerozoico	Paleozoico	Cambriano	- 521 - 508 - 500	Small Shelly Fauna, <i>Cloudina</i> <i>Trilobiti</i> Burgess Shale (argillite di Burgess), <i>Anomalocaris</i> , <i>Hallucigenia</i> , <i>Marrella</i> , <i>Opabinia</i> , <i>Ottoia</i> , <i>Pikaia</i> Sud America, Africa, India, Madagascar, Australia e Antartide si uniscono a formare il Gondwana
		Ordoviciano	- 467 - 450 - 445	<i>Brachiopodi</i> , <i>briozoi</i> , <i>molluschi</i> , <i>echinodermi</i> , <i>coralli</i> , <i>Endoceras giganteus</i> , <i>Pentecopecterus</i> Intensa pioggia meteorica Microfossili confermano la presenza delle prime piante terrestri Gli artropodi iniziano a colonizzare la terraferma Inizia l'era glaciale Andino-Sahariana Estinzione dell'Ordoviciano-Siluriano
		Siluriano	- 444 - 433 - 430 - 420	Estinzione dell'Ordoviciano-Siluriano <i>Pterygotus</i> (scorpioni di mare) Sulla terraferma tappeto di briofite Compaiono i primi fossili vegetali macroscopici <i>Cooksonia</i> (pianta vascolare primitiva) Termina l'era glaciale Andino-Sahariana
		Devoniano	- 372 - 360 - 359	<i>Cladoselache fylleri</i> , <i>Diplacanthus striatus</i> , <i>licopodi</i> Estinzione del tardo Devoniano (prima parte) Inizia l'era glaciale tardo-paleozoica (Karoo) Estinzione del tardo Devoniano (seconda parte)
		Carbonifero	- 359	<i>Arthropleura</i> , <i>ammoniti</i> , <i>crinoidi</i> , <i>licopodi</i>
		Permiano	- 260 - 252	Termina l'era glaciale tardo-paleozoica (Karoo) Gondwana, Eurasia e Nord America si aggregano nel supercontinente Pangea Estinzione del Permiano
Termina l'era Paleozoica del Fanerozoico			- 252	Inizia l'era Mesozoica del Fanerozoico

Non si può affrontare il periodo Cambriano senza partire da Charles Darwin ^[159], nato, cresciuto ed educato in una Inghilterra nella quale, a proposito della nostra casa nell'Universo, valeva un principio: l'età della Terra era quella calcolata sulla base della Bibbia, 6 000 anni.

Nel 1831 Darwin è a bordo della nave HMS Beagle:

"Mentre era, sul finire del 1831, a bordo della HMS Beagle, in viaggio alla volta di isole dei tropici ove doveva maturare la sua teoria dell'evoluzione, Darwin studiava con attenzione il libro di Charles Lyell da poco pubblicato con il titolo "The principles of Geology" ("Principi di geologia", pubblicato in tre volumi tra il 1830 e il 1833), che aveva appena riscoperto il lavoro di Hutton, una generazione dopo che era stato dimenticato da quasi tutti gli studiosi. Secondo Darwin, il punto chiave del libro di Lyell coincideva proprio con l'idea che la Terra fosse molto vecchia ... un'idea la cui paternità Lyell attribuisce esplicitamente a Hutton nelle prime pagine dei Principles. L'antichità della Terra doveva costituire per Darwin una vera rivelazione. All'Università di Cambridge gli era stato insegnato a prestar fede agli insegnamenti della Genesi; e inizialmente si era mostrato assai scettico verso tutte quelle posizioni che contraddicevano idee all'epoca così condivise. Però, durante l'esplorazione di Sant'Jago, una delle isole dell'arcipelago di Capo Verde, al largo della costa africana – prima tappa del Beagle – aveva osservato un'intatta striscia rocciosa, detta strato, formata da conchiglie e coralli. Era a tal punto intatta, che sembrava una barriera corallina che in qualche modo si fosse pietrificata. Una tale striscia di conchiglie e coralli, tuttavia non era così rara; ma questa si trovava all'altezza di quindici metri sul livello del mare. Il solo modo in cui il delicato strato di fossili marini avrebbe potuto raggiungere quel livello era grazie al graduale sollevamento del terreno, un processo che era stato descritto da Lyell e, prima di lui, da Hutton. Lo strato di Sant'Jago doveva mostrare a Darwin che Lyell e Hutton erano nel giusto: la Terra era antica" ⁽¹⁶⁰⁾.



Altro che i 6 000 anni della Bibbia. Davanti a Darwin si stava aprendo l'abisso di tempo appena scoperto dai geologi nelle pieghe della crosta terrestre: e per la sua *teoria dell'origine delle specie* ⁽¹⁶¹⁾ uno degli elementi chiave era proprio il molto tempo necessario a garantire l'evoluzione. In seguito al successo della sua teoria, delle nuove scoperte dei geologi e alle continue ricerche e ritrovamenti di fossili si vanno consolidando tre idee: l'età della Terra è estremamente lunga, la vita è assente nel Precambriano, la vita è andata incontro a quella definita come la sua "esplosione" nel Cambriano. Ma i dubbi su questa inspiegabile "esplosione" rimangono, a causa del fatto che rocce e depositi precambriani sono stati compattati e metamorfosati dal tempo enorme che ci separa da loro e che gli esseri viventi, unicellulari o multicellulari, composti solamente da parti molli, hanno lasciato tracce o indizi che è stato estremamente difficile trovare e decodificare (valga per tutti il

[159] Charles Robert Darwin (Shrewsbury, 12 febbraio 1809 - Londra, 19 aprile 1882). Immagine: Julia Margaret Cameron, Public domain, via Wikimedia Commons.

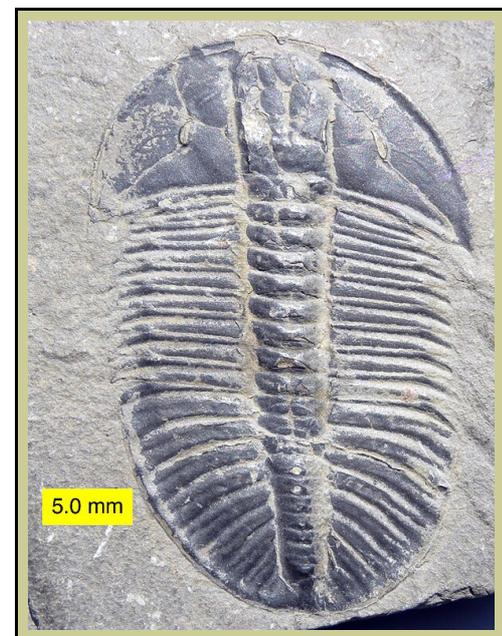
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charles_Darwin_01.jpg

[160] Jack Repcheck (2004), pag. 14.

[161] Charles Darwin (1872).

caso già illustrato delle Stromatoliti [162]). Ed è solamente negli ultimi decenni che sommando le informazioni che si possono ottenere con dati geologici e paleomagnetici, datazione con radioisotopi e rapporti tra i diversi isotopi, tecniche per estrarre dalla rocce i potenziali resti biologici, microscopia elettronica, microtomografia e quant'altro di più innovativo si può applicare, è stato possibile dimostrare che la vita era già presente nel Precambriano.

Possiamo quindi riprendere la nostra cronistoria dalla transizione Precambriano-Cambriano che vede la fine del primo e l'inizio del secondo collegati da "small shelly fauna" o "small shelly fossils" (SSF) [163], cioè una piccola fauna con gusci calcarei che troviamo sotto forma di piccoli fossili duri, la maggior parte di dimensioni millimetriche. Le specie che sono state ricostruite da questi reperti sono molte, qui riporto l'esempio della *Cloudina*, che nei fossili appare come una sequenza di coni cavi calcificati, inseriti l'uno nell'altro ma separati, a indicare il loro originario collegamento attraverso parti molli, che con una lunghezza variabile da 8 mm a 15 cm potrebbe avere avuto l'aspetto qui rappresentato [164], con all'interno dei coni calcarei l'animale



che si difendeva dai predatori mediante queste armature e che potrebbe essere stato tra i primissimi a sviluppare un canale intestinale. Da notare che spostare gli scambi con l'ambiente dalla superficie esterna dell'organismo a una superficie interna rappresenta un primo passo necessario per potere abbandonare l'ambiente marino: mancano ancora molte altre cose, ma col tempo arriveranno anche quelle.

A - 539 Ma inizia il **periodo Cambriano**, che termina a - 485 Ma. Attorno a - 521 Ma iniziano a comparire le *trilobiti* che popoleranno gli oceani per 270 milioni di anni, che scompariranno solamente nel corso della grande estinzione del Permiano a - 252 Ma e che hanno lasciato una quantità straordinaria di fossili [165].

A - 508 Ma si forma un deposito che oggi si trova in Canada nella British Columbia, noto come *Burgess Shale* (argillite di Burgess) e famoso per l'eccezionale

[162] Vedi l'approfondimento: *Il Precambriano, i dubbi di Darwin e le stromatoliti*.

[163] Michael Steiner, Guoxiang Li, Yi Qian, Maoyan Zhu, Bernd-Dietrich Erdtmann. *Neoproterozoic to Early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China)*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 254, Issues 1–2, 2007, Pages 67-99, ISSN 0031-0182.

<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.03.046>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018207001757>

[164] Nobu Tamura (nobu.tamura@yahoo.com), CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://en.wikipedia.org/wiki/Cloudinidae#/media/File:Cloudina_NT.jpg

[165] Wilson44691, Public domain, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cambrian_Trilobite_Olenoides_Mt._Stephen.jpg

conservazione delle parti molli dei suoi fossili. Si sta facendo notte, il nostro orologio oramai segna le 21:15.

Nell'immagine, in alto un fossile di *Ottoia tricuspida*, un verme lungo in media 8 cm, che possedeva una caratteristica "proboscide" estendibile qui ben evidente, tipica dei priapulidi [166] e in basso un fossile di *Pikaia*, che possedeva una notocorda, la formazione anatomica che caratterizza il phylum dei *cordati*, dal quale si evolveranno tutti i vertebrati: acquatici (pesci), aerei (uccelli) e terrestri (anfibi, rettili e mammiferi) [167].



[166] Smith M.R., Harvey T.H.P. and Butterfield N.J. (2015). *The macro- and microfossil record of the Cambrian priapulid Ottoia*. *Palaeontology*, 58: 705-721. <https://doi.org/10.1111/pala.12168>. | PDF | <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pala.12168>

Immagine: Martin R. Smith, CC0, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ottoia_tricuspida_ROM_63057.jpg

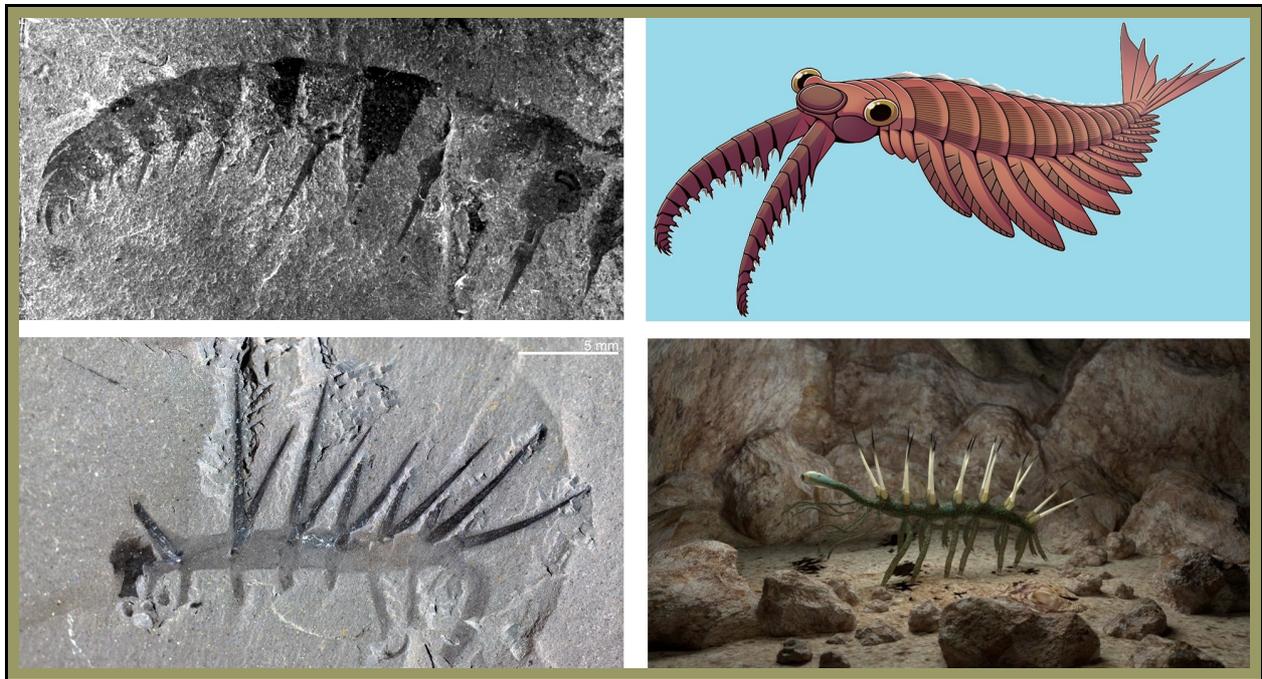
[167] Giovanni Mussini, M. Paul Smith, Jakob Vinther, Imran A. Rahman, Duncan J.E. Murdock, David A.T. Harper, Frances S. Dunn. *A new interpretation of Pikaia reveals the origins of the chordate body plan*. *Current Biology*, Volume 34, Issue 13, 2024, Pages 2980-2989.e2, ISSN 0960-9822. | PDF | <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.05.026>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982224006699>

Immagine: Chip Clark, CC0, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:USNM_PAL_57628_Pikaia_gracilens.jpg

Qui due altri esempi di fossili del Burgess Shale. In alto a sinistra il fossile di un artiglio di *Anomalocaris canadensis* [168] con a destra la ricostruzione completa [169] che ovviamente è stata resa possibile da ulteriori e più estesi reperti. Faceva parte degli Artropodi, e poteva arrivare a 70 cm di lunghezza. In basso a sinistra fossile di *Hallucigenia sparsa* [170], con a destra la sua ricostruzione [171]. Poteva arrivare a 5 cm di lunghezza.



Le Trilobiti e una grande varietà di Artropodi, nei quali si documenta l'evoluzione di sistemi digestivi sofisticati [172], sono caratteristici di questo periodo, ma vanno ricordate anche le alghe: *"Le alghe erano già molto antiche e avevano una lunga storia antecedente l'inizio del Cambriano. Le alghe blu-verdi fossili sono presenti in rocce precambriane risalenti a più di un miliardo di anni prima dell'inizio del Cambriano. La maggior parte dello sviluppo evolutivo delle alghe ha avuto luogo prima del Cambriano. All'inizio di questo periodo, tutti i phyla di alghe sembrano essere stati presenti"* [173].

[168] James St. John, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>>, da Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anomalocaris_canadensis_grasping_claw,_Burgess_Shale.jpg

[169] Modificato da: Junnn11, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20191203_Anomalocaris_canadensis.png

[170] Han Zeng, CC0, da Wikimedia Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:USNM_PAL_83935_Hallucigenia_sparsa_Image_1.jpg

[171] Jose manuel canete, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H._sparsa.jpg

[172] Vannier, J., Liu, J., Lerosey-Aubril, R. et al. *Sophisticated digestive systems in early arthropods*. *Nat Commun* **5**, 3641 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4641> | PDF |

[173] Harlan Johnson J. (1965). *The Cambrian algal flora*. *Journal of Palaeosciences*, **14**((1-3), 19–25. | PDF | <https://doi.org/10.54991/jop.1965.710>

<https://jpsonline.co.in/index.php/jop/article/download/710/698>

E infine non va dimenticata la vita terrestre:

"[dati] ... che suggeriscono attività biologica in paleosuoli risalenti a oltre 3 400 milioni di anni fa, avallano l'idea che la vita sulla terraferma si sia forse verificata parallelamente alla vita acquatica nel Paleoarcheano ... e che i batteri abbiano generato i primi ecosistemi terrestri, almeno a partire dal Neoarcheano, formando una copertura ricca di biomassa dei terreni dove in seguito si sono evoluti gli ecosistemi dominati dalle piante" [174].

Attorno a - 500 Ma Sud America, Africa, India, Madagascar, Australia e Antartide si uniscono a formare il continente Gondwana.

A - 485 Ma inizia il **periodo Ordoviciano**, che ha una durata di 41 milioni di anni. La vita continua a diversificarsi negli oceani, come documentato dai ritrovamenti di fossili di invertebrati: brachiopodi, briozoi, molluschi, echinodermi, coralli. Significativo è questo calcare fossilifero [175].



[174] Beraldi-Campesi, H. *Early life on land and the first terrestrial ecosystems*. *Ecol Process* 2, 1 (2013). <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-1>. | PDF |

<https://ecologicalprocesses.springeropen.com/articles/10.1186/2192-1709-2-1>

[175] Proveniente dalla Formazione Liberty (Ordoviciano superiore) del Caesar Creek State Park vicino a Waynesville, Ohio. Pubblico dominio: Wilson44691, CC0, via Wikimedia Commons.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LibertyFormationSlab092313.jpg>

Gli oceani dell'Ordoviciano ospitano molluschi di dimensioni enormi come *Endoceras giganteus* un cefalopode del quale si sono rinvenuti gusci della lunghezza di tre metri [176], forse il più grosso predatore del periodo, del quale vediamo qui due fossili che sono stati completati con la rappresentazione delle parti molli [177]



e giganteschi artropodi acquatici, i primi *Eurypteridi*, un gruppo estinto cui apparteneva *Pentecopterus* [178] la cui ricostruzione è riportata alla pagina successiva..

Sono sempre gli artropodi che iniziano ora a colonizzare la terraferma:

"La datazione molecolare ... stima che gli Arachnida abbiano avuto origine durante il Cambriano o l'Ordoviciano. Dopo che l'antenato comune ha colonizzato la terra, le discendenze principali sembrano essersi rapidamente irradiate nell'intervallo tra Cambriano e Ordoviciano" [179].

Microfossili dispersi di spore e frammenti vegetali forniscono la prima evidenza della presenza di piante terrestri [180].

[176] *Endoceras giganteum*. Museum of Comparative Zoology.

<https://www.biodiversitylibrary.org/page/3199542#page/115/mode/1up>

[177] Antonov, CC0, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Endoceras_spp_Svezia_Museo_Milano.png

[178] Lamsdell JC, Briggs DE, Liu HP, Witzke BJ, McKay RM. *The oldest described eurypterid: a giant Middle Ordovician (Darriwilian) megalograptid from the Winneshiek Lagerstätte of Iowa*. BMC Evol Biol. 2015 Sep 1;15:169. doi: 10.1186/s12862-015-0443-9. PMID: 26324341; PMCID: PMC4556007. |PDF|

[179] Lozano-Fernandez Jesus , Tanner Alastair R. , Puttick Mark N. , Vinther Jakob , Edgecombe Gregory D. , Pisani Davide. *Cambrian–Ordovician Terrestrialization of Arachnids*. Frontiers in Genetics, 11, 2020. |PDF| <https://www.frontiersin.org/journals/genetics/articles/10.3389/fgene.2020.00182>

[180] Wellman CH, Gray J. *The microfossil record of early land plants*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2000 Jun 29;355(1398):717-31; discussion 731-2. doi: 10.1098/rstb.2000.0612. PMID: 10905606; PMCID: PMC1692785. |PDF|

<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2000.0612>



Nell'immagine a sinistra conchiglia fossile di brachiopode [181], al centro colonie di briozoi [182], a destra ricostruzione del *Pentecopterus* [183].

Nel medio Ordoviciano a -467 Ma è documentata una intensa pioggia meteorica di grandi frammenti, con un incremento del tasso di craterizzazione che deve avere determinato un importante stress sull'ambiente [184].

A -445 Ma, poco prima della fine dell'Ordoviciano, si verifica la prima delle cinque grandi estinzioni, l'estinzione Ordoviciano-Siluriana, considerata in termini di estensione come seconda solo a quella quella del Permiano, circa l'85% delle specie scompaiono. La causa generalmente attribuita alla glaciazione Andino-Sahariana che si verifica tra -450 e -420, recentemente è stata attribuita invece alla produzione di gas serra da parte di intense eruzioni vulcaniche, con conseguente riscaldamento e anossia delle acque oceaniche [185]: e due ipotesi così diverse ci consentono di ricordare le grandi difficoltà che ci sono nella ricostruzione di eventi così lontani.

A -444 Ma inizia, con la prosecuzione della grande estinzione della fine dell'Ordoviciano, il **periodo Siluriano** che terminerà a -419 Ma.

[181] *Paraspirifer bownockeri*. Antonov, Public domain, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paraspirifer_bownockeri_Mid_Devonian.JPG

[182] British Museum (Natural History). Gregory, J. W., Public domain, via Wikimedia Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Catalogue_of_the_fossil_Bryozoa_in_the_Department_of_geology_BHL17136586.jpg

[183] Patrick Lynch, CCO, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eurypterids_Pentecopterus_Vertical.jpg

[184] Korochantseva E.V., Trieloff M., Lorenz C.A., Buykin A.I., Ivanova M.A., Schwarz W.H., Hopp J. and Jessberger E.K. (2007), *L-chondrite asteroid breakup tied to Ordovician meteorite shower by multiple isochron 40Ar-39 Ar dating*. *Meteoritics & Planetary Science*, 42: 113-130. | PDF |

<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2007.tb00221.x>

[185] David P.G. Bond, Stephen E. Grasby. *Late Ordovician mass extinction caused by volcanism, warming, and anoxia, not cooling and glaciation*. *Geology* 2020, 48 (8): 777-781. | PDF |

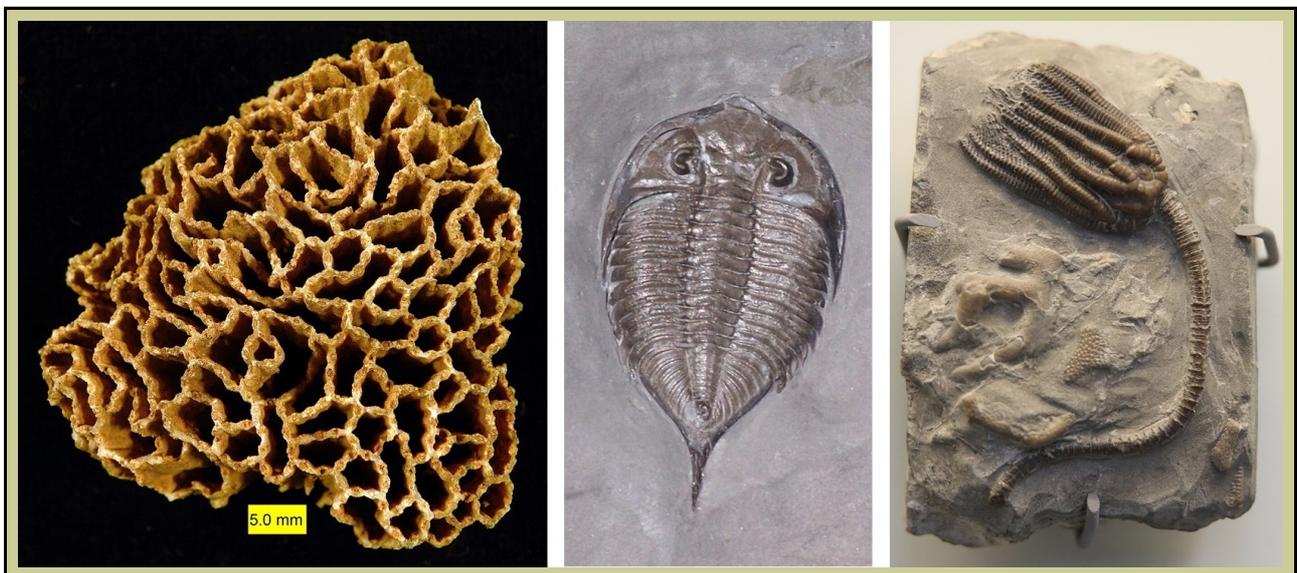
<https://doi.org/10.1130/G47377.1>

Continua la diffusione degli *Euripteridi* (scorpioni di mare) artropodi destinati, come le trilobiti, a scomparire con la grande estinzione del Permiano, in questo fossile se ne vedono cinque del



genere *Pterygotus* [186]: erano mediamente della lunghezza di 20 cm, con esemplari che avrebbero raggiunto i 2 m.

Vertebrati (pesci) e invertebrati (cefalopodi, trilobiti, crinoidi, gasteropodi, coralli, alghe, stelle marine, brachiopodi, briozoi) popolano gli oceani in questo periodo.



[186] Pubblico dominio. Daderot, CC0, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pterygotus,_sea_scorpion,_Silurian,_Fiddlers_Green_Formation,_Phelps_Member,_Lang%27s_Quarry,_Herkimer_County,_New_York,_USA_-_Houston_Museum_of_Natural_Science_-_DSC01993.JPG

Nell'immagine alla pagina precedente a sinistra un corallo tabulato [187], al centro un trilobite [188], a destra un crinoide o "giglio di mare" [189].

Compaiono i *Sarcopterigi*, pesci ossei con pinne lobate. Questi vertebrati sono caratterizzati da prominenti gemme muscolari degli arti (lobi) all'interno delle loro pinne, che sono supportate da scheletri appendicolari articolati. Si tratta di un evento molto interessante che viene messo in relazione con la successiva evoluzione dei pesci del Devoniano, che sono a loro volta alla base dell'evoluzione dei tetrapodi. Insomma, il fatto che le quattro pinne siano supportate da un primitivo e iniziale apparato scheletrico è il cambiamento che apre la strada agli strumenti di locomozione indispensabili per uscire dall'acqua e affrontare la vita terrestre. Nell'immagine in primo piano appare *Sparalepis tingi*, il sarcopterigio scoperto in Cina: sono rappresentati anche numerosi conodonti, una coppia di placodermi mascellari *Entelognathus* (in secondo piano) e due esemplari di *Megamastax* (sullo sfondo), il più grande vertebrato siluriano conosciuto [190][191].



La presenza sulla terraferma di artropodi, finora dedotta dalla datazione molecolare, viene confermata dai fossili. Nell'immagine alla pagina seguente artropode della specie *Kampecaris*, un millepiedi della lunghezza di 20-30 mm, oggi estinto, che viene considerato un rappresentante dei primissimi animali terrestri [192].

[187] *Halysites* sp. Wilson44691, Public domain, da Wikimedia Commons.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HalysitesSilurian.jpg>

[188] *Dalmanites limulurus*. DanielCD, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dalmanites_limulurus_trilobite_silurian.jpg

[189] *Dimerocrinites decadactylus*. Geni, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dimerocrinites_decadactylus.JPG

[190] Choo B, Zhu M, Qu Q, Yu X, Jia L, Zhao W (2017). *A new osteichthyan from the late Silurian of Yunnan, China*. PLoS ONE 12(3): e0170929. | [PDF](#) |

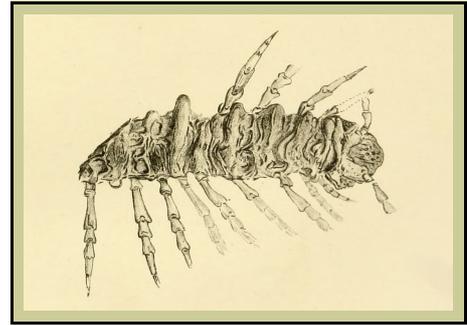
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170929>

[191] Illustration by Brian Choo, released under Creative Commons Attribution Licence CC BY 4.0, 2016 <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Life_restoration_of_Sparalepis_tingi.tiff

[192] *Kampecaris forfarenensis*. From Turin Hill, Forfarshire. Peach, B. N. *On some fossil myriapods from the Lower Old Red Sandstone of Forfarshire*. Proceedings of the Royal Physical Society 7: 177-188. Plate II B. N. Peach, Public domain, da Wikimedia Commons.

Gli artropodi]¹⁹³] si muovono sulla terraferma in un ambiente nel quale accanto ai licheni, le associazioni simbiotiche tra alghe e funghi, si va sviluppando in forma di muschio un tappeto di *briofite* [¹⁹⁴], dal quale abbiamo i primi fossili vegetali macroscopici – "Il paradigma emergente è quello di una vita primitiva sulla terraferma dominata da microbi, piccoli organismi simili a briofite e licheni. Chiamati collettivamente coperture crittogamiche, sono paragonabili a quelle che dominano certi ecosistemi oggi" – e nel quale compare la *Cooksonia*, "... diventata un fossile iconico, ritenuto la dimostrazione della struttura corporea archetipica delle piante vascolari primitive" [¹⁹⁵] che rappresenta una forma di transizione tra le primitive *briofite* non vascolari e le *tracheofite*, le piante vascolari, documentata con fossili [¹⁹⁶] dai quali è stata ricavata la ricostruzione alla pagina seguente [¹⁹⁷].



APPROFONDIMENTO

All'origine delle piante terrestri [¹⁹⁸]

"Ammirando le meravigliose foreste e praterie della Terra, non si può evitare di rendere onore ai vegetali che dimorano sul 'pianeta verde', sostenendo tutta la vita animale. Ma non è sempre stato così. Per la maggior parte dei suoi 4,5 miliardi di anni, la Terra è stata un luogo brullo e ostile. Non c'erano piante in grado di vivere sulle sue aspre superfici, le rocce spoglie erano esposte a violente reazioni geochimiche e rilasciavano i loro costituenti organici nell'oceano senza che alcun essere vivente li utilizzasse. Le prime forme viventi con capacità fotosintetica furono dei cianobatteri, circa 2,3 miliardi di anni fa: dimoravano in acque marine poco profonde e hanno lasciato depositi biosedimentari fossilizzati, le stromatoliti. I primi indizi della presenza di

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kampecaris_forfarensis,_Peach,_1882_01.jpg

[193] Quello degli Arthropoda è il phylum che conta il maggior numero di organismi viventi nel regno animale, tradizionalmente sono riconosciuti quattro subphyla:

→ Chelicerata. Ragni, acari, scorpioni, limuli e altri organismi caratterizzati dalla presenza di un paio di appendici dette cheliceri;

→ Myriapoda. Millepiedi, centopiedi e altri organismi con un alto numero di segmenti del tronco molti dei quali portano uno o due paia di zampe;

→ Crustacea. Aragoste, granchi, gamberi e altri organismi principalmente acquatici caratterizzati dal possedere due paia di appendici preorali (antenne e antennule) e appendici biramose.

→ Hexapoda. Insetti, collemboli, proturi e dipluri, tutti organismi che portano tre paia di zampe.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Arthropod>

[194] Le briofite sono prive di tessuto vascolare, l'assorbimento ed il trasporto dell'acqua e dei soluti necessari avviene generalmente per capillarità e interessa tutta la superficie della pianta. Questo ne limita le dimensioni (si sviluppano solo orizzontalmente) ma in compenso le rende estremamente adattabili tanto che oggi sono presenti anche in Antartide.

[195] Pšenička Josef & Bek Jiří & Fryda Jiri & Zárský Viktor & Uhlířová Monika & Storch Petr. (2021). |PDF| *Dynamics of Silurian Plants as Response to Climate Changes*. Life. 2021. 165-186. 10.3390/life11090906. <https://www.researchgate.net/publication/354126918>

[196] ibidem

[197] MUSE, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cooksonia_sp._-_MUSE.jpg

[198] Donald R. Prothero (2021), cap. 7.

organismi eucariotici, invece, risalgono a circa 1,8 miliardi di anni fa; da essi si sono evoluti i primi eucarioti vegetali monocellulari, le alghe. Queste avevano nucleo delimitato da membrana e altri organelli, come i cloroplasti. Sia i cianobatteri che le alghe continuarono a crescere come enormi tappeti bentonici in acque poco profonde. Le temperature estreme, l'intensità dei temporali, i processi di meteorizzazione dovuti alla mancanza di coperture, l'assenza di uno strato di ozono (l'ossigeno libero in atmosfera era ancora troppo scarso) hanno fatto sì che poche piante riuscissero ad avventurarsi fuori dall'acqua e arrivare sulla terraferma. Senza lo scudo dell'ozono, le cellule vegetali e animali erano bombardate da dosi massicce di radiazioni ultraviolette, che potevano causare mutazioni genetiche e portare alla morte. L'unico modo di proteggersi era stare immersi nell'acqua. Basandosi su prove chimiche, sembra che i primi organismi abbiano iniziato a colonizzare la terra circa 1,2 miliardi di anni fa. Probabilmente erano semplici aggregati di batteri, alghe e funghi, le cosiddette croste crittogamiche, molto simili a quelle che si trovano sulle superfici indisturbate dei deserti. I licheni aggrappati alla nuda roccia ne sono un esempio, poiché non sono veri e propri organismi, ma associazioni simbiotiche di alghe e funghi. I suoli crittogamici erano probabilmente l'unica forma di vita sulla superficie asciutta del pianeta, ma i loro processi di fissazione e stabilizzazione di particelle minerali e detriti sono serviti a limitare l'erosione, e hanno inoltre permesso ad alghe e cianobatteri di immettere ulteriore ossigeno in atmosfera grazie alla fotosintesi. Ovviamente, senza significative riserve alimentari, sulla terraferma non c'era nemmeno vita animale. La vita animale ha bisogno non solo di nutrienti, ma anche di ossigeno per respirare, che a quanto pare non iniziò ad accumularsi nell'atmosfera



prima di 530 milioni di anni fa. La combinazione tra condizioni ambientali avverse, mancanza di riparo e cibo, ed erosione incontrollata rendeva la terraferma un habitat pericoloso, che la maggior parte delle creature non era ancora in grado di affrontare ...

Affinché le piante possano dimorare sul terreno e svilupparsi in altezza necessitano di complessi apparati in grado di trasportare i fluidi vincendo la gravità, compiere scambi gassosi, rimuovere gli scarti del metabolismo e fungere da sostegno. Le alghe brune come il kelp (o laminaria) possono avere strutture filamentose lunghe diversi metri ma, essendo

costantemente immerse nel mare, non necessitano di apparati deputati al trasporto dell'acqua da un'estremità all'altra. Le piante vascolari, invece, sono dotate di un sistema di vasi conduttori che trasportano fluidi e nutrienti all'intera pianta, proprio come il sistema cardiovascolare umano porta il sangue a tutti i tessuti del corpo. Una volta sulla terraferma, di fatto, le piante hanno dovuto affrontare due problemi. In primo luogo, umidità e sali minerali dovevano essere raccolti dagli apici radicali nel terreno, quindi essere spostati nella parte superiore della pianta, fino alle foglie, dove l'energia luminosa permette la fotosintesi (assorbimento di anidride carbonica e rilascio di ossigeno, insieme a una certa quantità di acqua). In secondo luogo, l'assetto della pianta doveva essere eretto e rigido, in modo da vincere la forza di gravità, che tira tutto verso il basso. La soluzione stava nell'evoluzione delle tracheidi, cellule conduttrici allungate impregnate di lignina, un polimero organico che conferisce resistenza e sostegno, e in più è idrofobo: impermeabilizza le tracheidi la cui superficie respinge l'acqua anziché assorbirla, accelerandone il

transito nel vaso. Il tessuto conduttore formato dalle tracheidi si presenta come un singolo cilindro centrale all'interno dello stelo. Nelle piante più avanzate questi vasi sottili possono ammassarsi per formare fusti legnosi più grandi. Per questo motivo le piante vascolari sono definite anche tracheofite. Le ancestrali tracheofite fossili sono minuscole e molto rare; il fatto di essere costituite soprattutto di materia organica molle e poco lignificata ha inoltre compromesso le loro possibilità di conservazione. Non sono noti fossili risalenti all'Ordoviciano, mentre dal Siluriano (circa 433-393 milioni di anni fa) esistono reperti di piante semplici che nel 1937 furono classificate come Cooksonia dal paleobotanico William Henry Lang, in onore della collega Isabel Cookson che trovò i primi esemplari a Perton Quarry, in Galles. Cooksonia rappresenta la forma più semplice di pianta vascolare. Quasi tutti i reperti, nel complesso non più lunghi di 10 centimetri, sono appiattiti e mostrano un semplice fusto (di solito meno di 3 millimetri di diametro) che si biforca in due rami più piccoli. Molti degli steli ramificati sono sormontati da strutture che sembrano piccole sfere, dove si suppone si formassero le spore (sporangji). In tempi più recenti, tuttavia, il ritrovamento di esemplari migliori e un lavoro più dettagliato hanno dimostrato che gli sporangji non erano piccole bolle tonde, ma presentavano una forma a imbuto o a trombetta, con un'apertura conica al centro e un 'coperchio' sulla parte superiore che si disintegrava per rilasciare le spore. Dato che Cooksonia non aveva foglie, la fotosintesi avveniva probabilmente su tutta la sua superficie. Ovviamente non erano presenti né fiori né semi. L'apparato radicale non era isolato, ma faceva parte di un sistema interconnesso di brevi fusti sotterranei ad andamento orizzontale, da cui germogliava la parte aerea della pianta; in questo modo, simile a quanto avviene con le gemme dei rizomi, si verificava la riproduzione vegetativa (clonazione)".

A - 419 Ma inizia il **periodo Devoniano** che termina a - 359 Ma e dura 60 milioni di anni. Anche se appartenente a generi estinti questo fossile di *Cladoselache fylleri*, un pesce cartilagineo simile ai moderni squali [199]

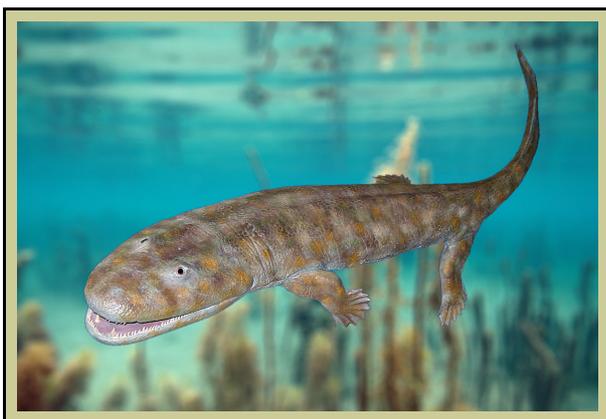


[199] James St. John, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>>, da Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cladoselache_fylleri_fossil.jpg

e questo fossile di *Diplacanthus striatus* [200], intermedio tra i pesci cartilaginei e i pesci ossei, ci ricordano che il Devoniano è un periodo di straordinario sviluppo dei pesci.



Le innovazioni evolutive si susseguono e sono molte e importanti, perché compaiono i *Dipnotetrapodomorpha* [201], pesci con pinne lobate dai quali originano i tetrapodi che nel Carbonifero si andranno differenziando negli anfibi e negli amnioti.



Acanthostega gunnari riportato in questa ricostruzione [202] è un tetrapode primitivo del Devoniano, uno dei primi vertebrati a possedere delle zampe riconoscibili, anatomicamente intermedio tra i pesci con le pinne lobate e i primi tetrapodi in grado di camminare sulla terraferma. Da un primitivo ramo di tetrapodi *dipnoi* (pesci polmonati) si va sviluppando la capacità di respirare attraverso un apparato polmonare, che dà origine agli anfibi.

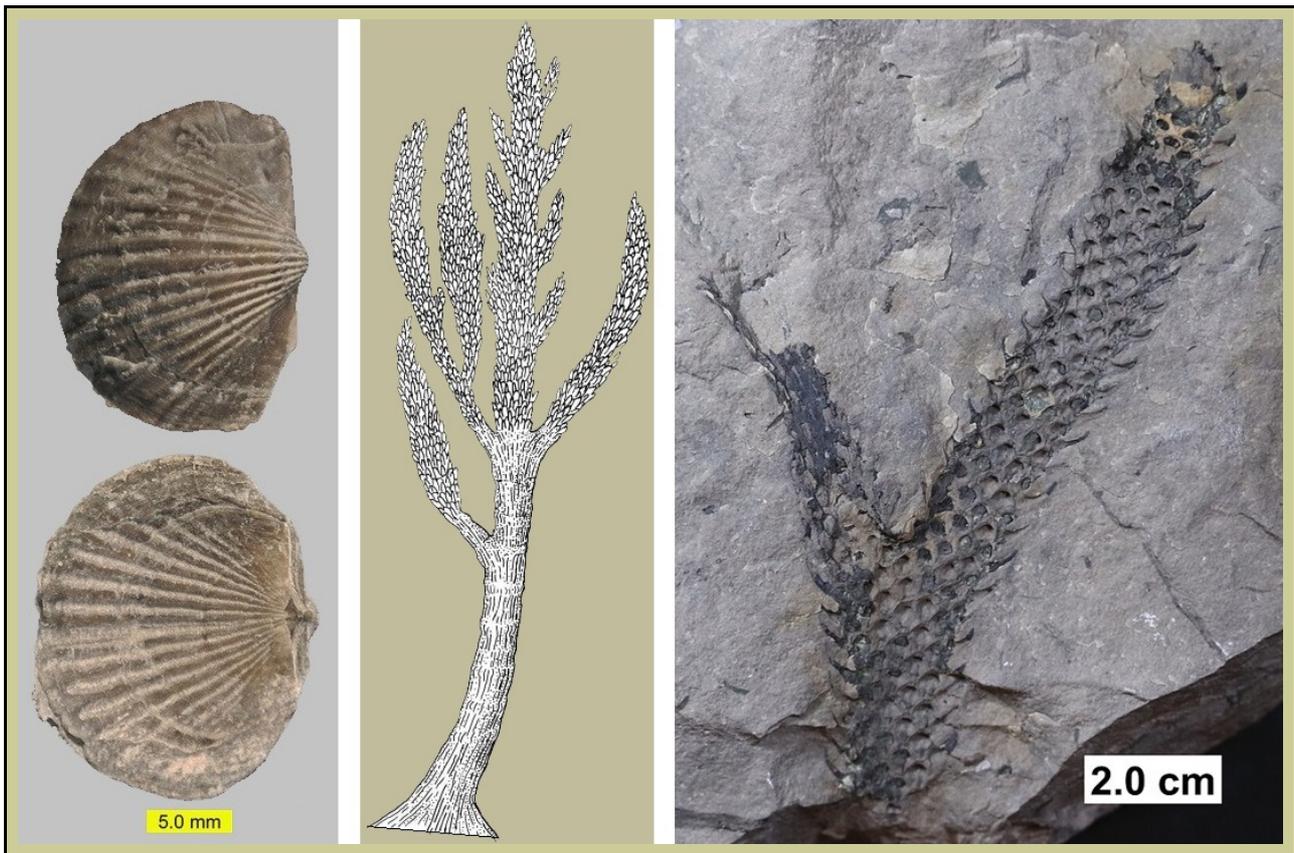
Sui fondi marini gli organismi bentonici includono come nel periodo precedente brachiopodi, briozoi, coralli, crinoidi, mentre importanti sviluppi, dopo quelli che abbiamo visto nei pesci, si vedono sulla terraferma. Nei tappeti batterici e di licheni (le associazioni simbiotiche di funghi e alghe) e nei tappeti di briofite stabilitesi del Siluriano che ospitano artropodi (aracnidi, scorpioni, trigonotarbidi, miriapodi), dopo l'aggiunta delle prime tracheofite (piante vascolari) si fanno strada funghi giganteschi e piante primitive con radici che creano i primi terreni stabili: sono le piante del genere *Archaeopteris* – che si riproducono rilasciando spore e rappresentano un primo passo nell'evoluzione delle piante

[200] James St. John, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>>, da Wikimedia Commons.
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diplacanthus_striatus_fossil_fish_\(Lower_Devonian;_Scotland\)_\(15149695488\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diplacanthus_striatus_fossil_fish_(Lower_Devonian;_Scotland)_(15149695488).jpg)

[201] Rhipidistia
<https://en.wikipedia.org/wiki/Rhipidistia>

[202] Dr. Günter Bechly, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>>, da Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Acanthostega_model.jpg

vascolari verso la riproduzione tramite semi che comparirà successivamente – e sono le lycopodi o licofiti che si evolveranno nei lepidodendri alti trenta metri delle foreste del Carbonifero.



Nell'immagine a sinistra fossile del brachiopode *Tropidoleptus carinatus*, al centro rappresentazione schematica di un fossile del genere *Prototaxites*, un fungo con un fusto di 1 metro di diametro e alto fino a 9 metri [203], a destra il fossile di un ramo di lycopode del Devoniano [204].

Anche se sulla loro entità esistono differenti ipotesi, il periodo Devoniano include almeno due episodi di estinzione, denominati nel loro insieme come estinzione del tardo Devoniano, considerata come la seconda delle cinque grandi estinzioni, il primo episodio a - 372 Ma, il secondo alla transizione tra Devoniano e Carbonifero, a - 359 Ma [205].

A - 359 Ma e fino a - 299 Ma, quindi per la durata di 60 milioni di anni, si sviluppa il **periodo Carbonifero**. Eurasia e Nord America si uniscono a formare Laurasia che attorno a - 250 Ma si fonderà con il Gondwana a formare il supercontinente Pangea, la cui successiva frammentazione porterà ai continenti nella forma attuale.

[203] Dawson, Public domain, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prototaxites_Dawson1888.PNG

[204] Kennethgass, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lycopod_axis.jpg

[205] *Extinction event*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Extinction_event

Nell'atmosfera l'ossigeno, anche se secondo alcuni continua ad oscillare intorno al 16%, potrebbe avere raggiunto picchi di concentrazione attorno al 30% [206]. Per converso, in collegamento con lo sviluppo estremo della flora, la concentrazione di CO₂ cala molto quindi si riduce di conseguenza l'effetto serra determinato da questo gas. La temperatura media della Terra risente di questo evento che sicuramente influisce sulla quarta era glaciale, la tardo-paleozoica (Karoo), nella quale si colloca il periodo Carbonifero. Ma, come accennato in precedenza, era glaciale non significa freddo e ghiaccio ovunque, perché durante le ere glaciali si alternano periodi glaciali e periodi interglaciali, e comunque sulla Terra l'irraggiamento solare varia molto in funzione della latitudine. Quindi anche durante il Carbonifero esistono aree tropicali, ed è qui che si verificano alcuni eventi cruciali:

*"Umidità devastante e caldo tonificante. Un pantano pressoché impenetrabile di vegetazione affondata in acque nere e immobili. Equiseti rigogliosamente dritti e nebbie di alte felci che si arrampicano gli uni sulle altre per raggiungere la luce del sole. L'aria fa girare la testa: la quantità di materiale vegetale presente sul pianeta ha riempito l'atmosfera di ossigeno, con livelli superiori anche del cinquanta per cento rispetto all'epoca moderna ... Nella torbiera c'è una vasta macchia di alberi ... il loro tronco verde cocodrillo presenta una trama di scaglie sovrapposte ... In questi alberi del genere *Lepidodendron* [207] ogni parte del tronco è fotosintetica, tutta la corteccia è in grado di trasformare l'aria e il sole in nuovo materiale vegetale ... raggiungono tutti un'altezza uniforme, per cui la canopia, a circa trenta metri dalla superficie dell'acqua, assomiglia a un mercato coperto sostenuto da colonne elegantemente decorate e con il tetto verde scuro ...*

*Le radici degli 'alberi a scaglie' – note come *stigmaria* – crescono le une intorno alle altre, strettamente intrecciate alla radici dei vicini nel suolo torboso ... straordinariamente fitte ... Questi sistemi radicali stanno trasformando il pianeta. L'azione di scavo dei sistemi radicali disgrega le rocce trasformandole incessantemente in sabbia e intrappola l'humus. Senza radici non si può formare il suolo, poiché i frammenti verrebbero portati via dal vento e dalla pioggia...*

Nel complesso la sostanza più importante depositata in queste paludi sta marcendo lentamente nel fango sott'acqua. Radici, foglie e rami, tutto si trasforma lentamente da vegetazione a torba, da torba a carbone... Nessuno sa bene perché il materiale organico si depositi in una percentuale così alta nella cintura di carbone equatoriale nel carbonifero. Un'ipotesi è che la lignina, il principale costituente del legno, sia materiale relativamente nuovo e quindi i microbi, che non hanno evoluto la capacità di consumarlo, non riescano a digerirlo facilmente. Altri suggeriscono che sia la geografia peculiare del Carbonifero ad aver portato alla creazione dei giacimenti di carbone fossile ..." [208].

Nell'immagine a sinistra fossile di un tronco di *Lepidodendron* con una radice (*stigmaria*) ben evidente [209], segue la ricostruzione dell'aspetto dell'albero che era alto circa 30 m [210], segue

[206] Uwe Brand, Alyssa M. Davis, Kristen K. Shaver, Nigel J.F. Blamey, Matt Heizler, Christophe Lécuyer. *Atmospheric oxygen of the Paleozoic*. Earth-Science Reviews, Volume 216, 2021, 103560, ISSN 0012-8252.

| PDF |

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825221000593>

[207] *Lepidodendron*

<https://en.wikipedia.org/wiki/Lepidodendron>

[208] Thomas Halliday (2023), cap. 11.

[209] Michael C. Rygel, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lycopsid_joggins_mcr1.JPG

[210] Tim Bertelink, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

ancora un fossile della sua corteccia, fatta di scaglie che possedevano la funzione fotosintetica [211], a destra una *Sigillaria*, un altro albero estremamente diffuso nelle foreste del Carbonifero.



Nelle foreste umide vivono miriapodi come *Arthropleura*, un millepiedi gigante che supera i due metri di lunghezza [212] [213],



vivono trigonotarbidi (equivalenti ai moderni ragni), scorpioni, libellule giganti (*Meganeura monyii* aveva un'apertura alare di 60 cm), e fanno capolino tetrapodi anfibi, come *Pederpes finneyae*, lungo circa 1 m e tra i primissimi vertebrati per i quali è stato riconosciuto l'inizio della locomozione terrestre [214], nell'immagine seguente,

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lepidodendron.png>

[211] Jstuby at en.wikipedia, Public domain, da Wikimedia Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lepidodendron_PAMuseum.jpg

[212] Lh eritier M, Edgecombe GD, Garwood RJ, Buisson A, Gerbe A, Mongiardino Koch N, Vannier J, Escarguel G, Adrien J, Fernandez V, Bergeret-Medina A, Perrier, V. (2024). *Head anatomy and phylogenomics show the Carboniferous giant Arthropleura belonged to a millipede-centipede group*. Science Advances. 10 (41). eadp6362. doi:10.1126/sciadv.adp6362

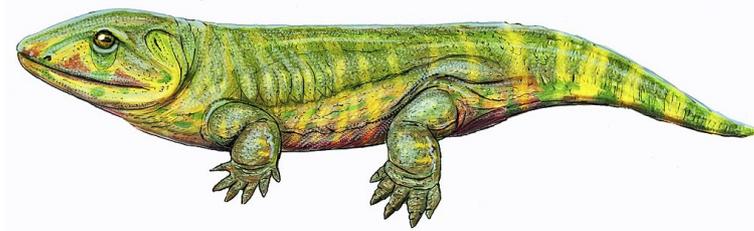
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adp6362>

[213] Qohelet12, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

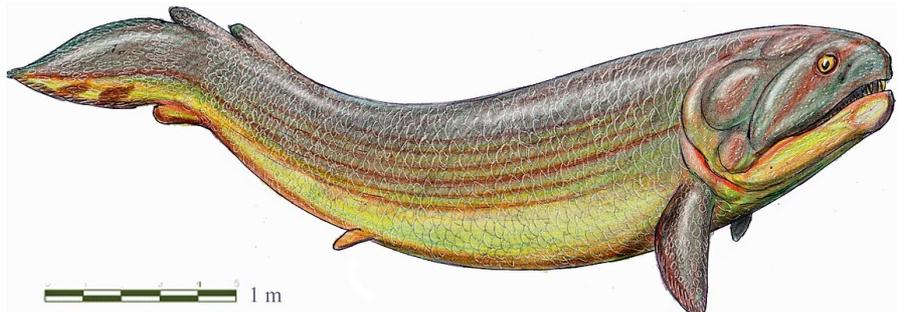
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arthropleura_reconstruction.png

[214] ДибГд, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pederpes2223DB.jpg>



mentre nelle acque dolci vive *Rhizodus hibberti*, forse il più grande pesce di acqua dolce mai esistito, che raggiunge i 5 metri di lunghezza [215] qui rappresentato.



Negli oceani tra i vertebrati vi è una grande varietà di pesci cartilaginei e di pesci ossei, mentre tra gli invertebrati vi sono foraminiferi, protozoi marini eucarioti ed eterotrofi sia bentonici sia planctonici [216], coralli, briozoi, ammoniti (molluschi cefalopodi con guscio calcareo), echinodermi (soprattutto crinoidi).

Ed è nel Carbonifero attorno a - 330 Ma che dai tetrapodi anfibi – che nel Devoniano si sono originati dai pesci con pinne lobate e dai primitivi pesci polmonati – si vanno differenziando gli amnioti, i quali a loro volta si andranno evolvendo nei *sauropsidi* (i rettili, inclusi i dinosauri, e gli uccelli) e nei *sinapsidi* (i pelicosauri e i terapsidi estinti, e tutti i mammiferi, inclusi gli esseri umani) [217];

Il Carbonifero "... era un mondo fatto a misura di anfibi che infatti si diversificarono in una gran quantità di forme ... gli amnioti, almeno all'inizio, somigliavano molto agli anfibi di oggi: vivevano nel loro stesso ambiente, erano tutti abbastanza piccoli e di aspetto simile alle salamandre ... [dal punto di vista riproduttivo] la loro strategia di adattamento non consisteva nel deporre le uova in un luogo più sicuro, ma nel modificare le uova stesse, avvolgendo ogni minuscolo, indifeso embrione non solo in un semplice involucro gelatinoso, ma in una serie di membrane che l'avrebbero protetto il più a lungo possibile dalle minacce del mondo. Una di quelle membrane era l'amnio, una guaina impermeabile che forniva all'embrione uno stagno privato e tutto il necessario

[215] DiBgd, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>>, da Wikimedia Commons.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rhizodus.jpg>

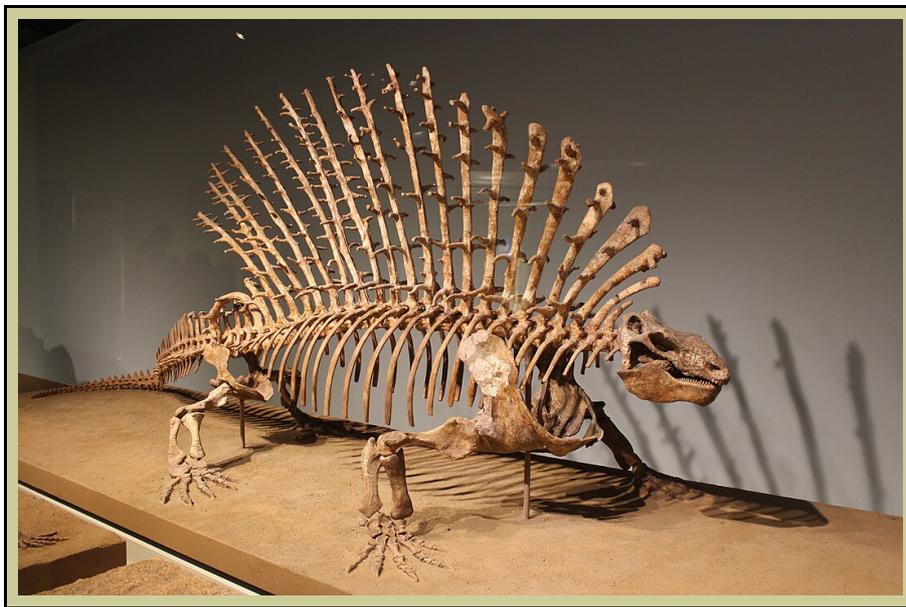
[216] *Foraminifera Database*.
<https://foraminifera.eu/>

[217] Serpenti, lucertole senza zampe e cecilidi, che hanno perso gli arti in seguito a mutazioni di uno specifico gene, si qualificano ancora come tetrapodi attraverso la loro ascendenza e in alcuni casi conservano un paio di speroni vestigiali resti degli arti posteriori.

per tenerlo in vita. Il sacco vitellino lo nutriva; un'altra membrana, detta allantoide, raccoglieva e immagazzinava i suoi rifiuti. A contatto con l'allantoide c'era il corion, e intorno a tutto quanto, il guscio" [218].

Oltre all'invenzione, strategica dal punto di vista riproduttivo, delle tre membrane extraembrionali (*amnios* per la protezione embrionale, *corion* per lo scambio di gas e *allantoide* per lo smaltimento o l'immagazzinamento dei rifiuti metabolici) e del *guscio* dell'uovo, gli amnioti sviluppano anche pelle più spessa e cheratinizzata e respirazione costale: nel loro complesso tre tappe evolutive cruciali per la conquista della terraferma.

E la direzione imboccata sembra proprio essere quella giusta se al termine del Carbonifero attorno a - 303 Ma i fossili di *Edaphosaurus pogonias* [219] – un grosso erbivoro lungo fino a tre metri [220] appartenente a un gruppo di sinapsidi estinti – forniscono l'evidenza di un salto evolutivo nel mondo animale.



Un salto evolutivo che coincide con una trasformazione epocale del mondo vegetale: il "collasso delle foreste del carbonifero" [221]. Il clima si fa più fresco e secco, e le grandi foreste pluviali tropicali – che ospitavano lycopodiifite, un eterogeneo miscuglio di vegetazione, nonché una grande diversità di vita animale (libellule giganti, millepiedi, insetti, anfibi e i primi amnioti) – lasciano ora il posto alle felci arboree (che si riproducono mediante spore), alle piante che si riproducono mediante semi progenitrici delle attuali gimnosperme, alle conifere. Mentre ampie aree del supercontinente in via di formazione, la Pangea, si vanno trasformando in deserti.

[218] Henry Gee (2022), cap. 5.

[219] Jonathan Chen, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Edaphosaurus-Field_Museum.jpg

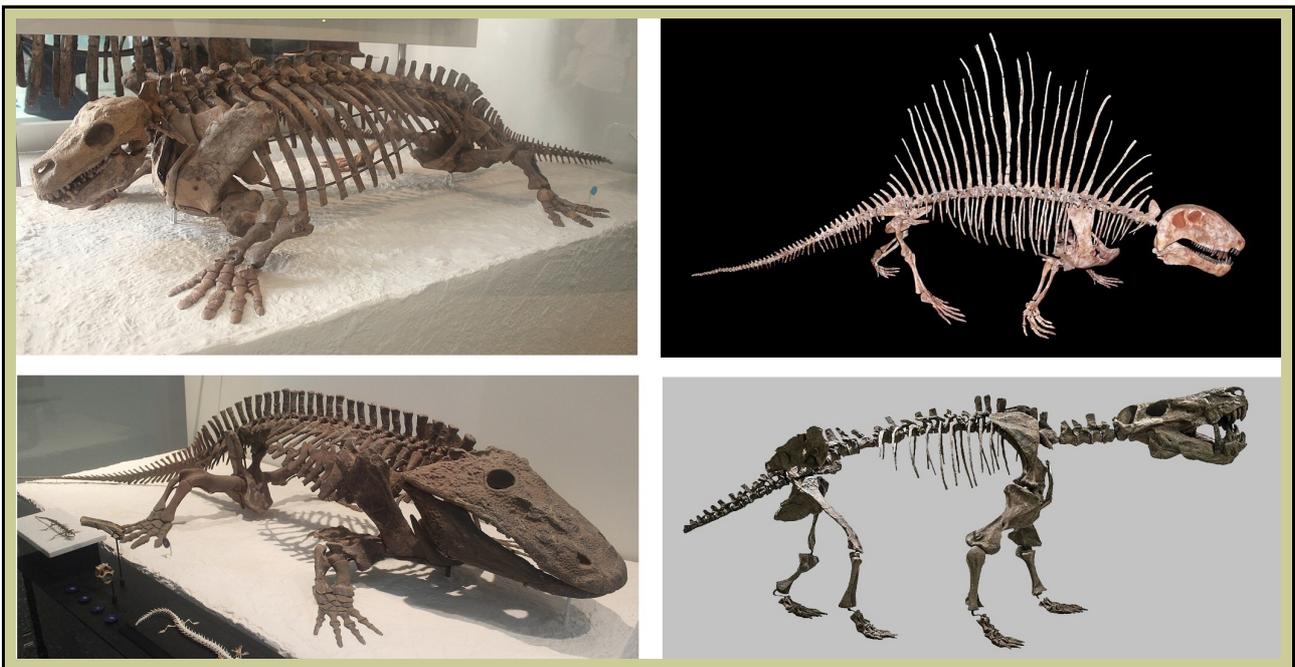
[220] L'estesa vela presente sul dorso è possibile che fosse finalizzata al controllo della temperatura corporea, ma vi sono interpretazioni alternative compresa quella che fosse solo un richiamo sessuale.

[221] Carboniferous rainforest collapse

https://en.wikipedia.org/wiki/Carboniferous_rainforest_collapse

Da - 299 Ma a - 252 Ma quindi per una durata di 47 milioni di anni si sviluppa il **periodo Permiano**. La fauna non può fare altro che adattarsi al cambiamento climatico:

"Nel corso di trenta milioni di anni, tra la fine del Carbonifero e l'inizio del Permiano, il clima della Terra è passato da decisamente umido a estremamente arido. Quando il nuovo mondo siccitoso ha preso piede completamente, gli amnioti si sono ritrovati nel loro elemento. Quello che fino a quel momento era stato solo un piano alternativo in caso di temporanea siccità ha permesso loro di esplorare nuove nicchie e creare nuove comunità nell'interno. Liberi dal vincolo di dover trovare acqua fresca in cui deporre le uova, si sono stabiliti nei deserti e sugli altopiani in precedenza inaccessibili della Pangea continentale. Dove già erano presenti insetti, aracnidi, funghi e piante, ciascuno con la propria versione di semi, spore o uova resistenti alla siccità, alla fine sono arrivati anche i vertebrati. In epoca moderna, gli unici tetrapodi non amnioti sono i cosiddetti *Lissamphibia*: rane, salamandre e apodi, animali praticamente ciechi che vivono sottoterra. Tutti gli altri, umani compresi, sono variazioni sul tema degli amnioti. L'amnios ci è familiare perché è il contenitore delle "acque" che si rompono durante il travaglio, l'oceano in miniatura che abbiamo creato per proteggerci al momento del nostro sviluppo. Il corion e l'allantoide hanno unito le forze a formare la placenta. Continuiamo a portarci dietro i residui dei nostri antichi tratti ecologici. Le nostre cellule sono incapaci di spezzare i vincoli della nostra chimica di base, e i nostri corpi portano dentro di sé l'eredità della scappatoia evolutiva che ha permesso ai nostri antenati di trasferirsi sulla terraferma" [222].



E i fossili di amnioti non mancano. In alto a sinistra fossile di un sinapside del genere *Diadectes*, un altro dei primi tetrapodi erbivori, lungo fino a tre metri [223]. In alto a destra fossile di *Dimetrodon incisivum*, un sinapside e rettile carnivoro anch'esso attorno ai tre metri con le vertebre dorsali che si allungavano in altissime spine neurali che sostenevano una membrana di pelle che poteva aiutare l'animale a regolare la temperatura, a disincentivare gli aggressori, o rappresentare

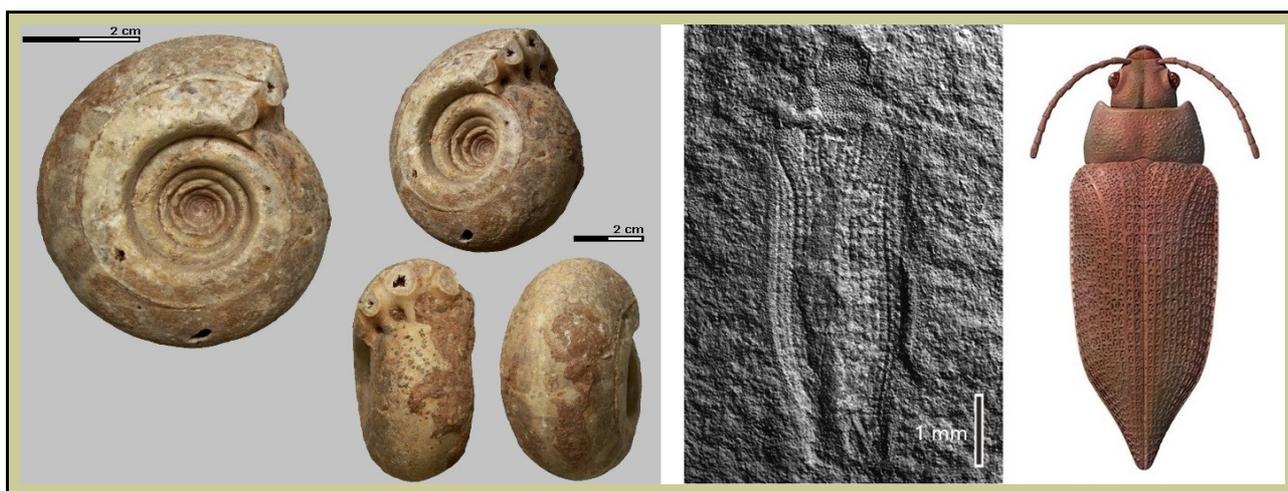
[222] Thomas Halliday (2023), cap. 10.

[223] Jonathan Chen, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diadectes_AMNH.jpg

semplicemente un richiamo sessuale [224]. In basso a sinistra fossile di *Eryops megacephalus*, un anfibio gigante carnivoro lungo un paio di metri [225]. In basso a destra fossile di un terapside (anch'esso un sinapside) carnivoro del genere *Inostrancevia* che poteva superare i quattro metri [226].

I depositi marini del Permiano contengono brachiopodi, echinodermi e molluschi (nell'immagine a sinistra fossile di ammonite del genere *Metalegoceras* [227]). E sulla terraferma non mancano gli insetti (nell'immagine a destra fossile e ricostruzione del coleottero *Permocupes sojanensis* [228]).



Ed è in questo contesto che a circa - 252 Ma quindi proprio al termine del periodo Permiano e con una durata di circa 60 000 anni [229] si verifica la terza delle grandi estinzioni, la estinzione del Permiano, la più grave estinzione che la Terra abbia mai visto. Il nostro orologio segna le 22:40.

[224] *Dimetrodon incisivum*, Sphenacodontidae; Permian, Texas, USA; Staatliches Museum für Naturkunde Karlsruhe, Germany.

H. Zell, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dimetrodon_incisivum_01.jpg

[225] *Eryops megacephalus* skeleton (AMNH 4657) on display at the American Museum of Natural History.

Jonathan Chen, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eryops_AMNH.jpg

[226] MUSE, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inostrancevia_alexandri_-_MUSE.jpg

[227] Antonov, Public domain, da Wikimedia Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metalegoceras_sp_Permian_Timor.png

[228] Xianye Zhao, Yilun Yu, Matthew E Clapham, Evgeny Yan, Jun Chen, Edmund A Jarzembowski,

Xiangdong Zhao, Bo Wang, CC BY 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Permocupes_sojanensis_holotype_and_reconstruction.jpg

[229] Seth D. Burgess, Samuel Bowring, and Shu-zhong Shen. *High-precision timeline for Earth's most severe extinction*. PNAS, 111(9)3316-3321, <https://doi.org/10.1073/pnas.1317692111>. | PDF |

<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1317692111>

APPROFONDIMENTO

La grande estinzione del Permiano

Anche se, come tutti gli altri dati della geologia, della paleontologia e della paleobiologia, sono oggetto di discussione e valutazioni alternative, le cinque grandi estinzioni – che in alcuni casi hanno messo a dura prova la prosecuzione della vita sulla Terra – e le dieci (e forse più) estinzioni minori che sono avvenute ^[230] hanno in comune tre aspetti:

→ si sono succedute senza alcuna regolarità e non sono collegabili ai grandi cicli astronomici noti;

→ sono concentrate nel Fanerozoico, negli ultimi 540 milioni di anni, quando la comparsa di animali con strutture anatomiche calcificate rende la documentazione fossile adeguata;

→ hanno avuto le cause più diverse: cambiamenti climatici indotti dall'ossigenazione dell'atmosfera, dalle variazioni nella concentrazione di gas serra, dai gas emessi da gigantesche eruzioni vulcaniche, dalla diminuzione dei livelli degli oceani, dall'impatto con grossi asteroidi, da flussi di raggi gamma in grado di distruggere lo strato protettivo di ozono.



Delle cinque grandi estinzioni ad oggi documentate, quella della fine del Permiano è considerata la più grande ed ecco come ce la racconta Michael J. Benton in questo breve estratto da *"La più grande catastrofe di tutti i tempi"* ^[231]:

"Una datazione accurata ha indicato che l'evento si è verificato 251 milioni di anni fa ^[232], e che le specie scomparse sono state qualcosa tra il 90 e il 95 per cento. Non si è trattato di un fenomeno a livello locale, dal momento che è stato rilevato nelle rocce che vanno dalla Cina a Spitsbergen, dalla Groenlandia al Sudafrica, dalla Russia all'Australia ... Che tipo di sconvolgimento è stato così immenso da avere ucciso i rettili sulla terraferma e i brachiopodi e i coralli sui fondali marini? Ha spazzato via la vegetazione sulla Terra, sia pure per un breve periodo ...

Vi sono oggi due teorie di cataclisma assai argomentate per l'estinzione di massa della fine del Permiano. La prima rimanda l'evento a una enorme eruzione vulcanica, che ha prodotto migliaia di chilometri cubi di lava e che ha avvelenato l'atmosfera. La seconda è l'ipotesi dell'impatto ... di un enorme meteorite con la Terra ... "

Benton propende per la prima, sulla base di:

"... alcune prove, che riguardano la fine del Permiano, che sono meno dibattute e che si sono rivelate tanto drammatiche quanto avvincenti...

[prima prova] Alla fine del Permiano, 251 milioni di anni fa, in Siberia si verificarono delle eruzioni di proporzioni gigantesche, che riversarono circa 2-3 milioni di chilometri quadrati di lava basaltica e ricoprirono 3,9 milioni di chilometri quadrati della Russia orientale, con uno spessore che va dai 400 ai 3000 metri. Questa regione, conosciuta come la 'regione di trappi siberiani' è grande come la superficie della comunità europea...

[seconda prova] ... gli isotopi dell'ossigeno possono essere usati come paleotermometri, e questi indicano che vi è stato un incremento globale delle temperature di circa 6 °C ... anche i sedimenti

[230] *Extinction event.*

https://en.wikipedia.org/wiki/Extinction_event

[231] Michael J. Benton (2005), capp. 10 e 11.

[232] Il libro era stato scritto una decina di anni prima che fosse riportata la datazione accurata riportata sopra.

sembrano indicare un incremento delle temperature ... [e] prove attendibili del surriscaldamento del pianeta provengono dai reperti di piante fossili ...

[terza prova] I gas idrati sono solidi cristallini composti da una gabbia di molecole d'acqua che racchiudono al loro interno del gas. Le gabbie d'acqua possono imprigionare varie molecole di gas, inclusa l'anidride carbonica e il solfuro di idrogeno, ma di solito i gas idrati trattengono il metano ... si formano in acqua, ad una profondità superiore ai 500 metri, in particolare nelle regioni polari ... si stima, che in tutto il mondo, i gas idrati contengano almeno 10 000 miliardi di tonnellate di carbonio, circa il doppio della quantità di carbonio trattenuta in tutti i combustibili fossili della Terra ..."

Sulla base di queste prove Benton delinea gli eventi alla base della grande estinzione del Permiano:

"Il fattore scatenante dello sconvolgimento pare essere stato l'eruzione dei trappi siberiani. In tutto il mondo la devastazione è stata causata dalla produzione di diversi gas nel corso delle eruzioni e tali gas sono stati immessi nell'atmosfera probabilmente in modo non continuo, durante l'intero ciclo delle eruzioni. Forse, una singola eruzione importante sarebbe stata assorbita dalla Terra e la breve perturbazione dei sistemi atmosferici e oceanici sarebbe stata regolarizzata dai processi di feedback [negativo]. Ma le ripetute eruzioni possono essere state eccessive ... Dalle eruzioni si sono originati quattro tipi di gas ... l'anidride carbonica ebbe gli effetti più duraturi, provocando il riscaldamento del pianeta e l'anossia, effetti durati centinaia di migliaia di anni ... Un altro gas prodotto è stata l'anidride solforosa. Questo gas ha una permanenza più breve nell'atmosfera, ma gli effetti di raffreddamento dei solfati possono aver causato un'ondata improvvisa di glaciazioni in alcune parti del pianeta, con la conseguente regressione del livello del mare ... Si può essere prodotto poi un altro gas, il cloro. Tale gas, combinandosi con il solfati e l'anidride carbonica avrebbe prodotto le piogge acide. Quando questi gas si combinano con l'acqua formano l'acido cloridrico, l'acido solforico, l'acido carbonico e si può produrre anche l'acido fluoridrico. Se un così gradevole cocktail dovesse piovere dal cielo, la normale vita vegetale verrebbe distrutta, come succede oggi con le piogge acide che devastano le foreste. Con la flora drasticamente ridotta, anche la fauna subirebbe delle perdite. Probabilmente, questa esplosione acida che è stata ipotizzata ha spazzato via gran parte della vita sulla terraferma ... la scomparsa del manto vegetale avrebbe reso peggiori le condizioni dei terreni, dato che il suolo veniva spogliato ... Il notevole aumento del passaggio dalla stronzio⁸⁷ allo stronzio⁸⁶ nel confine Permo-triassico indica che un'enorme quantità di materiale terrestre era stata riversata in mare attraverso i fiumi [a causa degli intensi fenomeni erosivi] ...

In tempi normali, il sistema oceanico-atmosferico avrebbe azzerato gli squilibri e riportato il livello di carbonio e ossigeno alla normalità. Si tratta del processo di feedback negativo. Se i livelli di anidride carbonica aumentano, l'interramento del materiale organico, i processi atmosferici che degradano le rocce o la proliferazione delle foreste, esauriscono il gas in accesso [ma in questo caso] il rilascio dell'anidride carbonica dalle eruzioni dei trappi siberiani ha provocato l'aumento delle temperature del pianeta di circa 6 °C. Le fredde regioni polari sono diventate calde e la tundra ghiacciata si è disgelata. Il materiale sciolto deve essere penetrato nelle riserve ghiacciate di gas idrato che si trovavano intorno agli oceani polari e gli enormi volumi di metano sono esplosi sulla superficie degli oceani in bolle gigantesche. Quest'altra immissione di carbonio nell'atmosfera ha provocato un ulteriore surriscaldamento, che avrebbe sciolto le altre riserve di gas idrato. In questo modo il processo si è moltiplicato, sempre più velocemente. I sistemi naturali che di solito riducono i livelli di anidride carbonica non sarebbero stati in grado di agire e quindi il sistema avrebbe funzionato fuori controllo, con il più grande disastro nella storia della vita".

Questo è quanto riporta Henry Gee, con un maggior dettaglio sulle specie estinte ^[233]:

"Verso la fine del Permiano, un pennacchio di magma che da milioni di anni stava risalendo dalle profondità della Terra incontrò finalmente la crosta e la fece fondere. Nel tardo Permiano non sarebbe stato necessario scendere nelle viscere della Terra per raggiungere l'inferno, perché l'inferno era salito in superficie. Si trovava in quella che oggi è la Cina, dove un mondo lussureggiante di foreste pluviali si era di colpo trasformato in un calderone di magma: la lava e i gas nocivi incrementarono l'effetto serra, acidificarono gli oceani e dissolsero lo strato di ozono, sottraendo al pianeta lo scudo che lo proteggeva dalle radiazioni ultraviolette. Circa cinque milioni di anni dopo, quando la vita non si era ancora del tutto riavuta dal disastro, arrivò la batosta successiva. Il pennacchio di magma cinese, a quanto pareva, era solo l'antipasto. Il primo piatto fu un altro pennacchio ancora più grande, che salì dalle profondità della Terra e perforò la superficie terrestre in corrispondenza dell'attuale Siberia occidentale. La terra si lacerò. La lava che trasudava da una miriade di fessure finì per lastricare con uno strato di basalto nero spesso migliaia di metri un'estensione grande quanto gli odierni Stati Uniti, dalla costa est fino alle Montagne Rocciose. La cenere, i fumi e i gas tossici che accompagnavano l'eruzione sterminarono quasi tutte le forme di vita esistenti. Ma non fu una morte istantanea: l'agonia durò ben mezzo milione di anni. Il primo ingrediente della pozione velenosa era l'anidride carbonica, tanto abbondante da far innalzare di diversi gradi la temperatura media della superficie terrestre. Già a corto di ossigeno e stremate dal caldo torrido, alcune parti di Pangea divennero del tutto inabitabili. Gli effetti sulle barriere coralline che circondavano la Tetide furono a dir poco catastrofici. Le alghe fotosintetiche ospitate all'interno dei minuscoli polipi gelatinosi erano estremamente sensibili alla temperatura: e così, quando il mare divenne più caldo abbandonarono le loro case, lasciando morire i polipi. Il corallo, ormai sbiancato e morto, si sgretolò. Le oscillazioni del livello del mare avevano già messo a dura prova i coralli tabulati e rugosi che per decine di milioni di anni erano stati il perno di quegli ecosistemi; l'evento siberiano fu l'ultima goccia. Senza i coralli, morirono anche tutti gli organismi che in loro avevano trovato un habitat. E non era finita. I vulcani saturarono il cielo di sostanze acide. L'anidride solforosa si riversò nell'atmosfera e, negli strati più alti, contribuì a formare particelle microscopiche intorno alle quali si condensava il vapore acqueo, creando nubi che riflettevano la luce solare verso lo spazio e quindi raffreddavano, anche se temporaneamente, la superficie terrestre: il clima caldo cominciò a essere intervallato da periodi di freddo pungente. Quando poi l'anidride solforosa ricadeva sulla terra sotto forma di pioggia, si trasformava in un acido che uccideva ogni forma di vita vegetale, scioglieva i terreni e bruciava gli alberi trasformandoli in ceppi anneriti. Il danno era aggravato dalla presenza di tracce di acido cloridrico e fluoridrico; inoltre, prima ancora di toccare la superficie, l'acido cloridrico danneggiava anche lo strato di ozono che proteggeva la Terra dai pericolosi raggi ultravioletti. In tempi normali, l'eccesso di anidride carbonica sarebbe stato in gran parte assorbito dal plancton e dalle piante, ma in quel momento la vita vegetale era già abbastanza sotto stress. Non potendo essere assorbita dalle piante, l'anidride carbonica fu dilavata dalla pioggia: la conseguenza fu un aumento del tasso di degradazione meteorica. Privato dell'azione stabilizzatrice delle piante, il suolo fu spazzato via dagli agenti atmosferici e divenne una distesa di nuda roccia. Il mare si trasformò in una brodaglia densa, intorbidita non solo dai sedimenti ma anche dalle carcasse degli organismi animali e vegetali rimasti vittime della carneficina che aveva sconvolto la terra. L'opera dei batteri decompositori sui loro poveri resti finì per consumare il poco ossigeno rimasto. Una straordinaria fioritura di alghe tossiche digerì tutto quel che poteva, prima di appassire a sua volta. Gli acidi ribollenti nell'acqua

[233] Henry Gee (2022), cap. 5.

corrosero e sciolsero i gusci dei molluschi. Gli esoscheletri mineralizzati, da cui dipendeva la sopravvivenza di molte specie marine, divennero sottili e fragili, cosicché, se pure all'inizio erano riusciti a sopravvivere a quel mare scuro e stagnante, alla fine non furono più in grado di costruirsi le conchiglie. Ma non era ancora finita. Il pennacchio di magma proveniente dal mantello destabilizzò i depositi di gas metano che fino a quel momento erano rimasti congelati nel ghiaccio sotto l'Oceano Artico. Il gas emerse fragorosamente sulla superficie, schizzando schiuma a centinaia di metri di altezza nell'atmosfera. E poiché il metano è un gas serra molto più potente dell'anidride carbonica, l'effetto serra aumentò in misura esponenziale; il mondo stava andando arrosto. Come se non bastasse, ogni poche migliaia di anni le eruzioni sparavano nell'atmosfera vapori di mercurio, avvelenando tutto ciò che non era già stato asfissiato, gasato, bruciato, bollito, arrostito, fritto o sciolto. Alla fine del cataclisma diciannove specie su venti della fauna marina, e più di sette su dieci di quella terrestre, giunsero a estinzione. Tra gli scomparsi c'erano animali che non hanno lasciato né discendenti né parenti stretti. L'estinzione uccise, per esempio, l'ultimo dei trilobiti. Quelle vispe creature simili a maialini di terra avevano scorrazzato sui fondali e nuotato nelle acque degli oceani fin dall'inizio del Cambriano, ma erano in declino da molto tempo, e alla fine del Permiano ne erano rimaste così poche che la loro definitiva estinzione passò quasi sotto silenzio. Identica sorte toccò ai blastoidi, un gruppo di echinodermi pedunculati. Tra il Cambriano e il Permiano erano comparse almeno venti specie di echinodermi, e quella dei blastoidi fu tra le ultime sopravvissute. Gli echinodermi dei giorni nostri, talmente comuni che ogni frequentatore delle spiagge tende a dare per scontata la loro presenza, appartengono a non più di cinque specie: stelle marine, stelle serpentine, cetrioli di mare, ricci di mare e gigli di mare. In realtà avrebbero anche potuto essere quattro. Se non fosse stato per due sole specie appartenenti a un genere di ricci di mare scampato alla tempesta, anche questa famiglia di animaletti sarebbe stata consegnata all'oblio. Ma quelle due specie ce l'hanno fatta, e a furia di evolversi e diversificarsi hanno dato vita a tutti i ricci di mare che conosciamo oggi. E se i ricci contemporanei ci sembrano già una compagnia piuttosto eterogenea (dagli esemplari viola di forma globulare ai cosiddetti «dollari di sabbia», piatti e rotondi), i loro antenati del Paleozoico formavano un insieme ancora più composito. Ciononostante, tutti i ricci di mare moderni attingono al ristretto pool genetico lasciato in eredità dai pochi individui sopravvissuti al cataclisma. Se non fosse stato per la tenacia di quegli sparuti testimoni della distruzione, oggi i ricci di mare mancherebbero del tutto dalle nostre spiagge, e ci apparirebbero lontani e bizzarri come i blastoidi. I molluschi, invece, morirono quasi tutti, bruciati dall'acido o annegati fra i detriti in un mare senz'aria. Tra le pochissime specie che riuscirono a sopravvivere c'era la Claraia, un mollusco bivalve simile alle capesante. Ma se nel Permiano, e prima ancora, i veri re del mare erano stati i brachiopodi (una famiglia di molluschi filtratori apparentemente simili ad altre specie di bivalvi), l'estinzione di massa ribaltò gli equilibri anche sul fondo dei mari: i brachiopodi si estinsero quasi completamente, e i pochi che tuttora sopravvivono hanno un ruolo molto secondario nel moderno ecosistema oceanico. Ad avvantaggiarsi della loro scomparsa furono soprattutto la Claraia e i suoi discendenti, ed è per questo che oggi le nostre spiagge sono punteggiate di molluschi bivalvi come vongole, cozze e capesante, mentre i brachiopodi si vedono più facilmente in forma di fossili. Ancora oggi, dunque, la vita sul pianeta mostra gli effetti dell'estinzione del Permiano. Sulla terraferma, intere generazioni di anfibi e rettili furono spazzate via: scomparvero i goffi, cornuti e bitorzoluti pareiasauri, e tutti i pelicosauri a vela. Pochissimi terapsidi sopravvissero: le mandrie di dicinodonti che un tempo brucavano equiseti e felci nelle pianure del Permiano furono pesantemente decimate, e così pure i gorgonopsi dai denti a sciabola che gli avevano dato la caccia. Gli anfibi tornarono nell'acqua da cui erano emersi nel Devoniano. Le specie che si erano adattate alla vita sulla terra, adottando stili di vita e abitudini

comparabili a quelli dei rettili, si estinsero. Tra loro c'era anche l'antenato di tutti gli amnioti, l'animale che all'inizio del Carbonifero aveva dimostrato che la vita sulla terra non era poi così impossibile. Al giorno d'oggi, non ne resta più nulla. Le porte dell'inferno, apertesesi in Cina e spalancatesi con inaudita violenza in Siberia, avevano dunque inghiottito quasi tutta la vita terrestre. Le terre emerse si trasformarono in un deserto spoglio e silenzioso; le poche specie vegetali superstiti rimasero aggrappate alle macerie di quello che era in gran parte un pianeta morente. L'oceano era in agonia. Dopo la scomparsa delle barriere coralline, i fondali erano coperti di melma puzzolente. Era come se tutto fosse stato catapultato all'indietro, alle condizioni del Precambriano. Ma la vita sarebbe tornata. E lo avrebbe fatto in grande stile: con il più colorato, sfrenato e vertiginoso carnevale di bellezza che il mondo abbia conosciuto".

L'evento è catastrofico tanto che:

"... il registro geologico ... arriva a duecentocinquanta due milioni di anni fa, poi si interrompe all'improvviso, in un buco temporale di quindici milioni di anni" [234].

RIASSUMENDO

Nell'eone **Fanerozoico**, che dura "solamente" 500 milioni di anni rispetto ai 4 miliardi di anni trascorsi dall'inizio della storia della Terra, la vita sviluppa in modo tumultuoso. Nella prima era dell'eone, il *Paleozoico*, nell'arco di 287 milioni di anni si susseguono:

- una prima fase durante la quale la vita è ancora acquatica e nella quale dominano coralli, molluschi, artropodi marini e alghe;
- una seconda fase durante la quale si diffondono i pesci mentre si installano sulle terraferma artropodi, insetti e vegetali (briofite, prime piante primitive);
- una terza fase che porta allo sviluppo di tetrapodi e amnioti, che consentono ai vertebrati di conquistare definitivamente la terraferma;
- un fase di straordinario sviluppo della flora terrestre;
- tre grandi estinzioni condizionano i fenomeni adattativi che dirigono il cammino evolutivo delle specie.

L'eone **Fanerozoico** continua con il *Mesozoico*....

[234] Thomas Halliday (2023), cap. 9.

Eone	Era	Periodo	Ma	Eventi / Fossili
Termina l'era Paleozoica del Fanerozoico			- 252	Inizia l'era Mesozoica del Fanerozoico
Fanerozoico	Mesozoico	Triassico	- 250 - 240 - 228 - 210 - 201	Si è formato il supercontinente Pangea Dicinodonte erbivoro / <i>Lystrosaurus hedingi</i> La prima rana / <i>Triadobatrachus</i> Primi vertebrati volanti (pterosauri) Licofite, conifere, ginkgoales Dinosauro planante / <i>Sharovipteryx mirabilis</i> Rettili marini (ittiosauri) / <i>Temnodontosaurus</i>
		Giurassico	- 200 - 160 - 149	Frammentazione del supercontinente Pangea pCO ₂ almeno il doppio dell'attuale e temperatura 5-10 °C superiore all'attuale Rettili marini (plesiosauri) / <i>Kronosaurus queenslandicus</i> , <i>Plesiosaurus dolichodeirus</i> Ammoniti / <i>Perisphinctes wartae</i> Cefalopodi / <i>Phragmoteuthis conocauda</i> Dinosauri sauropodi / <i>Mamenchisaurus</i> Primi uccelli / <i>Archaeopteryx</i>
		Cretacico	- 90 - 72 - 65,5	Nella flora inizia l'ascesa delle angiosperme Rettili marini (tilosauri) / <i>Tylosaurus saskatchewanensis</i> Rettili volanti (pterosauri) / <i>Nyctosaurus</i> , <i>Arambourgiania</i> , <i>Quetzalcoatlus</i> , <i>Pteranodon longiceps</i> Dinosauri / <i>Triceratops</i> , <i>Tyrannosaurus rex</i> Impatto di un corpo extraterrestre
Termina l'era Mesozoica del Fanerozoico			- 66,0	Inizia l'era Cenozoica del Fanerozoico

Il *Mesozoico*, seconda era del Fanerozoico, inizia con il **periodo Triassico**, che da - 252 Ma a 201 Ma dura 51 milioni di anni:

"Ci vollero decine di milioni di anni per riprendersi dal disastro che aveva segnato la fine del Permiano. Il pianeta, un tempo brulicante di vita sia nel mare sia sulla terraferma, si era quasi ridotto a un deserto. I tempi erano quindi maturi per le creature più in grado di adattarsi ... Subito dopo l'estinzione, e per milioni di anni a venire, la vita sulla Terra fu quasi appannaggio esclusivo dei *Lystrosaurus*" [235]. Nell'immagine fossile di *Lystrosaurus hedini* [236], un dicinodonte erbivoro lungo fino a 2,5 m e uno dei pochi sinapsidi terrestri sopravvissuti.



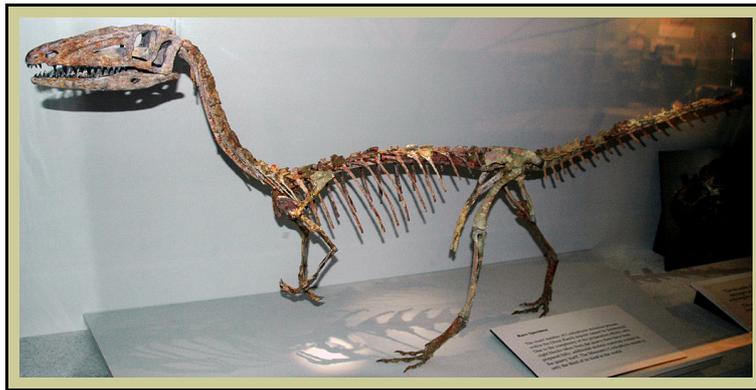
"Nella gran moltitudine di rettili sopravvissuti all'estinzione c'erano anche alcuni terapsidi – pochissimi, in realtà – che non appartenevano al gruppo dei dicinodonti. All'inizio del Triassico la famiglia dei cinodonti comprendeva carnivori di piccole e medie dimensioni come il *Cynognathus* e il *Thrinaxodon*, entrambi grandi più o meno come cani. Col tempo i loro discendenti divennero sempre più piccoli, sempre più pelosi, e aggirandosi quasi inosservati negli angoli più bui e remoti del pianeta finirono per evolversi nei mammiferi" [237].

La scomparsa della maggior parte dei sinapsidi lascia spazio ai rettili che con gli arcosauri diventano i vertebrati terrestri dominanti. Tra di loro si trovano i dinosauri, che per ora hanno piccole dimensioni come *Coelophysis bauri*, e da loro si evolvono due rami, uno è quello degli antenati degli attuali uccelli, l'altro è quello degli antenati degli attuali coccodrilli. Ma tra di loro si ritrovano sperimentazioni come un rettile (*Sharovipteryx mirabilis*) che mediante membrane tese tra gli arti posteriori e il corpo era in grado di cacciare planando, o come *Tanystropheus longobardicus* lungo in totale sei metri ma con un collo di tre metri sostenuto da nove vertebre cervicali estremamente lunghe.

[235] Henry Gee (2022), cap. 6.

[236] Photograph by Rama, Wikimedia Commons, Cc-by-sa-2.0-fr, CC BY-SA 2.0 FR
<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/fr/deed.en>>, da Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lystrosaurus_hedini_IMG_4469.jpg

[237] Henry Gee (2022), cap. 6.



Nelle immagini (dall'alto): fossile di *Coelophysis bauri* [238], fossile di *Sharovipteryx mirabilis* [239], ricostruzione, a partire da un fossile, di *Tanystropheus longobardicus* [240].

Ma gli arcosauri non solo diventano i vertebrati terrestri dominanti: con gli pterosauri sono anche i primi vertebrati a volare. Come gli uccelli, gli pterosauri avevano ossa cave in modo da risultare più leggeri, e volavano grazie a una membrana attaccata al lunghissimo quarto dito di ogni braccio. Domineranno i cieli da - 228 a - 66 Ma: nell'immagine alla pagina seguente fossile di *Pteranodon longiceps* risalente al periodo Cretacico [241].

[238] James St. John, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>>, da Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coelophysis_bauri_mount.jpg

[239] Ghedoghedo, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>>, da Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sharovipteryx_mirabilis_fossil.JPG

[240] Ghedoghedo, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>>, da Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tanystropheus_longobardicus_4.JPG

[241] Matt Martyniuk, CC BY 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0>>, da Wikimedia Commons.



La flora include licofite, conifere, compaiono le *Ginkgoales* oggi rappresentate dall'unica specie *Ginkgo biloba*.

Gli anfibi non solo sopravvivono, ma si realizzano ben due condizioni: da un lato si sviluppano in specie gigantesche, come *Mastodonsaurus giganteus* ^[242], nel fossile qui a fianco ^[243], che ha una testa che da sola raggiunge 1,5 metri e una lunghezza totale fino a 6 metri, e che però si estinguerà, dall'altro compaiono gli anfibi moderni, i *Lissamphibia*, con il primo anuro, la prima rana del genere *Triadobatrachus*.



Negli oceani, anzi per la precisione nell'unico enorme oceano, il Panthalassa, che circonda la Pangea, si vanno sempre più diffondendo rettili acquatici, gli ittiosauri, in media lunghi da 2 a 4 metri, ma con specie che sembra possano avere raggiunto i 20 metri, che respiravano aria e partorivano piccoli vivi, simili a pesci e con il muso da delfini, che sono citati da Jay Gould come un

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pteranodon_amnh_martyniuk.jpg

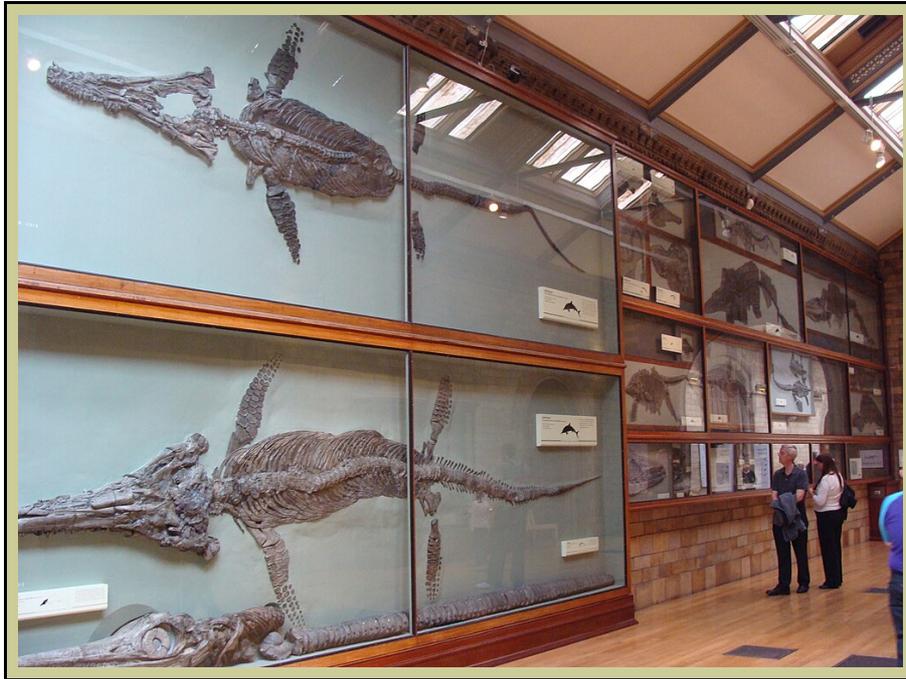
[242] Schoch Rainer. (1999). *Comparative osteology of Mastodonsaurus giganteus (Jaeger, 1828) from the Middle Triassic (Lettenkeuper: Longobardian) of Germany (Baden-Württemberg, Bayern, Thüringen)*. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde B. 278. 1-175. **PDF**

<https://www.researchgate.net/publication/235732311>

[243] Ghedoghedo, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mastodonsaurus_giganteus_2.JPG

esempio classico di evoluzione convergente, ovvero un caso in cui le somiglianze nella struttura morfologica del corpo non sono omologhe – cioè non sono causate da una discendenza comune – bensì sono analoghe intendendo con questo termine che sono causate da un adattamento simile a un ambiente identico [244].



Nell'immagine due fossili dell'ittiosauro *Temnodontosaurus* [245], sotto a quello inferiore una testa è stata ruotata in modo da evidenziare che aveva occhi enormi, probabilmente evolutisi per cacciare in profondità in condizioni di scarsa luce. Sui fondali marini compaiono nuovi coralli, tra i molluschi continua la presenza di ammoniti.

Ma ecco dopo soli (geologicamente parlando) 51 milioni di anni dall'estinzione del Permiano, e quasi inattesa vista la gravità della precedente, la quarta della grandi estinzioni:

"Ma la Terra si muoveva. Pangea, il supercontinente formatosi nel corso di centinaia di milioni di anni dai frammenti di Rodinia, stava cominciando a frantumarsi. I primi segnali si erano manifestati in corrispondenza di un punto debole, una saldatura nella crosta che già era stata teatro di analoghi drammi ... che si era formata nell'Ordoviciano, 480 milioni di anni fa, dalla collisione di due placche continentali che avevano «strizzato» un precedente oceano fino a farlo scomparire. Verso la fine del Triassico la crosta terrestre iniziò a separarsi più o meno lungo la stessa linea, creando quello che sarebbe diventato l'Oceano Atlantico ... La crosta terrestre continuò a tendersi e ad assottigliarsi finché il mostro che era in agguato nel sottosuolo decise che era arrivato il suo momento. Circa 201 milioni di anni fa una bolla di magma esplose in superficie, coprendo di basalto il Nord America orientale e le allora vicine regioni del Nord Africa, rilasciando anidride carbonica, cenere, fumo e l'ormai consueto cocktail di gas nocivi. Le temperature terrestri, già piuttosto alte, schizzarono a livelli ancora più sfavorevoli alla vita ... La nuova crisi durò seicentomila anni. Alla fine il mare riuscì a penetrare nella spaccatura: era il primo stadio di quello

[244] Stephen Jay Gould (2003), cap. 5.

[245] Fernando Losada Rodríguez, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Temnodontosaurus.001_-_Natural_History_Museum_of_London.jpg

che sarebbe poi diventato l'Atlantico, ma molti degli animali che avrebbero potuto immergersi nel nuovo oceano non c'erano più. I talattosauri, i pachipleurosauri, i notosauri, gli hupehsuchi e i placodonti erano scomparsi. Era andata un po' meglio agli ittiosauri, sopravvissuti insieme ai plesiosauri, discendenti dei notosauri. Sulla terraferma non c'era più traccia dei dicinodonti e dei procolofonidi, dei rauisuchi e dei rincosauri, dei silesauri, dei bizzarri Sharovipteryx, dei Tanystropheus dal lunghissimo collo e dei drepanosauri: erano stati spazzati via tutti quanti. Il grande circo del Triassico aveva tolto le tende, lasciando dietro di sé un gruppetto di sopravvissuti male in arnese. La folta schiera degli animali coccodrilliformi si era ridotta all'unica stirpe dalla quale discendono, per l'appunto, gli odierni coccodrilli. Anche gli anfibi giganti sopravvissero, benché a fatica, e così pure gli pterosauri, un esiguo numero di mammiferi e alcuni terapsidi cinodonti apparentemente simili ai mammiferi; si salvarono anche gli sfenodonti, le tartarughe, le rane e le lucertole – e i dinosauri. Non è ancora chiaro perché i dinosauri siano sopravvissuti mentre tante altre creature simili non ce l'abbiano fatta, ma potrebbe essere stata pura e semplice fortuna. Dopo il Permiano era stato il Lystrosaurus a vincere la lotteria della vita, e adesso era il momento dei dinosauri: toccava a loro crescere, diversificarsi e popolare il nuovissimo mondo che si era appena creato" [246].

Siamo ora al **periodo Giurassico** che dura 56 milioni di anni, da - 201 Ma a - 145 Ma.

Una sintesi dell'evoluzione dei continenti è riportata nell'immagine alla pagina seguente [247]. All'inizio del Giurassico la frammentazione del supercontinente Pangea, circondato da un unico sterminato oceano, Panthalassa, è iniziata da tempo e sta portando alla separazione del continente Laurasia a nord dal continente Gondwana a sud, al termine l'oceano Tetide e l'abbozzo di quello che diventerà l'Atlantico del Nord sono collegati, mentre Sud America e Africa iniziano ad allontanarsi. Nel successivo Cretacico la deriva dei continenti progredisce, l'Atlantico continua ad allargarsi, India e Australia raggiungono progressivamente la loro posizione attuale, infine l'Africa cozza con l'Eurasia e chiude il Mediterraneo che si prosciuga completamente (in basso a sinistra): lo stretto di Gibilterra si apre al termine del Miocene e l'acqua dell'oceano Atlantico con una spettacolare alluvione riempie nuovamente il Mediterraneo.

L'effetto serra provocato da livelli di CO₂ attorno allo 0,09% [248] (contro l'attuale circa 0,43%) provoca temperature superiori alle "... attuali di 5° C a 10° C, causando un'umidità atmosferica più elevata e un ciclo idrologico molto accentuato" [249]. Il clima tropicale favorisce la formazione di sedimenti marini contenenti arenaria o argilla e plancton e altri residui organici che – per azione prima di batteri anaerobi, poi di trasformazioni chimiche dovute a temperatura e pressione elevate – nel corso di decine di milioni di anni portano alla formazione di petrolio e gas.

[246] Henry Gee (2022), cap. 6.

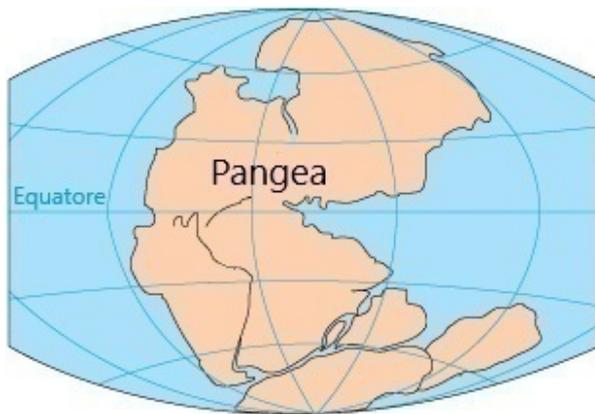
[247] Adattato da: Kious Jacquelyne, Tilling Robert I., Kiger Martha, Russel Jane, Public domain, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pangaea_to_present.gif

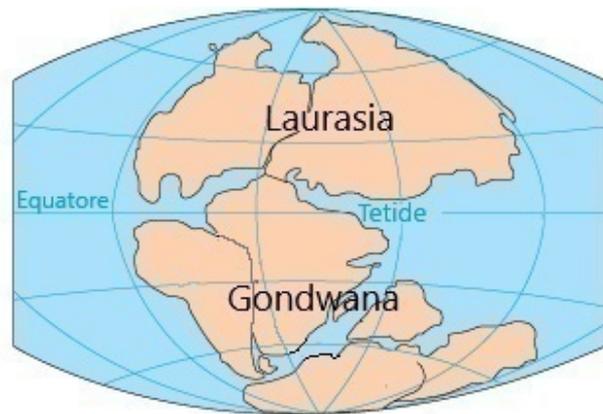
[248] M. Steinthorsdottir, V. Vajda. *Early Jurassic (late Pliensbachian) CO₂ concentrations based on stomatal analysis of fossil conifer leaves from eastern Australia*. Gondwana Research, Volume 27, Issue 3, 2015, Pages 932-939, ISSN 1342-937X, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.08.021>. | PDF |

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X13003043>

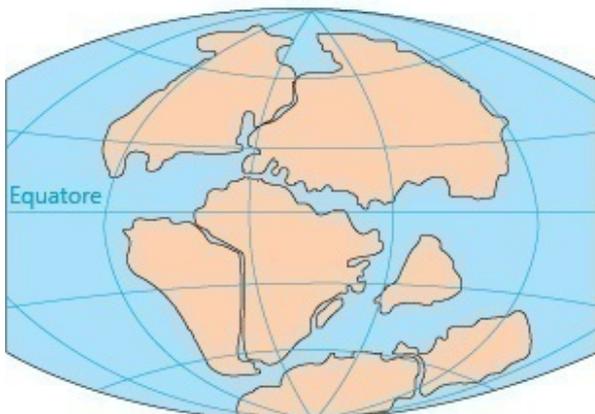
[249] Bruce W. Sellwood, Paul J. Valdes, Jurassic climates. Proceedings of the Geologists' Association, Volume 119, Issue 1, 2008, Pages 5-17, ISSN 0016-7878, [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(59\)80068-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(59)80068-7)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016787859800687>



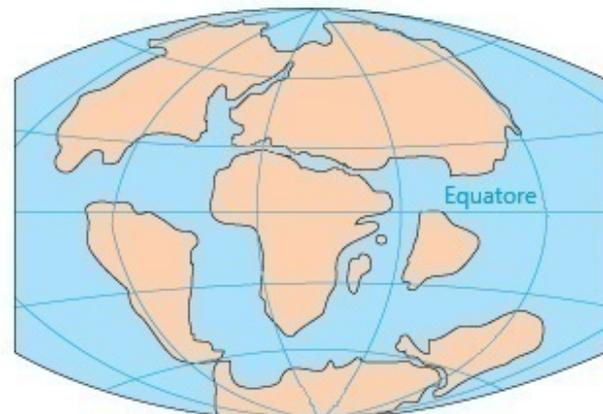
Permiano-Triassico
250 milioni di anni fa



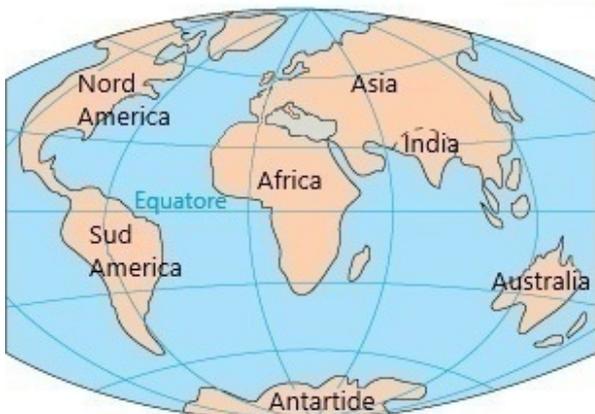
Triassico-Giurassico
200 milioni di anni fa



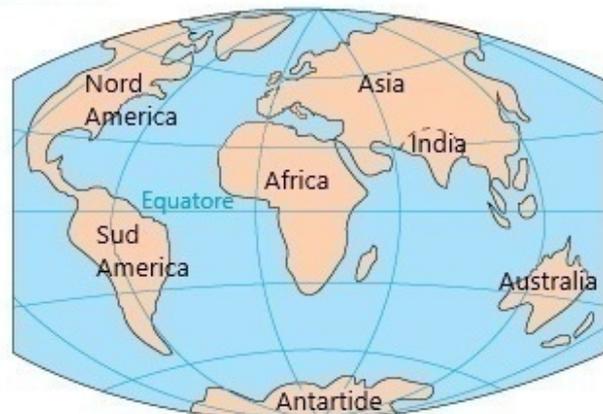
Giurassico
150 milioni di anni fa



Cretacico
70 milioni di anni fa



Miocene
5,3 milioni di anni fa



Oggi

Oggiorno "... la maggior parte delle risorse petrolifere norvegesi sono intrappolate in rocce serbatoio depositate in grandi delta formati da fiumi che sfociavano nel mare durante il periodo Giurassico" [250].

[250] *Norwegian petroleum.*

<https://www.norskpetroleum.no/en/petroleum-resources/petroleum-formation/>

APPROFONDIMENTO

L'origine del petrolio ^[251]

Il processo che porta alla formazione di petrolio e gas è il seguente:

- 1) il *plancton* affonda e si deposita sul fondo marino insieme a fango fine (argilla), il sedimento risultante (zooplancton e fitoplancton, fango e batteri anaerobi in grado di trasformare la componente organica) porta alla formazione del sapropel;
- 2) il sapropel viene sepolto da altri sedimenti (sabbia, argilla, sabbia, ...) che con il loro peso aumentano la pressione e la temperatura dello strato di sapropel;
- 3) a circa 50 °C, corrispondenti a 1-2 km di profondità il sapropel attraverso l'azione di batteri anaerobi e di processi chimici si trasforma in kerogene;
- 3) gli strati di sedimenti sono deformati in seguito ai movimenti tettonici dell'area;
- 4) altri sedimenti si sovrappongono aumentando pressione e temperatura del kerogene;
- 5) a 80-120 °C di temperatura e con la pressione corrispondente a 3-5 km di profondità avviene la conversione del kerogene in petrolio liquido che migra nei depositi di arenaria;
- 6) tra 120 e 150 °C si forma il gas che migra nei depositi di arenaria;
- 7) in alcuni casi anche acqua salata migra nei depositi di arenaria al di sotto del petrolio;
- 8) si forma un campo estraibile di petrolio o gas quando questi migrano attraverso i pori e gli spazi di rocce permeabili e si raccolgono negli spazi porosi al di sotto di uno strato impermeabile;
- 9) contrariamente a quanto si tende a ritenere, questi processi non generano vaste "bolle" di petrolio o gas intrappolate sottoterra. Quasi tutto il petrolio e il gas si trovano nei piccoli spazi nelle rocce sedimentarie sepolte in profondità, come arenarie e calcari a grana grossa. Queste rocce porose si comportano come una spugna dura, piena di piccoli fori, ma non comprimibile e il petrolio o il gas sono intrappolati all'interno delle porosità della roccia. Quando una trivella penetra in una di queste rocce, l'enorme pressione esercitata su gas e petrolio dal peso delle rocce sovrastanti li "spreme" attraverso le porosità delle rocce nella trivella, dalla quale giungono in superficie, dove possono essere imbrigliati: dalla trivellazione nasce un pozzo petrolifero (o di gas).

Quella delineata qui sopra è la teoria biogenica della formazione del petrolio comunemente accettata. A favore di questa teoria vi è tra le altre cose il fatto che il petrolio contiene strutture ad anello che sono tipicamente di origine organica (porfirine). La possibilità invece di una origine abiotica degli idrocarburi è dimostrata dal fatto che le rocce di cui sono composti asteroidi e meteoriti possono contenere idrocarburi, ma questo è un fenomeno particolare e assolutamente spiegabile, come la presenza nelle stesse rocce di amminoacidi e altre molecole organiche (vedere l'approfondimento *Molecole organiche negli asteroidi*), che però non ha a che vedere con la formazione degli enormi depositi di petrolio della Terra.

I depositi di petrolio più antichi si trovano in Oman e risalgono al Neoproterozoico (ultima era dell'eone Proterozoico) e all'inizio del Cambriano ^[252]. Sei intervalli stratigrafici che

[251] Walters, Clifford. (2007). *The Origin of Petroleum*. In book: *Practical Advances in Petroleum Processing* (pagg. 79-101). | [PDF](#) |

<https://www.researchgate.net/publication/226441668>

[252] E. Grosjean, G.D. Love, C. Stalvies, D.A. Fike, R.E. Summons. *Origin of petroleum in the Neoproterozoic–Cambrian South Oman Salt Basin*. *Organic Geochemistry*, Volume 40, Issue 1, 2009, Pages 87-110, ISSN 0146-6380.

<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.09.011>.

rappresentano un terzo del tempo Fanerozoico contengono rocce sorgenti di petrolio che hanno fornito oltre il 90 per cento delle riserve originali di petrolio e gas scoperte nel mondo. I sei intervalli sono (1) Siluriano (ha generato il 9 per cento delle riserve mondiali), (2) Devoniano superiore-Tournaisiano (8 per cento delle riserve), (3) Pennsylvaniano-Permiano inferiore (8 per cento delle riserve), (4) Giurassico superiore (25 per cento delle riserve), (5) Cretaceo medio (29 per cento delle riserve) e (6) Oligocene-Miocene (12,5 per cento delle riserve) [253]. La situazione in Europa nel Mare del Nord è stata descritta di recente [254].

Due cose vanno sottolineate a questo punto:

→ la prima è che, a partire dal Mesozoico, vediamo che le specie che si estinguono lasciano progressivamente il posto ad antenati delle specie moderne, prima sporadicamente, poi con sempre maggior frequenza;

→ la seconda è che le specie animali e vegetali identificate e classificate aumentano in proporzione alla sempre maggior numerosità e qualità dei reperti fossili. E già per il Giurassico ad esempio si hanno depositi di fossili come quelli del *Solnhofen Plattenkalk*, il calcare di Solnhofen, in Baviera, la cui documentazione da sola riempirebbe completamente le pagine di questa breve storia [255], che per poter arrivare al termine deve inevitabilmente procedere illustrando solamente i passaggi chiave geologici e paleontologici, che si fanno sempre più ravvicinati e incalzanti.

La transizione tra Triassico e Cretacico, con la relativa estinzione – la quinta grande estinzione – e l'inizio della frammentazione di Pangea, avviene alle ore 22:57 quando manca ormai solamente un'ora alla mezzanotte. E la quantità di eventi che si susseguono nell'ultima ora della storia della Terra e della vita è a dir poco straordinaria.

Se Cambriano e Ordoviciano possono essere considerati le età dei molluschi e degli artropodi marini e il Devoniano l'età dei pesci, il Mesozoico è l'età dei rettili. Nell'oceano accanto agli ittiosauri che abbiamo già visti nel Triassico, nel periodo Giurassico diventano molto comuni i plesiosauri. Parliamo di rettili marini che arrivavano a 15 metri e, nel caso degli ittiosauri, i rettili marini del Triassico che comunque continuano a popolare gli oceani del Giurassico, di specie che arrivano a 21 metri di lunghezza. Nell'immagine fossile del plesiosauro *Kronosaurus queenslandicus* [256].



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146638008003021>

[253] *Depositional Controls, Distribution, and Effectiveness of World's Petroleum Source Rocks*. By G.F. Ulmishek and H.D. Klemme. In: *Depositional Controls, Distribution, and Effectiveness of World's Petroleum Source Rocks*. U.S. GEOLOGICAL SURVEY BULLETIN 1931. | PDF |

<https://pubs.usgs.gov/bul/1931/report.pdf>

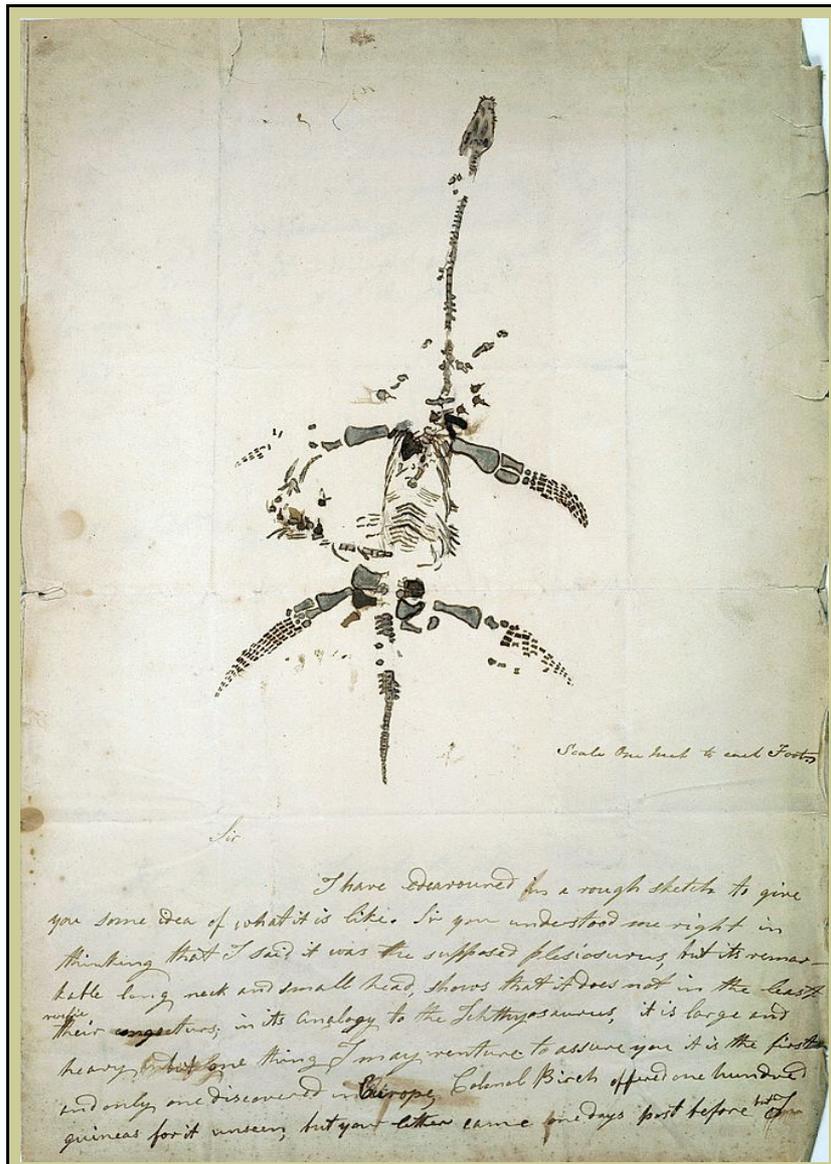
[254] Gautier Donald L., 2005. *Kimmeridgian Shales Total Petroleum System of the North Sea Graben Province*. U.S. Geological Survey Bulletin 2204-C. | PDF |

<https://pubs.usgs.gov/bul/2204/c/pdf/B2204C.pdf>

[255] Le immagini dei fossili e la loro esatta classificazione sono riportati alla pagina *Paleobiota of the Solnhofen Limestone*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Paleobiota_of_the_Solnhofen_Limestone

[256] Tim Sackton, CC BY-SA 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>>, da Wikimedia

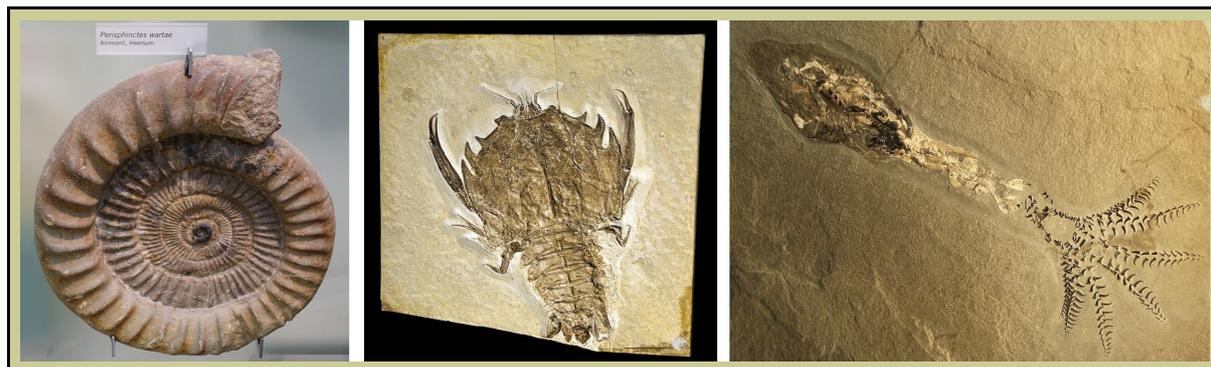


Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kronosaurus_queenslandicus.jpg

Alla pagina precedente è riportata la lettera con la quale Mary Anning [257] annunciava il 26 dicembre 1823 la sua scoperta nelle scogliere di Lyme Regis, nella contea del Dorset, in Inghilterra, di un fossile di plesiosauro oggi noto come *Plesiosaurus dolichodeirus* [258].

Il mare nel Giurassico non pullula solamente di rettili, vi sono anche cefalopodi e crostacei: nell'immagine a sinistra il fossile di un mollusco cefalopode, l'ammonite *Perisphinctes wartae* [259], al centro fossile del crostaceo decapode *Eryon cuvieri* [260], a destra fossile del cefalopode *Phragmoteuthis conocauda* [261]. Dopo l'estinzione di massa della fine del Triassico le ammoniti subiscono una notevole diversificazione evolutiva [262], ma anche loro, come le due altre specie riportate nell'immagine, in seguito si estingueranno.



Tra i rettili dell'ordine *Rhynchocephalia* dei quali oggi è sopravvissuta una specie in Nuova Zelanda, abbiamo nell'immagine alla pagina successiva a sinistra *Pleurosaurus* [263], un rettile acquatico e al centro *Vadasaurus herzogi* [264] che aveva una vita più terrestre. A destra invece il fossile di una delle più antiche salamandre conosciute [265], del genere *Karaurus*.

[257] The Royal Society. *Most influential women in British science history*.

https://www.storicang.it/a/mary-anning-paleontologa-dimenticata_15541

[258] Mary Anning (1799-1847), Public domain, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mary_Anning_Plesiosaurus.jpg

[259] Daderot, CC0, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perisphinctes_wartae_-_Museum_fur_Naturkunde,_Berlin_-_DSC00011.JPG

[260] Didier Descouens, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eryon_cuvieri_Solnhofen.jpg

[261] Ghedoghedo, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phragmoteuthis_conocauda.JPG

[262] Hesselbo, Stephen & Ogg, James & Ruhl, Micha & Hinnov, Linda & Huang, C.J. (2020). *The Jurassic Period*. 10.1016/B978-0-12-824360-2.00026-7. | PDF |

https://www.researchgate.net/publication/347655591_The_Jurassic_Period

[263] Ghedoghedo, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pleurosaurus_783534.jpg

[264] Gabriel S. Bever & Mark A. Norell, CC BY 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vadasaurus_herzogi_holotype_\(fossil\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vadasaurus_herzogi_holotype_(fossil).jpg)

[265] Ghedoghedo, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia



Sulla terraferma si diffondono a partire dalla Patagonia le araucarie [266] e le conifere, appaiono forme moderne di cupressacee come le sequoie. Continua la diffusione di insetti [267] e aracnidi [268]. Nell'immagine a sinistra strobilo pietrificato di *Araucaria mirabilis* [269], al centro un insetto della specie *Lichnomesopsyche daohugouensis* oggi specie estinta, ma l'ordine dei *Mecopteri* cui appartiene oggi annovera ben 600 specie [270], a destra aracnide della specie *Mongolarachne jurassica* [271].



Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karaurus_sharovi.JPG

[266] Iglesias Ari & Artabe Analia & Morel Eduardo. (2011). *The evolution of Patagonian climate and vegetation from the Mesozoic to the present*. Biological Journal of the Linnean Society. 103. 409 - 422. 10.1111/j.1095-8312.2011.01657.x. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/229992983>

[267] Lin Xiaodan & Shih Matthew & Labandeira Conrad & Dong, Ren. (2016). *New data from the Middle Jurassic of China shed light on the phylogeny and origin of the proboscis in the Mesopsychidae (Insecta: Mecoptera)*. BMC Evolutionary Biology. 16. 10.1186/s12862-015-0575-y. | PDF |

<https://www.researchgate.net/publication/289263570>

[268] Selden PA, Shih C, Ren D. *A giant spider from the Jurassic of China reveals greater diversity of the orbicularian stem group*. Naturwissenschaften. 2013 Dec;100(12):1171-81. doi: 10.1007/s00114-013-1121-7. Epub 2013 Dec 7. PMID: 24317464; PMCID: PMC3889289. | PDF |

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3889289/>

[269] Brocken Inaglory, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Petrified_Araucaria_cone.jpg

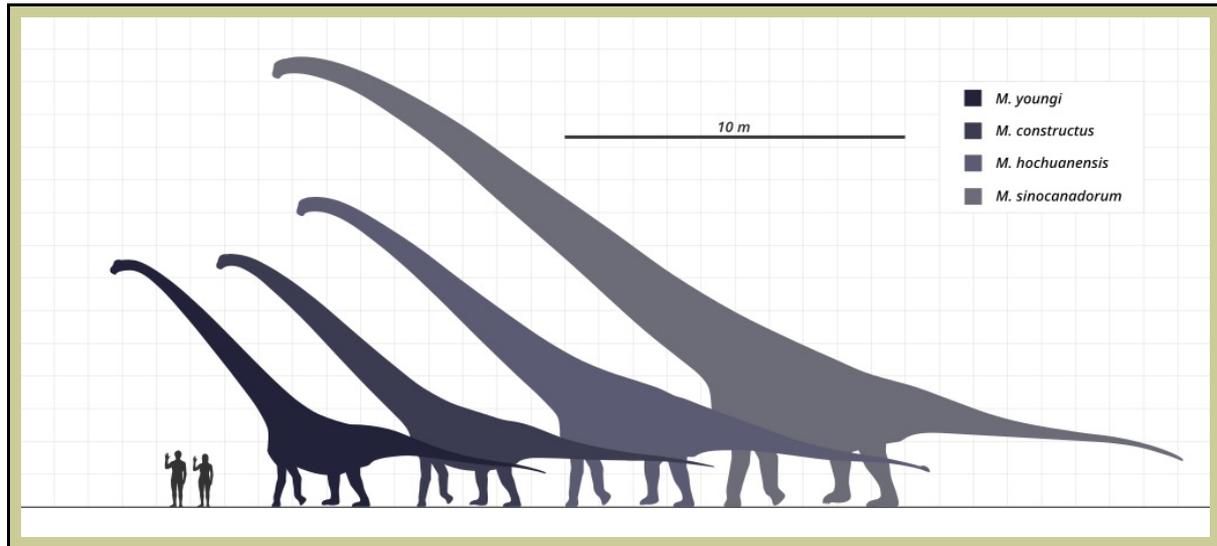
[270] Lin et al., CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lichnomesopsyche_daohugouensis.jpg

[271] Paul A. Selden, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mongolarachne.jpg>

Ma ecco cos'altro, se fossimo stati presenti, avremmo avvistato sulla terraferma.



Quadrupedi ed erbivori, come riportato nell'immagine [272] i dinosauri sauropodi del genere *Mamenchisaurus* avevano un collo molto lungo e una lunga coda, lunghi 20-30 metri pesavano tra le 20 e le 30 tonnellate, ma negli esemplari più grandi raggiungevano probabilmente i 35 metri di lunghezza e le 50 tonnellate di peso.

Nell'immagine a sinistra scheletro di *Mamenchisaurus sinocanadorum* [273] e a destra scheletro di un'altra specie di dinosauro sauropode, *Apatosaurus louisae* [274], lungo attorno ai 20 metri e con un peso attorno alle 20 tonnellate.



[272] Steveoc 86, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mamenchisaurus_Species_Scale_Steveoc86.svg

[273] Kabacchi, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>, da Wikimedia Commons.

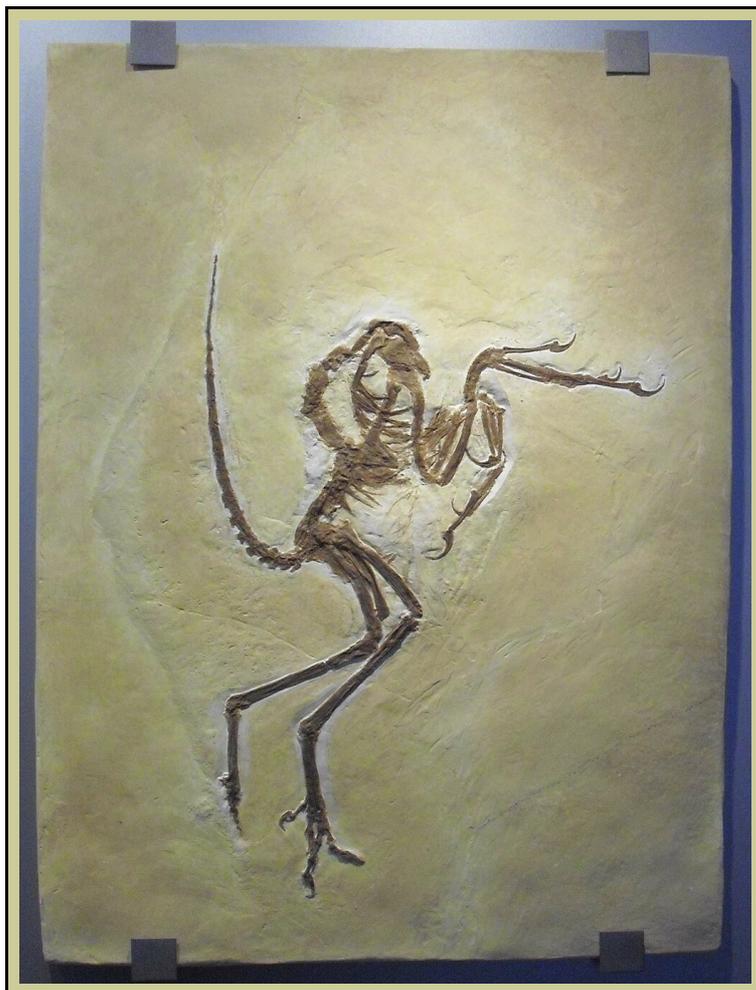
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mamenchisaurus_in_Japan.jpg

[274] Tadek Kurpaski from London, Poland, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>, da Wikimedia Commons.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Louisae.jpg>

Ma in tema di dinosauri c'è ben altro e almeno altrettanto inatteso. Nel tardo Giurassico, quando l'Europa è un arcipelago di isole in un mare tropicale caldo e poco profondo, molto più vicino all'equatore di quanto non lo sia oggi, in quella che oggi è la Germania meridionale, un dinosauro muore, viene sepolto dai sedimenti lasciando nel calcare di Solnhofen uno scheletro molto ben conservato. Ha le dimensioni tra una gazza e un corvo, ha le ali, ha le piume.

Quello riportato [275] è uno scheletro fossile di *Archaeopteryx* – così viene denominato il genere – "... il decimo esemplare di scheletro delle *Archaeopterygidae* del Giurassico superiore. Lo scheletro quasi completo e ben conservato è assegnato ad *Archaeopteryx siemensii* Dames, 1897 e fornisce nuove informazioni significative..." [276] su questo nuovo animale apparso nel corso dell'evoluzione: si tratta del primo uccello.



"La genesi degli uccelli è stato un evento chiave nella storia dei vertebrati. I discendenti di questi animali hanno dominato le nicchie aeree dal tardo Mesozoico fino a oggi, dove sono il clado di amnioti che include il maggior numero di (~10.000 specie) ... I primi uccelli erano semplicemente

[275] FerdiBf at de.wikipedia, Public domain, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eichst%C3%A4tt_Wellnhoferia_grandis.jpg

[276] Gerald Mayr, Burkhard Pohl, Scott Hartman, D. Stefan Peters. *The tenth skeletal specimen of Archaeopteryx*. *Zoological Journal of the Linnean Society*, Volume 149, Issue 1, January 2007, Pages 97–116, <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2006.00245.x>

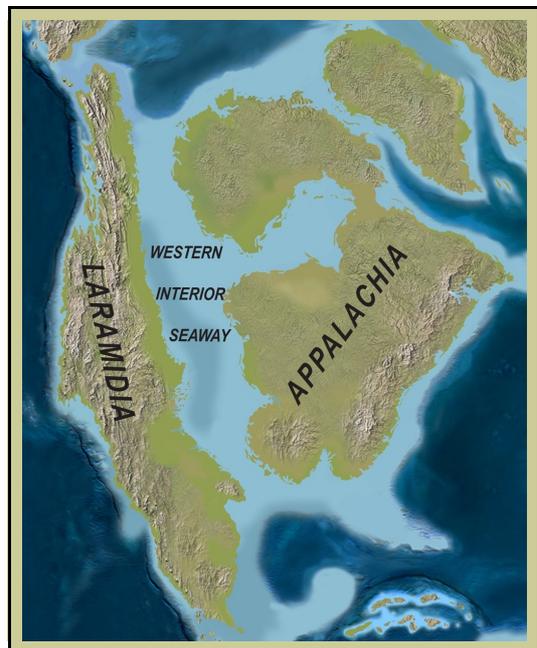
dinosauri piumati per quanto riguarda la crescita e la fisiologia energetica. L'evoluzione del nuovo modello in forme moderne si è verificata più avanti nella storia del gruppo. ... Le prove collocano in modo conclusivo gli uccelli all'interno della radiazione evolutiva dei dinosauri teropodi, rendendo giustamente gli uccelli gli unici dinosauri viventi" [277].

"Da quando è stato rinvenuto il primo fossile di Archaeopteryx è molta la strada fatta. La sua scoperta ha svolto un ruolo importante nell'affermare le evidenze della teoria dell'evoluzione di Darwin. Per decenni è stato il fulcro di ogni discussione sull'origine degli uccelli e sugli adattamenti che consentivano loro di volare. Ora Archaeopteryx è solo uno tra le centinaia di straordinari esemplari di fossili dell'Era dei dinosauri che hanno completamente modificato il modo in cui pensiamo a rettili e uccelli. I dinosauri non sono estinti: in questo momento sono appollaiati su un ramo o stanno volando in giardino" [278]. E oggi anche le fonti scientifiche divulgative riportano che "gli uccelli (Aves Linnaeus, 1758) sono una classe di dinosauri teropodi (dinosauri aviani) altamente specializzati" [279].

Il **periodo Cretacico** (o Cretaceo) inizia a - 145 Ma e termina a - 66 Ma, con una durata di 79 milioni di anni che ne fa il periodo geologico più lungo dell'intero Fanerozoico.

La temperatura è mediamente elevata e per circa 27 milioni di anni del tardo Cretaceo (~95–68 Ma), il mare sommerge molte aree continentali, per questa ragione accanto agli estesi depositi di gesso che danno il nome al periodo (tra di essi vi sono quelli famosi delle "bianche scogliere di Dover" e della opposta costa di Normandia), i depositi del Cretacico sono spesso costituiti da calcare marino, che si forma in acque calde e poco profonde.

L'intera Europa è un arcipelago di isole e nel Nord America "... i livelli elevati del mare a livello globale hanno prodotto il Mare interno occidentale del Cretaceo [che collegava Golfo del Messico e Oceano Artico, nell'immagine a fianco], un mare poco profondo che ha inondato la parte centrale del Nord America, formando masse continentali orientali e occidentali note rispettivamente come Appalachi e Laramidia. Nonostante le sue dimensioni ridotte (<20% dell'attuale area del Nord America), Laramidia è stata un crogiolo di evoluzione, ospitando una grande radiazione evolutiva di dinosauri che probabilmente rappresenta l'apice della diversità dei dinosauri mesozoici" [280].



[277] Erickson GM, Rauhut OW, Zhou Z, Turner AH, Inouye BD, Hu D, Norell MA. *Was dinosaurian physiology inherited by birds? Reconciling slow growth in archaeopteryx*. PLoS One. 2009 Oct 9;4(10):e7390. doi: 10.1371/journal.pone.0007390. PMID: 19816582; PMCID: PMC2756958. | PDF | <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2756958/>

[278] Donald R. Prothero (2021), cap. 18.

[279] Aves è la prima voce che compare in una ricerca su Google del termine "Uccelli".

<https://it.wikipedia.org/wiki/Aves>

[280] Sampson SD, Loewen MA, Farke AA, Roberts EM, Forster CA, Smith JA, et al. (2010). *New Horned Dinosaurs from Utah Provide Evidence for Intracontinental Dinosaur Endemism*. PLoS ONE 5(9): e12292.

| PDF |

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012292>

Continua la frammentazione di Pangea con la deriva dei continenti.

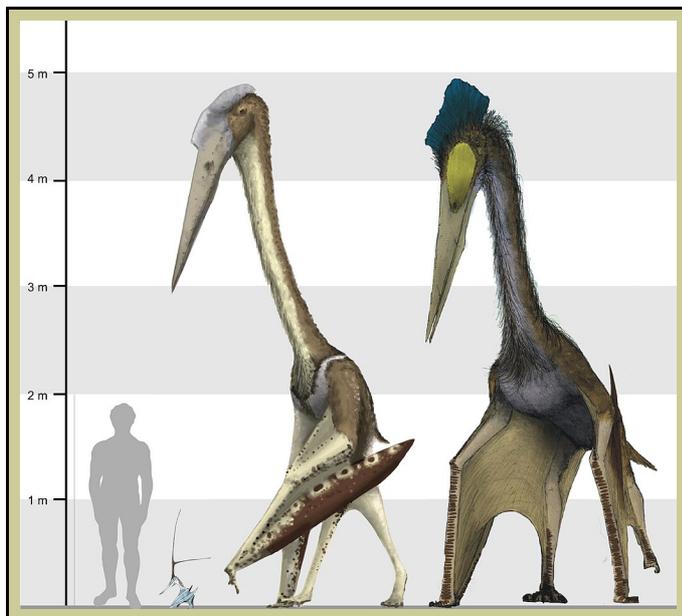
Se durante il Giurassico la flora era dominata dalle gimnosperme, come le conifere e le ginkgoite, ora inizia l'ascesa delle *angiosperme*, le piante che producono fiori, che costituiscono il 90% delle specie vegetali viventi oggi.

Negli oceani accanto ai Plesiosauri già presenti dal periodo precedente compaiono nuovi rettili marini come i Tilosauri (nell'immagine cranio di *Tylosaurus saskatchewanensis*) [281] e vi sono squali di grandi dimensioni come quelli del genere *Cretoxyrhina*, molto simili agli attuali squali bianchi, che raggiungono gli 8 metri di lunghezza e le 5 tonnellate di peso.



Anche nel Cretacico gli esperimenti evolutivi sono molti, per esempio *Hesperornis* è un genere di dinosauri teropodi con un aspetto molto simile agli attuali cormorani, come questi specializzati nella pesca, ma quasi privi di ali. Mentre raggiungono dimensioni enormi gli Pterosauri, con aperture alari di 10 metri e forse più:

"All'inizio della loro storia gli pterosauri erano piccoli e svolazzanti, un po' come i pipistrelli. E come i pipistrelli, erano anche coperti di peli.



Evolvendosi diventarono sempre più grandi, tanto che alla fine del Cretaceo gli ultimi esemplari della specie erano grossi come aerei da turismo e riuscivano a stento a battere le ali ... avevano imparato ad alzarsi in volo sfruttando il moto ascendente delle masse d'aria calda. Come veri e propri alianti, erano in grado di compiere virate strettissime per sfruttare anche la più piccola colonna d'aria, salendo sempre più in alto per poi allontanarsi dalla termica e planare verso terra alla ricerca di una nuova corrente ascensionale. Grazie a questa tecnica riuscivano a percorrere in volo lunghe distanze senza troppa fatica; certi pterosauri giganti, come lo

Pteranodon, sorvolavano i mari che si erano aperti dopo il frazionamento di Pangea e planavano tra i giovani continenti alla deriva. Solo gli pterosauri veramente grandi come lo *Pteranodon*, il gigantesco *Quetzalcoatlus* e l'ancor più enorme *Arambourgiana* potevano volare in quel modo. Nessun animale, per quanto forte, sarebbe mai riuscito a battere ali membranose tanto enormi senza farle accartocciare" [282]. Nell'immagine ricostruzione in scala che illustra le proporzioni di *Nyctosaurus* (a sinistra, lungo una quarantina di centimetri a sinistra, con l'enorme cresta cranica a forma di

Immagine:

<https://journals.plos.org/plosone/article/figure?id=10.1371/journal.pone.0012292.g001>

[281] Paulina Jiménez-Huidobro Michael W. Caldwell, CC BY 4.0

<<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tylosaurus_saskatchewanensis_holotype_RSM_P2588.1.png

[282] Henry Gee (2022), cap. 6.

L con i bracci di 30 e 40 centimetri rispettivamente), *Arambourgiania* (al centro) e *Quetzalcoatlus* (a destra).

Tra gli animali terrestri continuano le varianti sul tema dei sauropodi erbivori e quadrupedi con i dinosauri del genere *Triceratops*, nell'immagine a sinistra [283], mentre i dinosauri teropodi carnivori e bipedi si installano all'apice della catena alimentare con il *Tyrannosaurus rex*, nell'immagine a destra [284].



Ma, come è noto:

"... il destino dei dinosauri era segnato da tempo. Circa 160 milioni di anni or sono, nel tardo Giurassico, una collisione nella lontana Cintura degli asteroidi aveva prodotto il corpo celeste da 40 chilometri di diametro, ora noto come Baptistina, e un gran numero di frammenti: più di mille, e tutti con un diametro superiore (a volte molto superiore) al chilometro. Baptistina e il suo seguito di uccelli del malaugurio si erano poi dispersi nelle profondità del sistema solare. Circa 100 milioni di anni dopo, uno di quegli oggetti celesti colpì la Terra. Scendendo in picchiata dal quadrante nord-orientale del cielo il meteorite – che avrà avuto una larghezza massima di cinquanta chilometri – colpì la costa dell'attuale penisola dello Yucatán alla velocità di venti chilometri al secondo; dopo l'impatto penetrò nella crosta terrestre e la sciolse. Ci fu un lampo accecante, seguito da venti a mille chilometri l'ora che spazzarono la regione producendo un frastuono inimmaginabile e distruggendo ogni forma di vita in tutti i Caraibi e in gran parte del Nord America; subito dopo l'intero pianeta fu martellato da una pioggia di bombe incendiarie e sferzato da un vento rovente che trasformò tutti gli alberi in torce. L'acqua del Golfo del Messico fu risucchiata indietro e un'onda di maremoto alta cinquanta metri si abbatté sulle coste, spingendosi nell'entroterra per più di cento chilometri. L'asteroide schiantatosi a terra perforò sedimenti ricchi di anidrite, residui di un antico fondale marino. L'anidrite, che è una forma del solfato di calcio, si trasformò istantaneamente in anidride solforosa allo stato gassoso. Il gas raggiunse la stratosfera condensandosi in nuvole che, insieme alle polveri generate dall'impatto, oscurarono il Sole e precipitarono il mondo in un inverno che durò anni ... Quando il Sole tornò a levarsi sul pianeta, l'anidride solforosa era già scesa a terra sotto forma di una pioggia acida e pungente, che uccise le

[283] Source: Allie_Caulfield Derivative: User:MathKnight, CC BY-SA 3.0
<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LA-Triceratops_mount-2.jpg

[284] Evolutionnumber9, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FMNH_SUE_Trex.jpg

piante sopravvissute e sciolse tutte le barriere coralline. A quel punto tutti i dinosauri non volanti erano spariti.

6 June 1980, Volume 208, Number 4448

SCIENCE

Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction

Experimental results and theoretical interpretation

Luis W. Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro, Helen V. Michel

extinctions (3, 4), and two recent meetings on the topic (5, 6) produced no sign of a consensus. Suggested causes include gradual or rapid changes in oceanographic, atmospheric, or climatic conditions (7) due to a random (8) or a cyclical (9) coincidence of causative factors; a magnetic reversal (10); a nearby supernova (11); and the flooding of the ocean surface by fresh water from a postulated arctic lake (12).

A major obstacle to determining the cause of the extinction is that virtually all the available information on events at the time of the crisis deals with biological changes seen in the paleontological record and is therefore inherently indirect.

Gli ultimi pterosauri erano stati spazzati via. Erano morti anche i magnifici plesiosauri, discendenti dei notosauri del Triassico, e i mosasauri, temibili varani oceanici. L'estinzione delle grandi ammoniti che solcavano i mari con le loro conchiglie a spirale aveva posto fine a una lunga genealogia le cui radici risalivano al Cambriano. Il cratere prodotto dall'asteroide aveva un diametro di centosessanta chilometri. Eppure, per l'ennesima volta, la vita sul pianeta ricominciò; malgrado la scomparsa di tre quarti di tutte le specie esistenti, tornò presto a rifiorire persino nel luogo dell'impatto. Trentamila anni più tardi le acque circostanti erano già abitate dal plancton; gli scheletri gessosi dei minuscoli crostacei, piovendo sul fondo, nascosero quel che restava del cratere scavato dallo schianto. Gli eredi della vita sulla Terra erano quei lontani discendenti dei terapsidi, che, come i dinosauri, avevano sviluppato un metabolismo veloce ma lo usavano in modo del tutto diverso. Dopo aver vissuto nell'ombra fin dal Triassico, i mammiferi erano finalmente emersi alla luce del Sole" [285].

Il limite precedentemente noto come limite K-T (limite tra Cretacico abbreviato nella sigla K e periodo Terziario), e attualmente ridenominato limite K-Pg (ove Pg = Paleogene), è il sottile strato geologico indagato dal fisico Alvarez [286] che per primo ha osservato che l'iridio vi è contenuto in quantità molto elevate e compatibili solamente con le elevate concentrazioni che vi sono nei meteoriti. Il limite K-Pg è presente dappertutto sulla Terra e in Italia è evidente a Gubbio nella Gola del Bottaccione che è stata tra le prime zone campionate. Dopo la pubblicazione del lavoro di Alvarez nel 1980 [287] il punto di svolta è stato l'identificazione negli anni '90 del '900 – nel golfo del

[285] Henry Gee (2022), cap. 7.

[286] Premio Nobel per la fisica 1968 per meriti nel campo dello studio delle particelle elementari.

[287] Luis W. Alvarez et al. *Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction*. Science 208,1095-

Messico, nella penisola dello Yucatán, nei pressi di Chicxulub – del cratere da impatto dell'asteroide [288] che ha causato l'estinzione del Cretacico-Paleogene, la quinta grande estinzione (la sesta è in corso attualmente, causata dall'uomo).

RIASSUMENDO

Nel *Mesozoico* - la seconda era dell'eone Fanerozoico - nell'arco di 186 milioni di anni:

→ il supercontinente Pangea si frammenta e inizia la deriva dei continenti che porterà alla loro attuale distribuzione;

→ compaiono i primi mammiferi, con dimensioni assai ridotte, simili a piccoli roditori;

→ elevate concentrazioni di CO₂ favoriscono il mantenimento di temperature elevate e la diffusione degli animali eterotermi, i rettili arrivano a dominare cieli, oceani e terraferma con fenomeni di gigantismo unici nella storia della Terra e ampiamente documentati dai fossili;

→ gli sconvolgimenti causati dall'impatto di un asteroide e il cambiamento delle condizioni ambientali e climatiche determinano la totale scomparsa dei grandi rettili che hanno dominato l'era.

L'eone **Fanerozoico** continua con il *Cenozoico*....

1108 (1980). DOI:10.1126/science.208.4448.1095. | **PDF** |

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.208.4448.1095>

<https://pdfs.semanticscholar.org/f23d/f624d2e7d945277a4c06d6d66008eb0f4242.pdf>

[288] Gulick S. P. S., G. L. Christeson, P. J. Barton, R. A. F. Grieve, J. V. Morgan, and J. Urrutia-Fucugauchi (2013). *Geophysical characterization of the Chicxulub impact crater*. Rev. Geophys., 51, 31–52. | **PDF** |

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rog.20007>.

Eone	Era	Periodo	Epoca	Ma	Eventi / Fossili	
Termina l'era Mesozoica del Fanerozoico				- 66,0	Inizia l'era Cenozoica del Fanerozoico	
Fanerozoico	Cenozoico	Paleogene	Paleocene	- 66 - 56	Licheni, briofite e felci ripopolano la flora Si espandono i mammiferi / <i>Sinonyx jiashanensis</i> Le foreste si espandono fino all'Antartide / <i>Metasequoia occidentalis</i> I pesci ossei si espandono nei mari Primi coccodrilli / <i>Borealosuchus wilsoni</i>	
			Eocene	- 56 - 53 - 45 - 37	Comparsa dei primati Picco massimo di temperatura della Terra Primi pinguini / <i>Anthropornis nordenskjoeldi</i> Mammiferi ungulati erbivori / <i>Megacerops</i> L'Australia si stacca dall'Antartide Inizia il sollevamento di Tibet e Himalaya Antenati delle balene / <i>Durodon atrox</i>	
			Oligocene	- 34 - 28	Inizia l'era glaciale Tardo Cenozoica Inizia la glaciazione Antartica Inizia il sollevamento delle Alpi Primi cavalli / <i>Mesohippus</i> Primi camelidi / <i>Poebrotherium</i> Perissodattili giganti / <i>Paraceratherium transouralicum</i>	
			Neogene	Miocene	- 14 - 5,33	Termina la glaciazione Antartica Artiodattilo onnivoro / <i>Daedon</i> Mammifero acquatico erbivoro / <i>Paleoparadoxia</i> Denti fossili di <i>Otodus megalodon</i> Si apre lo Stretto di Gibilterra
				Pliocene	- 4,1 - 3,2 - 2,9 - 2,8	<i>Australopithecus anamensis</i> Lucy / <i>Australopithecus afarensis</i> Inizia la glaciazione della Groenlandia <i>Australopithecus africanus</i>
			Quaternario	Pleistocene	- 2,6 - 0,4	Termina la glaciazione della Groenlandia Inizia la glaciazione Quaternaria Compare <i>Homo sapiens</i>
		Olocene		- 0,01	Inizia un periodo interglaciale Segni della sesta grande estinzione	

Il **periodo Paleogene** inizia a - 66 Ma e termina a - 23 Ma, con una durata di 43 milioni di anni e include tre epoche: *Paleocene*, *Eocene*, *Oligocene*. A partire da questo periodo grazie al "poco" tempo trascorso (geologicamente parlando) le rocce risultano meno alterate, molte formazioni del Paleogene non sono nemmeno veramente litificate e sono "depositi" piuttosto che rocce.

Per oltre 100 milioni di anni i mammiferi hanno coesistito con i dinosauri, ma i reperti fossili indicano che durante tutto questo periodo di tempo i mammiferi non erano né diversificati né abbondanti. Perfino durante il tardo Cretacico, alla fine della "età dei rettili", esistevano solo poche famiglie di mammiferi. Questa situazione cambia drasticamente dopo l'evento di estinzione di massa alla fine del periodo Cretacico, che elimina i dinosauri e molti dei loro parenti e crea numerose opportunità di adattamento per i mammiferi.

Paleocene

La prima epoca dell'era Cenozoica e del periodo Paleogene dura 10 milioni di anni, da - 66 Ma a - 56 Ma. Le conseguenze del precedente disastro hanno lasciato evidenze che permangono ai giorni nostri: prendendo come riferimento lo strato di rocce che definisce il limite K-Pg "... *pochi centimetri sotto, negli strati immediatamente più antichi, ci sono i resti del mondo dei dinosauri: mangiatori di piante come il piccolo *Leptoceratops*, il *Pachycephalosaurus* con il suo cranio a cupola, o lo sdentato *Ornithomimus*; e il *Tyrannosaurus* loro predatore ... Qualche centimetro sopra lo strato di iridio troviamo una variegata collezione di mammiferi medio-piccoli che si nutrivano di radici, tuberi e insetti. Accanto a loro qualche coccodrillo, forse una tartaruga. Almeno i tre quarti di tutte le specie di piante e animali, e tutti i dinosauri a parte un limitato gruppo di uccelli, sono spariti e al loro posto sono comparsi nuovi organismi" [289].*



Il nostro orologio segna le 23:39 e mancano solamente 21 minuti alla mezzanotte. Il clima è tropicale e subtropicale, addirittura temperato ai poli. I continenti derivati dalla frammentazione di Pangea, tolte le differenze causate dalle variazioni del livello del mare, hanno il profilo odierno e si vanno sempre più avvicinando alle posizioni attuali, se si escludono l'Australia, che solo nell'Eocene si stacca dall'Antartide, e l'India, che deve spostarsi ancora molto per raggiungere l'Eurasia. Nell'America settentrionale il sollevamento delle Montagne Rocciose, iniziato nel Cretacico, continua per tutto il Paleocene e determina il

declino della via marittima interna del Cretacico, che si estende dal Golfo del Messico all'Oceano Artico.

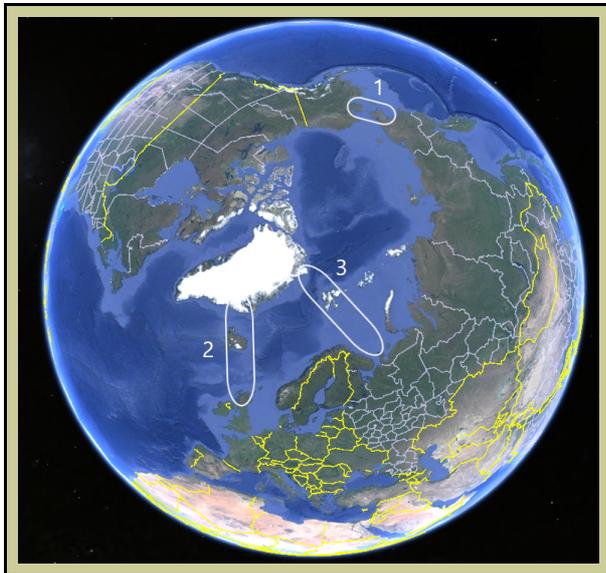
Ma non basta, nel determinare la distribuzione della fauna e della flora e la loro evoluzione – con specie che si sono spostate da un continente all'altro o, all'opposto, sono rimaste confinate in uno specifico continente – ha avuto un ruolo importante la dinamica terrestre, con i collegamenti tra i continenti che si ritiene possano essere sorti, molti dei quali proprio nel Paleocene [290]:

→ la via Beringia, che collega il Nord America e l'Asia orientale tra 65,5 e 58 milioni di anni fa;

[289] Thomas Halliday (2023), cap. 6.

[290] Brikiatis, L. (2014), *The De Geer, Thulean and Beringia routes: key concepts for understanding early Cenozoic biogeography*. J. Biogeogr., 41: 1036-1054. <https://doi.org/10.1111/jbi.12310>. | PDF | <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jbi.12310>

- la via Thuleana, che collega il Nord America e l'Europa occidentale attraverso la Groenlandia tra 57 e 55,8 milioni di anni fa;
- la via De Geer, che collega la Groenlandia e la Scandinavia tra 71 a 63 milioni di anni fa;
- la via Turgai che collega l'Europa con l'Asia, che nel paleocene sono completamente separate da un mare epicontinentale ^[291] che si estende dalla Tetide all'Oceano Artico bloccando lo scambio



ella fauna tra Europa e Asia, ed è riportato nella cartina al capitolo Oligocene.

Anche se per la reale distribuzione dei continenti all'epoca si rimanda alla carta riportata nel lavoro citato sopra (Brikiatis, 2014) la proiezione delle vie sulla Terra attuale nell'immagine a fianco fornisce l'idea di come – con i continenti allora molto più vicini tra loro in quanto l'Atlantico settentrionale si era appena aperto e la Groenlandia era vicinissima alla piattaforma europea – sia stata possibile nel Paleocene l'emersione di collegamenti attraverso mari poco profondi: 1 la via Beringia, 2 la via Thuleana, 3 la via De Geer.

Nel mare sono sempre presenti brachiopodi, echinodermi, molluschi. I pesci sono documentati da fossili di specie, anche se ora estinte, come *Eekaulostomus cuevasae*, *Kelemejtubus castroi*, *Paleoserranus lakamhae* ^[292]. Ma l'estinzione ha colpito poco i pesci, forse non più del 12% delle specie è andato perduto, meno ancora sono stati colpiti squali e razze e la scomparsa dei grandi rettili marini ha lasciato largo spazio ai teleostei, i pesci ossei della classe degli *attinopterigi*, i "ray-finned fish" così denominati per la presenza di raggi nelle pinne, che hanno sviluppato anche la vescica natatoria, il cui successo è provato dal fatto che oggi rappresentano circa un terzo di tutti i vertebrati ^[293].

Sulla terraferma circa trentamila anni dopo il disastro le felci hanno iniziato a ripopolare la flora, che inizialmente è stata ridotta praticamente ai licheni (le associazioni simbiotiche tra funghi e alghe) e alla briofite, come i muschi, riportando l'orologio della flora indietro di centinaia di milioni di anni: ma ben presto il clima tropicale e subtropicale ne favorisce il ripristino. Dall'aumento delle piogge traggono vantaggio le angiosperme e gli insetti impollinatori che con esse si sono coevoluti. Ben presto ricompaiono le conifere, le cupressacee, le sequoie.

I membri ancestrali di molti ordini e famiglie di uccelli viventi come gufi, falchi, anatre, pinguini e avvoltoi si evolvono nel Paleogene.

[291] Un corpo d'acqua salata di grande estensione e bassa profondità che giace su una piattaforma continentale.

[292] Cantalice Kleyton & Martínez Melo Alejandra & Romero Mayen Violeta. (2019). *The paleoichthyofauna housed in the Colección Nacional de Paleontología of Universidad Nacional Autónoma de México*. *Zoosystematics and Evolution*. 95. 429-452. 10.3897/zse.95.35435. | PDF | <https://www.researchgate.net/publication/335475159>

[293] Sibert EC, Norris RD. *New Age of Fishes initiated by the Cretaceous-Paleogene mass extinction*. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2015 Jul 14;112(28):8537-42. doi: 10.1073/pnas.1504985112. Epub 2015 Jun 29. PMID: 26124114; PMCID: PMC4507219. | PDF |



Nell'immagine reperti del Paleocene, in alto a sinistra scheletro del mammifero *Sinonyx jiashanensis* [294], a destra fossile del coccodrilliforme *Borealosuchus wilsoni* [295], in basso a sinistra fossile di rametti di *Metasequoia occidentalis* [296] e a destra fossile del dermattero (le attuali "forcine") *Forficula paleocaenica* [297].

Estinti i dinosauri, sulla terraferma iniziano ad affermarsi i mammiferi. I fossili mostrano che entro circa 10 milioni di anni dall'estinzione del Cretacico, al termine del Paleocene, la Terra era popolata da circa 130 generi, lo stesso numero che si ottiene sommando tutti i generi di mammiferi comparsi prima di allora:

"... l'età dei mammiferi iniziò nell'epoca del Paleocene, l'intervallo di 10 milioni di anni immediatamente successivo all'estinzione di massa del Cretaceo-Paleogene. Il rapido cambiamento apparentemente negli ecomorfi dei mammiferi da forme piccole, in gran parte insettivore, a molti taxa diversi, di corporatura da piccola a grande, ha spinto a ipotizzare che la fine del Cretaceo abbia annunciato una radiazione adattativa nell'evoluzione dei mammiferi placentati. Tuttavia, le affinità della maggior parte dei mammiferi del Paleocene sono rimaste irrisolte, nonostante i

[294] Ghedoghedo, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sinonyx_jiashanensis_7.JPG

[295] Smokeybjb, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Borealosuchus_wilsoni_1.jpg

[296] Georgialh, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metasequoia_occidentalis.jpg

[297] Rene Sylvestersen, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

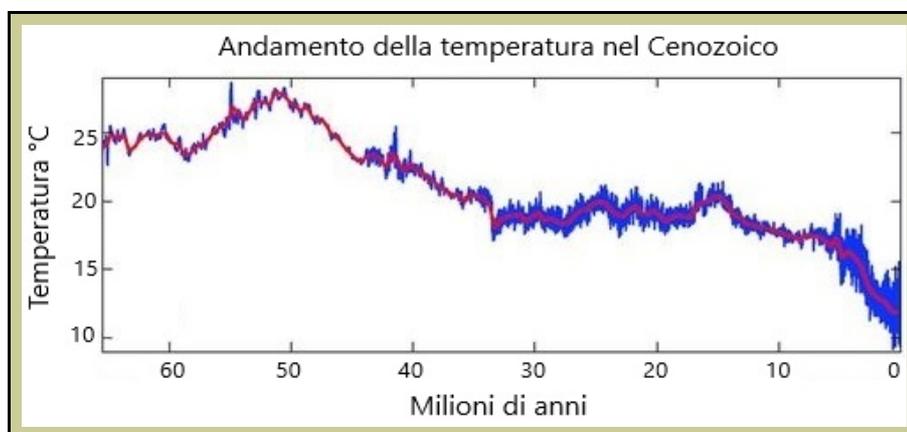
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Forficula_paleocaenica_Fur_Formation.jpg

significativi progressi nella comprensione delle relazioni degli ordini esistenti, ostacolando gli sforzi per ricostruire in modo robusto l'origine e l'evoluzione iniziale dei mammiferi placentati" [298].

In realtà "... il lungo viaggio dal terapside al mammifero era iniziato nel Triassico inferiore, con alcuni cinodonti come il *Thrinaxodon* [che] mostrava già una straordinaria affinità con i mammiferi ... [ma] il passaggio dai cinodonti ai mammiferi fu un processo lungo, che interessò diverse famiglie di terapsidi. Nel tardo Triassico vi erano già alcuni animali indistinguibili dai mammiferi sotto tutti gli aspetti più importanti. Erano minuscoli (il *Kuehneotherium* e il *Morganucodon* erano grandi non più di un toporagno, e lunghi al massimo dieci centimetri) ... soltanto nell'epoca dei dinosauri comparvero almeno venticinque diversi gruppi di mammiferi ... Quando i dinosauri si estinsero rimanevano solo quattro di quelle venticinque linee evolutive: tutte le altre si erano estinte. I sopravvissuti erano i monotremi vivipari, i marsupiali, i mammiferi placentati e i multituberculati..." [299]. I *multituberculati* sono un ordine di mammiferi con un aspetto simile ai roditori, ma si sono estinti. I *monotremi*, che depongono uova ma allattano i piccoli, sono presenti solo in Australia, e sono rappresentati solamente da echidna e ornitorinco. I *marsupiali* sviluppano i piccoli internamente ma li partoriscono quando solo poco più che embrioni e li allattano e li fanno crescere all'interno del marsupio. I *placentati* sviluppano i piccoli internamente e, se si esclude il guscio, proteggono gli embrioni all'interno dell'utero con le stesse membrane dell'uovo fino a quando il feto è in grado di sopravvivere autonomamente all'esterno, ovviamente con il supporto delle cure parentali, tipicamente l'allattamento.

Eocene

La seconda epoca dell'era Cenozoica e del periodo Paleogene dura 22 milioni di anni, da - 56 Ma a - 34 Ma. Attorno a - 53 Ma viene raggiunto il picco massimo di temperatura terrestre [300]



[298] Halliday TJ, Upchurch P, Goswami A. *Resolving the relationships of Paleocene placental mammals*. Biol Rev Camb Philos Soc. 2017 Feb;92(1):521-550. doi: 10.1111/brv.12242. Epub 2015 Dec 21. PMID: 28075073; PMCID: PMC6849585. | [PDF](#) |

[299] Henry Gee (2022), cap. 8.

[300] James Hansen, Makiko Sato, Gary Russell and Pushker Kharecha. *Climate sensitivity, sea level and atmospheric carbon dioxide*. Phil. Trans. R. Soc. A. 371:0120294. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0294>. | [PDF](#) |

<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2012.0294>

Immagine: James Hansen, Makiko Sato, Gary Russell and Pushker Kharecha, CC BY 3.0

<<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cenozoic_climate.jpg

prima dell'inizio di una diminuzione della temperatura che, pur con varie oscillazioni e con un periodo nel quale sembra quasi stabilizzarsi, diminuisce progressivamente fino alla rapida caduta che porta all'epoca attuale: ne vedremo presto le conseguenze.

L'Antartide è già nella posizione attuale, ma all'inizio dell'Eocene fa caldo, con una temperatura attorno ai 25 °C e Thomas Halliday ci fornisce uno spaccato della flora e della fauna: "... dense foreste di *Nothofagus*, faggi australi. Tra loro, fitte popolazioni di conifere – araucarie, cipressi e *Phyllocladus* – abbigliate di epifite, le piante che crescono sulla superficie di altre piante ... liane e rampicanti, felci e muschi spiccano sulle complesse e vistose inflorescenze delle protee ... i pinguini sono stati tra i primi a lasciare il segno nella documentazione fossile ... il più piccolo, il *Delphinornis* ("pinguino delfino") è all'incirca delle dimensioni dei pinguini reali odierni [ma altri] come l'*Anthropornis nordenskjoeldi* ("pinguino di Nordenskjöld"), raggiungono i 165 centimetri ... le loro prede preferite sono aringhe, labridi, naselli, pesci gatto di mare e pesci dal muso affilato come *Oplegnathus*, pesci spada e *Trichiuridae*. I *Nautilus*, parenti di polpi, seppie e calamari ma provvisti di guscio, vanno su e giù nelle acque poco profonde ... ma soprattutto, le acque sono piene di merluzzi di ogni tipo. C'è abbondanza di plancton ..." [301].

Attorno a - 45 Ma l'Australia inizia a staccarsi dall'Antartide mentre l'India dopo un viaggio di migliaia di chilometri è ora arrivata in contatto con l'Eurasia sulla quale preme: inizia il sollevamento del Tibet e della catena dell'Himalaya.



Della flora rimangono tronchi fossili di antiche sequoie (a destra nell'immagine) nel Parco di Yellowstone [302].

Tra gli animali terrestri compaiono mastodontici mammiferi ungulati, erbivori, come quelli del genere *Megacerops*, che includono *Brontotherium hatcheri*, il fossile è sulla sinistra dell'immagine [303]: simile a un rinoceronte, ma con una stazza che si avvicina a quella di un elefante, alto circa 2

[301] Thomas Halliday (2023), cap. 5.

[302] James St. John, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>, da Wikimedia Commons. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fossil_redwood_tree_trunk_\(probably_Metasequoia\)_\(Sepulcher_Formation,_Eocene;_%22Petrified_Tree_%22,_Yellowstone_National_Park,_Wyoming,_USA\)_17_\(13460786654\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fossil_redwood_tree_trunk_(probably_Metasequoia)_(Sepulcher_Formation,_Eocene;_%22Petrified_Tree_%22,_Yellowstone_National_Park,_Wyoming,_USA)_17_(13460786654).jpg)

[303] Postdlf, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brontotherium_hatcheri.jpg

metri e mezzo, con un peso di oltre 3 tonnellate e con un corno a forma di V lungo una quarantina di centimetri sul muso.

Ma alcuni mammiferi terrestri ora chiudono il cerchio con il ritorno al mare: sono anfibi che si vanno evolvendo con un completo adattamento alla vita acquatica e che fondano l'ordine *Cetacea*, nell'immagine alla pagina precedente al centro fossile di *Basilosaurus isis*, il primo ad essere riconosciuto come una balena preistorica [304]. L'evoluzione complessiva sembra essersi svolta attraverso queste tappe:

"... le balene [che] entrarono in acqua e divennero semiacquatiche possono essere rappresentate dal *Pakicetus* dell'Eocene medio inferiore, che ... aveva uno scheletro modificato per nuotare ... [le] fasi dell'evoluzione delle balene dalla terraferma al mare [sono]: (A) *Elomeryx* è un modello di antenato dei mammiferi terrestri artiodattili; (B) *Pakicetus* è un archeoceto semiacquatico di 48 milioni di anni fa, incapace di udito direzionale in acqua; (C) *Maiacetus* è un nuotatore semiacquatico di 47 milioni di anni fa, che nuotava con gli arti, con mascelle e orecchie modificate per l'udito in acqua; (D) *Dorudon* è un nuotatore completamente acquatico di 37 milioni di anni fa, che si muoveva con la coda, con arti posteriori ridotti, e rappresenta un buon antenato strutturale per gli *Odontoceti* e i *Misticeti* dall'Oligocene ai cetacei moderni" [305]. *Basilosauri* simili a *Durodon* sono stati descritti di recente [306]. Nell'immagine scheletro di *Durodon atrox* [307]



[304] Mohammed ali Moussa, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wadi_Al-Hitan.jpg

[305] Pilip D. Gingerich. *Evolution of Whales from Land to Sea*. Proceedings of the American Philosophical Society Vol. 156, No. 3, September 2012. | PDF |

<https://prod.lsa.umich.edu/content/dam/paleontology-assets/paleontology-documents/1560305Gingerich.pdf>

[306] Manuel Martínez-Cáceres, Olivier Lambert, Christian De Muizon. *The anatomy and phylogenetic affinities of *Cynthiacetus peruvianus*, a large Dorudon-like basilosaurid (Cetacea, Mammalia) from the late Eocene of Peru*. *Geodiversitas*, 2017, 39 (1), pagg. 7-163.

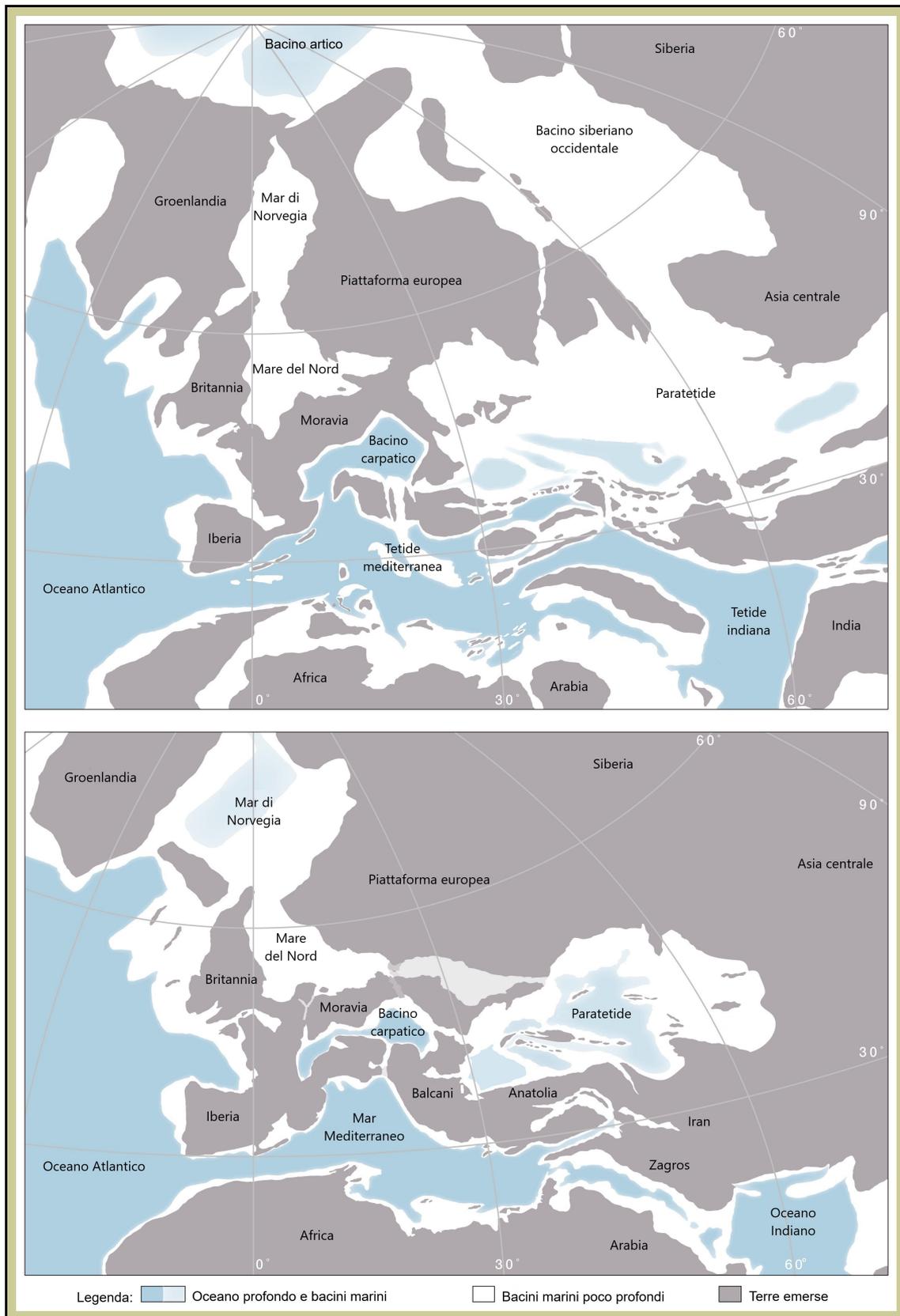
<https://www.researchgate.net/publication/316107319>

[307] Ideonex, CC BY-SA 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dorudon_atrox.jpg

Oligocene

La terza epoca dell'era Cenozoica e l'ultima del periodo Paleogene dura 11 milioni di anni da - 34 Ma a - 23 Ma.

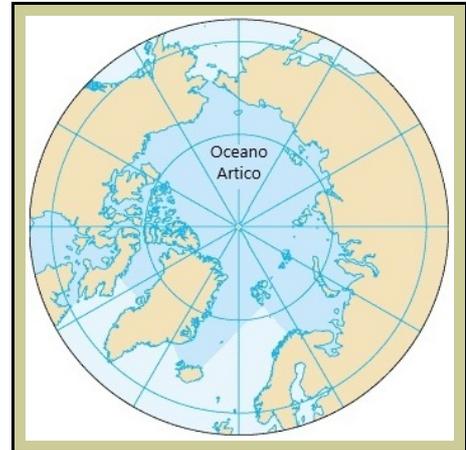


Dal massimo di temperatura dell'Eocene a - 53 Ma, dopo 19 milioni di anni, all'inizio dell'Oligocene a -34 Ma, che è anche la data ufficiale dell'inizio dell'era glaciale Tardo-Cenozoica, nella quale ancor oggi viviamo, la temperatura media sulla Terra scende di 10 °C e il cambiamento climatico influenza flora e fauna.

L'immagine riportata alla pagina precedente ^[308] aiuta a capire i cambiamenti geologici e climatici che iniziano nell'Oligocene, cambiamenti profondi che lo fanno considerare come un punto di svolta:

→ in alto la situazione nell'Eocene nell'emisfero nord, Paratetide e Bacino siberiano occidentale separano completamente l'Europa dall'Asia ^[309];

→ durante l'Oligocene (in basso) si ha la perdita della connessione tra l'Oceano Indiano e l'Oceano Artico e la chiusura della maggior parte delle altre connessioni marittime dell'Eocene ^[310].



L'Oceano artico è circondato dalle terre emerse (nell'immagine la situazione attuale) ^[311] e le correnti marine calde non riescono più a raggiungerlo: il calo della temperatura media sulla Terra, sei mesi annuali di irraggiamento solare assente o minimo e la ridotta incidenza dei raggi solari nei mesi rimanenti dovuti alla latitudine fanno il resto, innescando il processo che porta alla formazione della banchisa (il "pack") e della calotta glaciale artica che si estende alla Groenlandia.

Nel frattempo nell'emisfero sud il distacco dall'Antartide del Sud America, che fa aprire tra la Patagonia e la Penisola antartica il passaggio di Drake, e l'allontanamento dall'Antartide dell'Australia lasciano spazio a una corrente marina permanente, la corrente circumpolare antartica, che circonda completamente l'Antartide ed è l'unica corrente oceanica che circola intorno all'intero globo. L'Antartide ora è completamente isolata, anche dalle correnti marine calde, da tempo si sta raffreddando seguendo l'andamento della temperatura terrestre e come nel caso dell'Oceano Artico le condizioni determinate dalla estrema latitudine accelerano il processo di raffreddamento. A metà dell'Oligocene attorno a - 28 Ma inizia la formazione del primo ghiaccio che a - 14 Ma forma la calotta glaciale che vediamo oggi ^[312] e la banchisa che in molte zone si estende dal continente all'oceano circostante.

[308] Figura adattata da: Dan.palcu, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dire_Straits_FIG_01.jpg

[309] Da notare che proprio in mari caldi e poco profondi come questi si realizzano le condizioni di anossia che portano alla formazione di gas e petrolio, e che queste aree coincidono con giacimenti attuali dal Kazakistan alla Siberia.

[310] Palcu D. V & Krijgsman W. *The dire straits of Paratethys: gateways to the anoxic giant of Eurasia*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 523, SP523-2021–73 (2023). doi:10.1144/SP523-2021-73.

<https://www.researchgate.net/publication/356908721>

[311] Immagine modificata da: CIA, Public domain, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arctic_Ocean_-_en.png

[312] Nell'immagine alla pagina seguente: Antartide, febbraio 2020, tre foche di Weddell si riposano al sole estivo su un blocco di ghiaccio e ci osservano senza mostrare alcun timore, sullo sfondo la calotta glaciale nella Penisola antartica (foto dell'autore).



La spinta dell'India fa continuare il sollevamento del Tibet e della catena dell'Himalaya, mentre la placca africana spinge contro la placca eurasiatica e inizia il sollevamento delle Alpi. Il cambiamento climatico imprime una svolta anche alla flora e alla fauna. Le foreste tropicali e subtropicali sono progressivamente sostituite dalle foreste decidue dei climi temperati. Le angiosperme, che producono fiori e frutti e che oggi includono riso, mais e frumento, continuano la loro diffusione, mentre tra le erbe inizia a partire dal Sud America la diffusione delle graminacee.

Tra gli erbivori perissodattili, che poi comprenderanno oltre agli equini i rinoceronti, compaiono, anche se piccoli, attorno ai 60 cm di altezza, i cavalli, nell'immagine a sinistra *Mesohippus* [313], e tra gli artiodattili compaiono i *camelidi*, nell'immagine a destra *Poebrotherium* [314].



Anch'esso appartenente all'ordine dei perissodattili il *Paraceratherium transouralicum* [315], estinto, del quale vediamo qui nell'immagine a sinistra un cranio ben conservato [316], si è calcolato

[313] H. Zell, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mesohippus_01.jpg

[314] Smithsonian Institution, CC0, da Wikimedia Commons.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NMNH-USNMV15917Poebrotherium.jpg>

[315] Deng T, Lu X, Wang S, Flynn LJ, Sun D, He W, Chen S. *An Oligocene giant rhino provides insights into Paraceratherium evolution*. *Commun Biol*. 2021 Jun 17;4(1):639. doi: 10.1038/s42003-021-02170-6. PMID: 34140631; PMCID: PMC8211792. |PDF|

<https://www.researchgate.net/publication/352495260>

[316] Henry F. Osborn, Public domain, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paraceratherium_transouralicum_skull.jpg

che potesse essere alto 5 metri, lungo oltre 7 metri e pesare tra le 15 e le 20 tonnellate, numeri che lo renderebbero il più grande mammifero mai esistito, più grande non solo degli elefanti ma anche dei mammut.



Nelle foreste tropicali e subtropicali a partire dall'inizio dell'Eocene sono già comparse specie appartenenti all'ordine dei *Primate*. Tra - 29 Ma e l'inizio del Miocene (- 21 Ma) dalle *catarrine* si differenzia il ramo della scimmie del Nuovo Mondo, le *platirrine* [317]. Ma ora in pieno Oligocene abbiamo la documentazione fossile della presenza di *Aegyptopithecus zeuxis*, un catarrino precedente alla divergenza tra *ominoidi* (uomo e scimmie antropomorfe) e *cercopitecoidi* (scimmie del Vecchio Mondo), nell'immagine a destra [318].

Il **periodo Neogene** che inizia a - 23 Ma e termina a - 2,6 Ma e dura quindi poco più di 20 milioni di anni, include due epoche: Miocene e Pliocene.

Miocene

La quarta epoca dell'era Cenozoica e la prima del Neogene va da - 23 Ma a - 5,3 Ma e dura quindi quasi 18 milioni di anni.

La diminuzione della temperatura determina riduzione delle foreste e un aumento delle pianure erbose. Con la crescita che ha origine vicino alla radice, piuttosto che all'apice del tronco della pianta, le erbe a differenza degli alberi si rigenerano rapidamente e creano fonti di cibo rinnovabili per gli erbivori. Le praterie, apparse proprio all'inizio di questa epoca a circa - 23 Ma, si sviluppano rapidamente e gli animali altrettanto rapidamente si evolvono per utilizzare questo nuovo habitat. I mammiferi erbivori, sia i mammiferi ungulati con dita pari (antilopi, cervi, bovini e pecore) sia i mammiferi con dita dispari (rinoceronti e cavalli) si diversificano notevolmente. La vita dei mammiferi è caratterizzata da ulteriori stadi nello sviluppo del cavallo, dalla moltiplicazione e dall'estinzione finale degli entelodonti (parenti estinti giganti dei maiali) e dalla comparsa di

[317] Perez S & Tejedor Marcelo & Novo Nelson & Aristide Leandro. (2013). *Divergence Times and the Evolutionary Radiation of New World Monkeys (Platyrrhini, Primates): An Analysis of Fossil and Molecular Data*. PloS one. 8. e68029. 10.1371/journal.pone.0068029. | PDF | <https://www.researchgate.net/publication/245030634>

[318] Jonathan Chen, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aegyptopithecus_UMMNH.jpg

mastodonti, procioni e donnole. In questa epoca gatti, cammelli, carnivori simili a cani e rinoceronti sono comuni nel Nord America [319].

Nell'immagine, a sinistra scheletro di *Daedon*, un artiodattilo onnivoro, della famiglia degli *Entelodonti*, presenti già al termine dell'Oligocene nel Nord America ed estinti nel Miocene [320]. A destra scheletro di *Paleoparadoxia* [321], un grosso mammifero acquatico erbivoro, oggi estinto ma parente dei sirenii che oggi includono la famiglia dei trichechi e quella dei dugonghi. *Paleoparadoxia* aveva un aspetto molto simile agli attuali lamantini, che fanno parte della famiglia dei trichechi.



Fossili del Miocene assai comuni, tanto da essere noti già nell'antichità ed essere descritti da Plinio il Vecchio nella sua "*Naturalis Historia*", ma allora erroneamente ritenuti essere "lingue pietrificate" e denominati "glossopetrae", sono i denti di *Otodus megalodon* uno squalo gigante estinto, del quale però praticamente non resta altro. Nell'immagine un dente di Megalodon è messo a confronto con due denti di un attuale squalo bianco, che è lungo oltre 6 metri e che pesa 2 tonnellate, per fornire un'idea della dimensioni spropositate del proprietario, che si ritiene potesse avere facilmente la meglio anche sulle balenottere minori ("minke whale") che anche allora popolavano i mari.



potesse avere facilmente la meglio anche sulle balenottere minori ("minke whale") che anche allora popolavano i mari.

Vale la pena di ricordare che oltre a esser impiegati come monili o anche come punte di armi:

"... i denti fossili degli squali (Glossopetrae), in particolare quelli del gigante del Miocene Otodus megalodon, hanno una lunga tradizione di utilizzo come presunti preventivi, rilevatori e

neutralizzatori di veleni. I lapidari medievali affermavano che i denti montati in argento indicavano

[319] USA National Park Service. *Neogene Period - 23.0 to 2.58 MYA*.

<https://www.nps.gov/articles/000/neogene-period.htm>

[320] James St. John, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>>, da Wikimedia Commons.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dinohyus_hollandi_\(fossil_mammal\)Lower_Miocene_of_Nebraska.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dinohyus_hollandi_(fossil_mammal)Lower_Miocene_of_Nebraska.jpg)

[321] Momotarou2012, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paleoparadoxia_Skeleton.jpg

i veleni tramite sudorazione o cambiamento di colore. I pendenti di denti di squalo venivano anche utilizzati per decorare natternzungenbaum ["albero della lingua della vipera"] o languiers ["albero che sorregge le lingue"], oggetti di alto rango per la tavola, solitamente sotto forma di alberi d'oro, d'argento o di corallo ai cui rami venivano appese le "lingue di serpente". I singoli denti venivano immersi nel vino per rilevare e neutralizzare eventuali tossine presenti. Tali articoli di stoviglie venivano registrati negli inventari reali, papali e dei nobili dalla metà del XIII secolo in poi. Malta era il centro principale della produzione di glossopetra, pubblicizzandone le qualità tramite volantini. I denti di squalo erano anche un componente delle pietre di Goa alexifarmiche prodotte dai missionari gesuiti in India dalla metà del XVI secolo in poi" [322].

Cozzando contro l'Eurasia, l'Africa ha ora completamente rinchiuso e isolato l'ultimo residuo dell'oceano Tetide, preparando al termine dell'Oligocene uno spettacolo straordinario.

APPROFONDIMENTO

Gargano, Italia, Miocene – 5,33 milioni di anni fa

"Dal Levante a Gibilterra, dalle coste del Nordafrica alle Alpi, il Mediterraneo è completamente asciutto. E non è la prima volta che accade. Quando la placca tettonica sotto l'Africa e l'Arabia ha iniziato a spingere verso nord, l'oceano Tetide, una volta molto esteso, si è ridotto fino a diventare un piccolo mare chiuso tra Afro-Arabia, Asia ed Europa: il Mediterraneo. L'unico collegamento tra questo mare e gli altri oceani del pianeta è una stretta, fessura tra quelle che diventeranno la Spagna e il Marocco: lo stretto di Gibilterra. Nel corso degli ultimi milioni di anni, le diverse placche terrestri hanno periodicamente chiuso questa fessura con drammatici impatti sull'ambiente. A sud e a est, le temperature elevate e la mancanza di acqua stagnante indicano che le precipitazioni sono scarse, che la poca pioggia che cade evapora prima di raggiungere i fiumi. A nord, il quadro è più promettente, anche se non di molto. La posizione delle catene montuose europee – Sierra Nevada, Alpi e Alpi Dinariche – lascia intendere che a nord ci sia un territorio molto più vasto. La striscia che separa il mare e le montagne è stretta, un bacino che impedisce alle precipitazioni di raggiungere il Mediterraneo. È vero che alcuni grandi fiumi africani ed europei sfociano in questo mare, ma quelli di notevoli dimensioni sono pochi. Solo il Nilo, il Po e il Rodano sono degni di nota: tutti insieme scaricano nel mare circa 600.000 metri cubi d'acqua al minuto (più o meno sette volte il volume della Royal Albert Hall di Londra). La quantità complessiva di acqua dolce che si aggiunge ogni anno al Mediterraneo in una forma o nell'altra è di circa seicento chilometri cubi, o ottanta Loch Ness. Può sembrare tanto, ma il clima caldo fa evaporare l'acqua con rapidità, riducendo la portata del mare di 4 700 chilometri cubi all'anno. Il Bosforo, lo stretto passaggio che collega il Mediterraneo al mar Nero, ancora non esiste, e una striscia di terra separa il Mediterraneo dal mar Paratetide, che si estende dalla Romania all'Asia centrale. Lo squilibrio nell'afflusso di acqua può essere corretto solo da una corrente costante e incontenibile proveniente dall'Atlantico attraverso lo stretto di Gibilterra. Ma quando lo stretto è chiuso, come è successo a intervalli regolari negli ultimi 700.000 anni, al Mediterraneo bastano appena mille anni per ridursi praticamente a nulla. Tutto ciò che resta è un

[322] Christopher J. Duffin. *Fossil Sharks' Teeth as Alexipharmics. In History of Toxicology and Environmental Health, Toxicology in the Middle Ages and Renaissance*. Academic Press, 2017, Pages 125-133, ISBN 9780128095546,

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809554-6.00012-3>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128095546000123>

laghetto nella zona orientale alimentato dai fiumi che attraversano la Turchia e la Siria. L'enorme volume d'acqua che esce dal Mediterraneo provoca un aumento del livello dei mari in tutto il pianeta. Le isole diventano montagne, e i fiumi scorrono invano in laghi salati in continua evaporazione sul fondo di una vallata che in certi punti si trova quattro chilometri sotto il livello del mare. È la depressione più profonda della Terra. Scendendo nell'abisso, il peso crescente dell'atmosfera spinge verso il basso, mentre i venti si abbattono sulla scogliera. Quando una sacca d'aria si muove verso il basso, la pressione dell'aria aumenta. Come l'aria in un motore a combustione, l'aumento della pressione fa sì che la massa d'aria si ritiri e si riscaldi. La temperatura del vento sale di circa 10 °C ogni chilometro. Nonostante ci troviamo in un periodo freddo della storia della Terra, in una calda giornata d'estate la temperatura dell'aria può raggiungere gli 80 °C, 25 °C in più del valore più alto mai registrato in epoca moderna nella Valle della Morte, in California. Il fondale del bacino del Mediterraneo è di sale, in alcuni punti profondo più di tre chilometri, per un volume complessivo di oltre un milione di chilometri cubi di gesso scintillante e cloruro di sodio. A parte gli estremofili – organismi microscopici che proliferano dove nessun altro riuscirebbe – nessuno sopravvive sul fondo di questa valle mediterranea ...

A occidente, la diga è crollata. Plinio il Vecchio riporta la leggenda romana secondo cui lo stretto di Gibilterra è stato scavato nella roccia dalla spada di Ercole. Al crepuscolo del Miocene, a scavare quel canale, per una profondità di centinaia di metri e una lunghezza di centinaia di chilometri, è l'oceano. Due placche, abbracciate l'una all'altra per anni, hanno accumulato così tanta tensione che sono scivolte una sotto l'altra in parallelo. Questo movimento ha spinto verso il basso il livello dell'ampio e piatto istmo di Gibilterra, aprendo un canale di quindici chilometri di ampiezza all'intera massa d'acqua dell'Atlantico, che entra a sessanta chilometri all'ora nel Mediterraneo occidentale. Una volta rotta la diga, non è più possibile tornare indietro, e l'acqua erode un percorso sempre più profondo. Ma il bacino del Mediterraneo non ha la stessa profondità ovunque, ci sono delle barriere naturali che impediscono all'acqua di riempirlo in modo uniforme come un'enorme vasca da bagno. La piattaforma su cui si trovano Malta e la Sicilia, così come le vette degli Appennini, impediscono per il momento all'acqua di raggiungere il Mediterraneo orientale ... e riempire l'Egeo e l'Adriatico.

... vicino all'odierna città di Siracusa, si sente provenire un boato. La scarpata Sicilia-Malta è una grande diga naturale, una barriera tra i due bacini più profondi del Mediterraneo. Nella sua ampia estensione sono sparsi qua e là dei laghi-mari. Mentre l'acqua comincia a traboccare oltre la diga, il bacino orientale sarà riempito dalla più imponente cascata che la Terra abbia mai visto. Con i suoi 1500 metri di altezza, è una volta e mezzo più alta del Salto Ángel, in Venezuela. L'acqua si riversa giù dalla scarpata a una velocità superiore ai centocinquanta chilometri all'ora, e molta si trasforma in nebbiolina prima ancora di toccare terra. A differenza dello stretto di Gibilterra, dove la discesa nel bacino del Mediterraneo occidentale è graduale, questa è una vera e propria cascata, con la forza di un intero oceano incanalata in un unico sito di cinque chilometri di ampiezza. Nonostante questo diluvio incessante che alza il livello di un metro ogni due ore e mezzo, servirà più di un anno prima che il Mediterraneo orientale possa riempirsi, prima che Malta, Gozo e la Sicilia vengano finalmente isolate dall'Africa e dall'Italia ...

... Ancora oggi il Mediterraneo è un mare quasi chiuso, dipendente per il suo riempimento dalle costanti attenzioni dell'Atlantico. Se gli stretti dovessero richiudersi per almeno un millennio, il Mediterraneo si prosciugherebbe di nuovo ...

Con l'Africa che continua a spingere verso nord, è molto probabile che la chiusura totale degli stretti si verificherà naturalmente nel corso dei prossimi milioni di anni ... Il riempimento del

Mediterraneo avvenuto 5,33 milioni di anni fa, e noto come alluvione zancleana, ha segnato la fine del Miocene e l'inizio di una nuova epoca: il Pliocene" [323].

Ma c'è dell'altro:

"Nel Miocene, il Vecchio Mondo si era ormai trasformato nel Pianeta delle scimmie. Le sempre più rade chiazze di foresta e le terre circostanti risuonavano dei loro fischi e dei loro richiami. In Grecia regnava l'Ouranopithecus, in Turchia l'Ankarapithecus. Il Dryopithecus controllava l'Europa centrale; il Proconsul, il Kenyapithecus e il Chororapithecus (un parente del quale si sarebbe poi evoluto nel gorilla) si aggiravano per l'Africa.

Nelle foreste della Cina c'era il Lufengpithecus; nell'Asia meridionale il Sivapithecus, i cui parenti si sarebbero infine trasferiti nelle ultime giungle per poi diventare, tramite il Khoratpithecus⁶ della Thailandia, oranghi ... Nel frattempo, la Terra continuava a raffreddarsi. La superficie delle foreste si ridusse ulteriormente, spingendo la maggior parte delle scimmie che ancora vi abitavano a rifugiarsi nelle giungle più profonde dell'Africa centrale e del Sud-est asiatico. Alle altre scimmie non restavano che due alternative: o la cacciata definitiva dall'Eden, o l'estinzione. Quelle che furono costrette a scappare si portarono dietro poche cose, a parte la tendenza a deambulare stando



in piedi sulle zampe posteriori. Sette milioni di anni fa i discendenti delle specie cacciate dall'Eden erano già diventati più bravi a camminare che ad arrampicarsi. Il clima fresco aveva trasformato le scimmie in scimmie antropomorfe, e le scimmie antropomorfe in qualcosa di ancora diverso ... Camminare eretti per abitudine invece che solo di tanto in tanto è il più antico marchio di fabbrica degli ominini, la stirpe umana. I primi ominini comparvero nel tardo Miocene, circa sette milioni di anni fa. Tra questi c'era il Sahelanthropus tchadensis che viveva sulle rive del Lago Ciad, in Africa occidentale. Il Sahelanthropus, però, non era solo. Circa cinque milioni di anni fa, in Africa orientale vivevano altri bipedi come l'Ardipithecus kadabba dell'Etiopia e l'Orrorin tugenensis del Kenya. La locomozione eretta dei primati, come molte altre innovazioni nella preistoria umana, ha avuto inizio in Africa" [324]. Nell'immagine cranio di Proconsul [325]: vissuto nel Miocene tra i - 21 e - 17 Ma si ritiene sia uno dei primati ancestrali di scimmie antropomorfe e uomo.

Pliocene

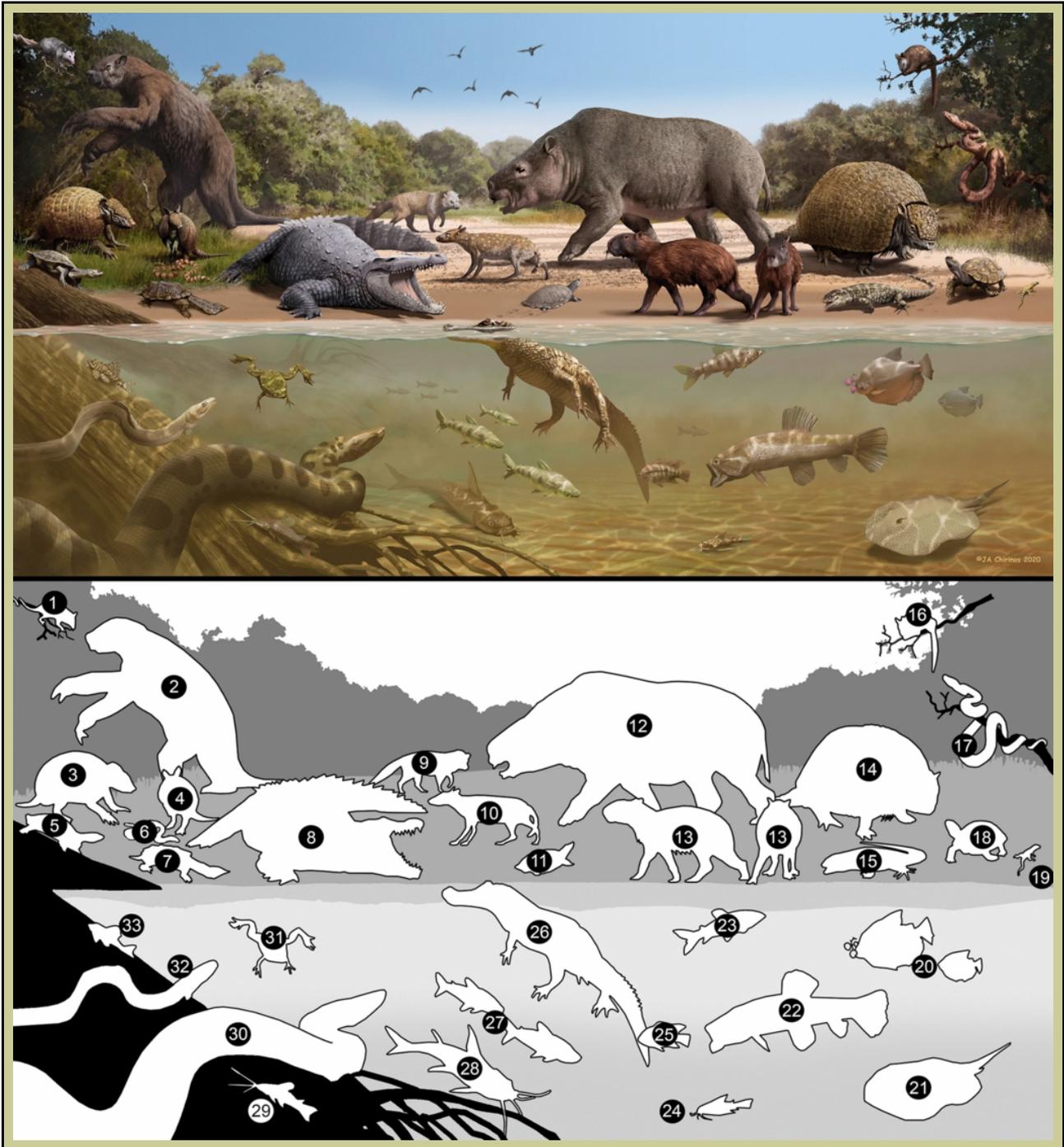
La quinta epoca dell'era Cenozoica e la seconda e ultima del Neogene va da - 5,3 Ma a - 2,6 Ma e dura 2,7 milioni di anni. Il clima diventa più freddo, più secco e più stagionale. E alle diverse latitudini corrispondono zone climatiche differenziate, simili alle attuali.

[323] Thomas Halliday (2023), cap. 3.

[324] Henry Gee (2022), cap. 9.

[325] Ryan Schwark, CC0, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Proconsul_skull_at_AMNH.jpg



Nell'immagine: 1) cf. *Didelphis* sp. (2) cf. †*Proeremotherium* sp. (3) aff. †*Holmesina floridanus*. (4) †*Pliodasypus vergelianus*. (5) *Podocnemididae* indet. (6) *Anilius scytale*. (7) *Chelus* sp. (8) †*Crocodylus falconensis*. (9) †*Cyonasua* sp. (10) †*Interatheriidae* indet. (11) *Podocnemididae* indet. (12) †*Falcontoxodon* sp. (13) †? *Hydrochoeropsis wayuu*. (14) aff. †*Boreostemma* sp. (15) *Tupinambis* s.l. (16) †*Marisela gregoriana*. (17) *Corallus* sp. (18) *Chelonoidis* sp. (19) Lizard. (20) *Mylossoma* sp. (21) *Potamotrygon* sp. (22) *Hoplias* sp. (23) *Schizodon* cf. *S. corti*. (24) cf. *Amblydoras* sp. (25) *Cichlidae* indet. (26) *Caimaninae* indet. (27) cf. *Megaleporinus* sp. (28) cf. *Sciades* sp. (29) *Callichthyidae* indet. (30) *Eunectes* sp. (31) cf. *Pipa* sp. (32) *Synbranchus* sp. (33) Suckermouth catfish (*Hypostominae*).

Alle latitudini intermedie, al di fuori delle foreste tropicali ormai limitate alla stretta fascia equatoriale, ci sono foreste decidue e foreste di conifere, ci sono estese praterie, e laddove il clima si fa più secco compaiono savane e deserti, la fauna è essenzialmente moderna anche se le specie devono ancora evolversi nelle specie attuali. Ben diverse le situazioni estreme non solo dell'Antartide, oramai completamente ricoperta dai ghiacci, ma anche della Groenlandia, che tra - 2,9 e - 2,6 Ma viene anch'essa ricoperta dalla calotta glaciale artica.

Nel Venezuela, che invece si trova nella fascia equatoriale, la formazione San Gregorio contiene fossili che confermano un clima tropicale simile all'attuale, con qualche estinzione ma anche molti generi che sono arrivati fino a noi [326] (vedere l'immagine alla pagina precedente).

Testimonianze fossili documentano la presenza a - 4,1 Ma di *Australopithecus anamensis*, considerata la specie più antica di *Australopithecus* [327]. Una testimonianza molto nota dopo quasi un milione di anni dopo è rappresentata da "Lucy", lo scheletro di un (anzi di una) *Australopithecus afarensis* risalente a - 3,2 Ma, riportato nell'immagine a fianco [328], del quale ci sono pervenute 47 di 207 ossa che comunque ne hanno consentito uno studio e una ricostruzione adeguata [329].

Poco dopo Lucy compare *Australopithecus africanus* e un'analisi comparativa delle tre specie rileva che:

"*A. anamensis* (3,5-4,1 Ma) è il più primitivo con una sinfisi fortemente inclinata, grandi radici canine, ecc., *A. afarensis* (3,0-3,6 Ma) è meno primitivo e *A. africanus* (2,6-3,0 Ma) condivide molte caratteristiche derivate con i primi *Homo* (ad esempio, cervello espanso, canini ridotti, terzo premolare inferiore bicuspidato, prognatismo ridotto, maggiore flessione della base cranica, ATM [articolazione temporo-mandibolare] più profonda)" [330].



[326] Carrillo-Briceño J.D., Sánchez R., Scheyer T.M. et al. *A Pliocene–Pleistocene continental biota from Venezuela*. *Swiss J Palaeontol* 140, 9 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13358-020-00216-6>. | PDF |

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8550326/>

[327] Leakey MG, Feibel CS, McDougall I, Ward C, Walker A. *New specimens and confirmation of an early age for Australopithecus anamensis*. *Nature*. 1998 May 7;393(6680):62-6. doi: 10.1038/29972. PMID: 9590689.

<https://www.nature.com/articles/29972>

[328] 120, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lucy_blackbg.jpg

[329] Schrein, C. M. (2015) *Lucy: A marvelous specimen*. *Nature Education Knowledge* 6(7):2

<https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/lucy-a-marvelous-specimen-135716086/>

[330] McHenry HM, Berger LR. *Body proportions of Australopithecus afarensis and A. africanus and the origin of the genus Homo*. *J Hum Evol*. 1998 Jul;35(1):1-22. doi: 10.1006/jhev.1997.0197. PMID: 9680464.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9680464/>

Dal genere *Australopithecus* si arriva nel Pliocene, la prima era del periodo Quaternario, ai primi rappresentanti del genere *Homo* e la relazione tra i due che oggi appare abbastanza accettata è quella qui riportata:

"Il genere *Australopithecus* [estinto] è una raccolta di specie di ominidi che abbracciano un periodo di tempo che va da 4,18 a circa 2 milioni di anni fa. Gli *Australopitechi* erano animali terrestri bipedi simili a scimmie antropomorfe che avevano grandi denti masticatori con spesse calotte di smalto, ma i cui cervelli erano solo leggermente più grandi di quelli delle grandi scimmie. Sono i parenti più prossimi conosciuti del nostro genere *Homo* e molto probabilmente ci siamo evoluti da una specie che faceva parte di questa radiazione adattativa" [331].

La formazione dell'istmo di Panama attorno a - 3 Ma permette agli animali di spostarsi tra il Nord America e il Sud America e determina quello che è stato definito come il grande scambio americano (Great American Biotic Interchange). Animali di origine sudamericana come bradipi terricoli, armadilli, gliptodonti (superficialmente simili agli armadilli), istrici e capibara (grandi roditori) appaiono per la prima volta in Nord America, e forme nordamericane come lama e tapiri entrano per la prima volta in Sud America.

Il **periodo Quaternario** inizia a - 2,6 Ma e continua ai giorni nostri e include due epoche: Pleistocene e Olocene.

Pleistocene

La sesta epoca dell'era Cenozoica e la prima del periodo Quaternario va da - 2,6 Ma a - 11,7 ka (o se si preferisce 11 700 anni), occupa quindi sostanzialmente tutti i 2,6 milioni di anni del Quaternario.



Mrs. Ples, nell'immagine a sinistra [332], è un (anzi una) *Australopithecus africanus* adulto il cui cranio fossile è datato a - 2,1 Ma. La capacità cranica è di soli 485 cm³ ma è stato uno dei primi fossili a rivelare che la camminata eretta si era evoluta ben prima di qualsiasi crescita significativa delle dimensioni del cervello.

[331] Ward C. V. & Hammond A. S. (2016). *Australopithecus and Kin*. Nature Education Knowledge 7(3):1 <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/australopithecus-and-kin-145077614/>

[332] Ditsong National Museum of Natural History, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, da Wikimedia Commons.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mrs_Ples.jpg

Nell'immagine a destra un cranio fossile di *Homo habilis*: la specie, anch'essa estinta, viveva in Africa a - 2,4-1,5 Ma e aveva una capacità cranica media un poco superiore di 616 cm³ [333].

L'evoluzione sta continuando e compare *Homo sapiens* quando il nostro orologio segna le 23:59:53, mancano 7 secondi alla mezzanotte.:

"*Homo erectus* che compare attorno a - 1,9 Ma in Africa e si diffonde in Cina, Java ed Europa centrale. *H. erectus* ha un cervello di dimensioni tra 830 e 1 100 cm³, è alto fino a 1,6 metri e vi sono chiare evidenze che questa antica specie umana avesse insediamenti semi-permanenti una struttura tribale di base, usava il fuoco per cuocere i cibi, e costruiva attrezzi e armi da pietre e ossa.

Gli umani moderni, *H. sapiens*, sono comparsi forse 400 000 anni fa, in Africa, e si sono evoluti da *H. erectus*. Sembra che tutti gli umani moderni si siano evoluti a partire da un singolo antenato Africano, e che *H. erectus* in Asia e in Europa si sia estinto. *H. sapiens* si è diffuso in Medio Oriente ed Europa ... La storia in Europa è particolarmente ben conosciuta e include una fase, da 90 000 a 30 000 anni fa, nella quale Neanderthal occuparono la maggior parte dell'Europa dalla Russia alla Spagna e dalla Turchia all'Inghilterra del sud. I Neanderthal avevano cervelli capienti (in media 1 400 cm³), un'arcata sopraccigliare prominente [toro sopraorbitario] e una corporatura robusta e potente ... alcuni paleoantropologi li considerano una specie a se stante, *Homo neanderthalensis* ... scomparvero con la ritirata al nord dei ghiacci, e la nuova onda di colonizzazione dal Medio Oriente portò alla diffusione di *H. sapiens* nel resto del mondo prima di 40 000 anni fa" [334].



Nello schema alla pagina seguente [335] è riportata la tassonomia seguita da quando le "... prove schiacciante fornite dalla genetica hanno dimostrato che gli umani, gli scimpanzé e i gorilla sono molto più strettamente imparentati tra loro che con l'orango... Quindi, non c'è alcuna ragione genetica per raggruppare le grandi scimmie in un gruppo distinto dagli umani. Per questo motivo, molti ricercatori ora collocano tutte le specie di grandi scimmie e umani in un'unica famiglia, *Hominidae*, rendendoli tutti veri e propri "ominidi" "[336]

[333] John Hawks, Marina Elliott, Peter Schmid, Steven E Churchill, Darryl J de Ruiter, Eric M Roberts, Hannah Hilbert-Wolf, Heather M Garvin, Scott A Williams, Lucas K Delezenne, Elen M Feuerriegel, Patrick Randolph-Quinney, Tracy L Kivell, Myra F Laird, Gaokgathe Tawane, Jeremy M DeSilva, Shara E Bailey, Juliet K Brophy, Marc R Meyer, Matthew M Skinner, Matthew W Tocheri, Caroline VanSickle, Christopher S Walker, Timothy L Campbell, Brian Kuhn, Ashley Kruger, Steven Tucker, Alia Gurtov, Nompumelelo Hlophe, Rick Hunter, Hannah Morris, Becca Peixotto, Maropeng Ramalepa, Dirk van Rooyen, Mathabela Tsikoane, Pedro Boshoff, Paul HGM Dirks, Lee R Berger (2017). *New fossil remains of Homo naledi from the Lesedi Chamber, South Africa*. eLife 6:e24232. | PDF |

<https://elifesciences.org/articles/24232>

Immagine: CC BY 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>, via Wikimedia Commons.

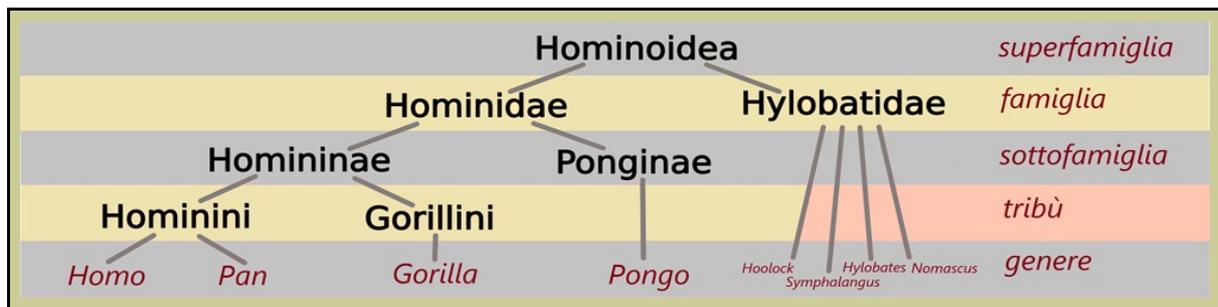
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KNM_ER_1813_\(H._habilis\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KNM_ER_1813_(H._habilis).png)

[334] Michael J. Benton, David A. T. Harper (2020), pagg. 532-535.

[335] Modificato da: Rursus, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, da Wikimedia Commons.

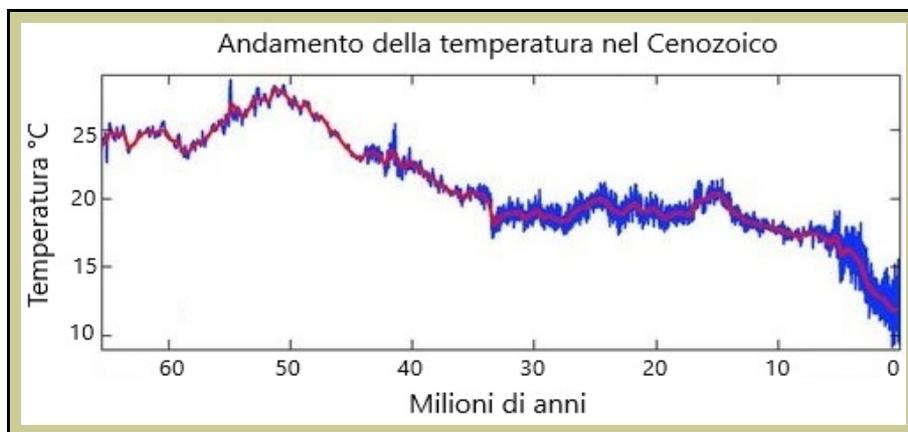
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hominoid_taxonomy_7.svg

[336] McNulty, K. P. (2016). *Hominin Taxonomy and Phylogeny: What's In A Name?*. Nature Education Knowledge. 7 (1): 2.



Le *Hylobatidae* nel loro insieme sono note come "gibboni" anche se tali sono solamente gli ultimi due generi. Il genere *Pongo* comprende tre specie di oranghi. Il genere *Australopithecus* non è riportato in quanto estinto, ma dovrebbe trovarsi nella tribù *Hominini* accanto agli appartenenti al genere *Homo* (una sola specie) e al genere *Pan* (scimpanzè e bonobo).

Se riprendiamo l'andamento del clima già visto in precedenza [337]



notiamo che già dal Pliocene (- 5,3 Ma) è iniziata una nuova discesa della temperatura di cui vediamo le conseguenze.

Siamo nella quinta delle ere glaciali che si sono susseguite nella storia della Terra [338], a - 34 Ma è iniziata infatti l'**era glaciale Tardo Cenozoica** nella quale si sono succedute tre glaciazioni:

- tra - 28 e - 14 Ma la glaciazione dell'*Antartide*, a cavallo tra Oligocene e Miocene;
- tra - 2,9 e - 2,6 Ma la glaciazione della *Groenlandia*, nel Pliocene;
- tra - 2,6 Ma e il giorno d'oggi la glaciazione *Quaternaria*, nel Pleistocene.

Dopo la formazione della calotta glaciale antartica si ha la formazione della calotta glaciale artica: "*... la calotta glaciale della Groenlandia è riconosciuta come un fattore chiave nel controllo dello "scenario glaciale" del Quaternario ... la chiusura definitiva dell'istmo di Panama ha indotto un aumento del trasporto di sale e calore verso i poli. Il rafforzamento associato della circolazione termoalina del Nord Atlantico e, a sua volta, un'intensificazione dell'apporto di umidità alle alte latitudini settentrionali hanno portato all'accumulo di ghiaccio nell'emisfero nord, culminando infine nel grande e irreversibile crollo climatico...*" a circa 2,7 Ma [339].

[337] I riferimenti completi sono riportati al paragrafo *Eocene*.

[338] Vedere l'approfondimento *Ere glaciali e glaciazioni* al cap. 4.

Al crollo climatico della fine del Pliocene segue quindi la glaciazione *Quaternaria* che, come tutte le altre, non è un evento continuo e ininterrotto ma un evento nel quale abbiamo l'alternanza di *periodi glaciali* e *periodi interglaciali*. Le differenze di latitudine determinano conseguenze e durate diverse, con denominazioni differenti, qui si ricorda semplicemente che:

→ nelle Alpi si applica la suddivisione della glaciazione Quaternaria in quattro periodi glaciali denominati *Günz* (676 000-621 000 anni), *Mindel* (374 000-337 000 anni), *Riss* (191 000-130 000 anni), *Würm* (29 000-11 700 anni) inframmezzati da tre periodi interglaciali;

→ nel nord Europa si applica la divisione della glaciazione Quaternaria in tre periodi glaciali denominati *Saale*, *Elster* e *Weichsel* [Vistola], dai nomi di questi tre fiumi, inframmezzati da due periodi interglaciali.

"All'epoca del periodo glaciale più recente, che raggiunse il suo apice circa 25.000 anni fa, gli esseri umani abitavano le pianure della Beringia e, procedendo lungo le coste meridionali dell'Alaska, dove il ghiaccio era più raro, entrarono in questo nuovo continente ricco di risorse ... In questo momento del Pleistocene [20 000 anni fa] ... i cammelli arrivano fino in California ... [e] i primi esseri umani sono già arrivati nelle Americhe ... Con l'aumento della loro popolazione, questi primi americani iniziarono a cacciare sia i cammelli nativi sia i cavalli. Il risultato, come è successo a molti grandi mammiferi del Pleistocene, è stata l'estinzione di questi animali ... Con il cambiamento climatico, e una penetrazione umana sempre più stabile nel continente, molte [altre] specie native non sopravviveranno a lungo, spazzate via dal progressivo riscaldamento del loro ambiente e da questi nuovi e versatili predatori" [340].

Olocene

La settima epoca dell'era Cenozoica e la seconda del periodo Quaternario va da 11 700 anni fa a oggi. Essendo l'ultimo periodo glaciale Weichsel (Würm) terminato 11 700 anni fa – cioè alla data alla quale si fa iniziare l'epoca geologica attuale – ci troviamo attualmente in un periodo interglaciale all'interno della glaciazione Quaternaria dell'era glaciale Tardo Cenozoica. La sesta grande estinzione è in corso, ad opera dell'uomo.

RIASSUMENDO

Nel *Cenozoico* - la terza e ultima era dell'eone **Fanerozoico**, nella quale viviamo – nell'arco di 66 milioni di anni:

→ si ha una fase iniziale di temperature elevate, le foreste tropicali raggiungono l'Antartide, quindi dopo un picco di temperatura inizia una sua progressiva riduzione;

→ si espandono i mammiferi e compaiono i primati;

→ iniziano i fenomeni orogenetici che portano progressivamente alla formazione dell'Himalaya, delle Alpi e della altre grandi catene montuose;

[339] G. Bartoli, M. Sarnthein, M. Weinelt, H. Erlenkeuser, D. Garbe-Schönberg, D.W. Lea. *Final closure of Panama and the onset of northern hemisphere glaciation*. Earth and Planetary Science Letters. Volume 237, Issues 1–2, 2005, Pages 33-44, ISSN 0012-821X. | [PDF](#) |

<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.020>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X05004048>

[340] *Halliday, Thomas. I mondi di ieri. Alle origini della Terra, cap.1.*

- l'espandersi delle praterie conseguente al clima più fresco favorisce la diffusione degli erbivori, le foreste tropicali si ritirano fino alla fascia equatoriale, mentre alle latitudini intermedie subentrano conifere e piante a foglie caduche;
 - inizia l'era glaciale Tardo-Cenozoica che continua tuttora in un alternarsi di periodi glaciali e di periodi interglaciali;
 - il Mare Mediterraneo si prosciuga e si riempie di nuovo attraverso lo stretto di Gibilterra;
 - compaiono Hominidae e Hominini, compare la specie Homo sapiens.
-

EPILOGO

"Lontano, nei dimenticati spazi non segnati nelle carte geografiche dell'estremo limite della Spirale Ovest della Galassia, c'è un piccolo e insignificante sole giallo..."

(Douglas Adams)

Alla fine nonostante la mia contrarietà allo "storytelling" riportata all'inizio, quello che ho ricavato dalle mie ricerche è di fatto un racconto. Ma si tratta di un racconto basato su evidenze, su ipotesi e modelli, su congetture e confutazioni, insomma sugli strumenti della scienza ^[341], liberato sia dall'esigenza della creazione sia da maghi e fattucchiere, da draghi e unicorni, e ispirato a un principio così bene espresso da Primo Levi:

"Poiché è difficile distinguere i profeti veri dai falsi, è bene avere in sospetto tutti i profeti; è meglio rinunciare alle verità rivelate, anche se ci esaltano per la loro semplicità e il loro splendore, anche se le troviamo comode perché si acquistano gratis. È meglio accontentarsi di altre verità più modeste e meno entusiasmanti, quelle che si conquistano faticosamente, a poco a poco e senza scorciatoie, con lo studio, la discussione e il ragionamento, e che possono essere verificate e dimostrate" ^[342]

Il fatto è che il dualismo tra verità rivelate e (qui mi permetto di correggere Levi) conoscenze scientifiche (piuttosto che verità) conquistate faticosamente e che possono essere verificate e dimostrate, anche se sempre perfettibili, persiste anche nella storia della Terra e della vita, che di fatto è la storia dell'evoluzione, come ci ricorda Richard Dawkins:

"La vita intelligente su un pianeta comincia dal momento in cui, per la prima volta, qualcuno si chiede la ragione della sua esistenza. Se creature superiori mai visitassero la Terra dallo spazio, la prima domanda che esse farebbero, per stabilire il livello della nostra civiltà, sarebbe: «Hanno già scoperto l'evoluzione?». Sono esistiti sulla Terra organismi viventi, senza mai sapere perché, per oltre tremila milioni di anni prima che la verità finalmente illuminasse uno di loro. Il suo nome era Charles Darwin. Ad essere giusti, altri hanno avuto sentore della verità, ma fu Darwin che per primo mise insieme una coerente e sostenibile ragione del perché noi esistiamo" ^[343].

La teoria dell'evoluzione di Darwin rappresenta un punto di svolta nella storia del pensiero umano in quanto ribalta, come hanno fatto Copernico, Newton, Galileo e Einstein, un punto di vista errato fortemente consolidato. Ma porta anche alla luce un problema, se ancora recentemente è stato rilevato che:

"La teoria darwiniana dell'evoluzione rappresenta uno dei maggiori successi scientifici di ogni tempo. Eppure una percentuale molto alta di persone nei paesi occidentali fa mostra di rifiutarla e di credere in varie forme di creazionismo" ^[344].

Per superarne le difficoltà, per comprenderne il senso – che non è quello di progresso, men che meno finalisticamente orientato per arrivare alla specie che ha la pretesa di porsi al vertice dello

[341] Karl R. Popper (1972).

[342] Primo Levi (2014).

[343] Richard Dawkins (1979), pag. 4.

[344] Vittorio Girotto, Telmo Pievani e Giorgio Vallortigara (2008).

sviluppo della vita, bensì quello di cambiamento continuo e "neutro" [345] con cui per la sua stessa essenza la vita si manifesta – l'evoluzione deve essere interpretata, sia a livello macroscopico sia a livello microscopico, ricordando quello che ci insegna la fisica: la realtà non è come ci appare [346].

Per il livello macroscopico, dobbiamo partire dalle ben note vicende di Galileo Galilei [347]. Per oltre quindici secoli la fisica era stata il dominio della visione aristotelica del mondo. Aristotele [348], dal vedere che un corpo lanciato verticalmente verso l'alto ricadeva nello stesso punto nel quale era stato lanciato, aveva tratto una delle prove "sperimentali" a favore del fatto che la terra è immobile:

"... È dunque evidente che la terra deve trovarsi al centro [dell'universo] e rimanervi immobile: lo provano le ragioni precedentemente illustrate, come pure il fatto che i corpi pesanti lanciati con la forza verso l'alto in linea verticale ricadono al loro punto di partenza, e questo anche se la forza li avesse scagliati a un distanza infinita..." scrive nel *De Coelo* [349].

Una visione che, come ricorda Kuhn [350], si era imposta essendo la più vicina ad una concezione primitiva del mondo, basata sull'evidenza ricavata dalla pura e semplice percezione sensoriale [351]. In base alla pura e semplice percezione sensoriale è "evidente" che un corpo pesante cade a terra più velocemente di un corpo leggero, che un corpo rimane in movimento solamente se su di esso continua ad agire una forza, che la Terra è immobile, che la volta celeste le ruota attorno, che Sole, Luna e pianeti ruotano attorno alla Terra spostandosi sulla volta celeste. Ma tutte queste conclusioni sono sbagliate. E finalmente arriva Galileo che demolisce la fisica aristotelica (e la cosmologia tolemaica): la realtà non può essere dedotta "istintivamente" da ciò che ci appare, va ricercata altrimenti.

A Darwin spetta un compito forse addirittura più difficile per varie ragioni:

→ sul fronte ideologico ha di fronte i 6 000 anni di età della Terra calcolati sulla base della Bibbia e i brillanti scritti dell'arcidiacono William Paley, il cui cavallo di battaglia è che, se quando camminando in una brughiera desolata troviamo per terra un orologio dobbiamo dedurre che esista un orologiaio, analogamente e a maggior ragione quando volgiamo lo sguardo al mondo e constatiamo la meravigliosa varietà degli esseri viventi dobbiamo dedurre che esista una mente suprema che li ha progettati, non possono essere che il risultato di un "disegno intelligente" [352];

→ non può aiutarsi come Galileo con la sperimentazione e dando forma matematica ai dati – seguendo i principi che Galileo riporta ne *"Il Saggiatore"* [353]: *"... la Filosofia è scritta in questo*

[345] *"... in linea di principio il processo della selezione naturale è neutrale rispetto al sostrato: l'evoluzione avrà luogo ogni volta che tre condizioni saranno soddisfatte: 1) replicazione, 2) variazione (mutazione), 3) fitness differenziale (competizione)".* Daniel C. Dennett (2007), p. 365.

[346] Carlo Rovelli (2014).

[347] Galileo Galilei (Pisa, 15 febbraio 1564 - Arcetri, 8 gennaio 1642).

[348] Aristotele (Stagira, 384 o 383 a.e.v - Calcide, 322 a.e.v.).

[349] Aristotele (2015).

[350] Thomas Samuel Kuhn (Cincinnati, 18 luglio 1922 - Cambridge, 17 giugno 1996).

[351] Thomas S. Kuhn (1972), p. 127.

[352] Come dice Robert Betts Laughlin, premio Nobel per la fisica 1998: *"Il nocciolo della questione è che le ideologie rappresentano un ostacolo alle nuove scoperte. Tutti noi percepiamo il mondo come vorremmo che fosse, anziché com'è realmente, perché è nella nostra natura, ma dovremmo tenere a mente che si tratta di un difetto di progettazione della mente umana, e combatterlo, se possibile".*

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1998/laughlin/facts/>

[353] Galileo Galilei. *Il Saggiatore*. Roma, 1623, pag.25. Deutsches Museum, München.

grandissimo libro, che continuamente ci stà aperto innanzi à gli occhi (io dico l'Universo) ma non si può intendere se prima non s'impara à intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, & altre figure Geometriche, senza i quali mezzi è impossibile à intenderne umanamente parola; senza questi è un'aggirarsi vanamente per un'oscuro laberinto" – a causa del tipo di materia trattata;

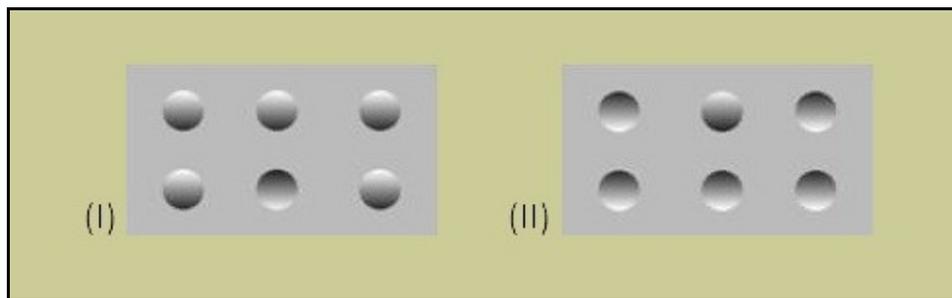
→ ha dalla sua soprattutto osservazioni, che da sole possono dire tutto e il contrario di tutto – basta ricordare la fisica di Aristotele e il sistema geocentrico di Tolomeo – più i flebili indizi sperimentali ricavati dagli incroci effettuati dagli allevatori, che peraltro quando sono interspecifici spesso conducono alla sterilità;

→ deve infine superare l'ostacolo rappresentato dai meccanismi decisionali che, ironia della sorte, visto che ora si tratta del padre dell'evoluzionismo, proprio l'evoluzione ha cablato nel sistema percettivo e nella mente umana, generalmente raccolti sotto il termine generico e indefinito di "istinto", che privilegiano il "credere" rispetto al "ragionare" [354].

Vediamone un esempio minimo ma significativo in questa immagine nella quale:

→ abbiamo la percezione di convessità e concavità, una terza dimensione che non esiste fisicamente in un disegno a due dimensioni;

→ vediamo in (I) cinque cerchi convessi e uno concavo, e in (II) cinque cerchi concavi e uno convesso. Tuttavia (II) non è altro che (I) capovolta. Per sincerarsene basta girare sottosopra il foglio (o girare sottosopra la testa) e constatare che ora in (I) ci sono cinque cerchi concavi e uno convesso, e in (II) cinque cerchi convessi e uno concavo.



L'illusione è determinata dall'assunto che la luce provenga dall'alto. Dato questo assunto ne deriva che *ombra in alto = concavo* mentre *luce in alto = convesso*. L'assunto è stato cablato nel nostro sistema percettivo durante la nostra evoluzione in un mondo, il nostro mondo, nel quale la luce proviene dall'alto, e per questa ragione non riusciamo a correggerlo. Ma le implicazioni derivanti dalle illusioni percettive (queste sono solo due tra le tante dimostrate) vanno ben oltre: portano inevitabilmente a concludere che anche quelli che noi chiamiamo istinto e intuizione, non siano altro che percorsi decisionali che emergono dal modo in cui si è evoluta la mente. E se questi percorsi decisionali si sono rivelati efficaci ai fini della sopravvivenza, non è detto che lo siano anche ai fini della comprensione razionale del mondo. Su questo tema, che da solo richiederebbe un trattato, Alberto Oliverio nel suo libro proprio nel paragrafo intitolato (significativamente) "*Trappole per la mente*" [355] ci ricorda che:

"... la nostra mente ha dei limiti e ... ciò richiede che il cervello si affidi a regole approssimative, efficaci perché i tempi di decisione siano rapidi: queste regole fanno parte del cosiddetto intuito, strategia che porta a praticare scorciatoie e a evitare controlli e riscontri. Il problema è che le

<https://astronomie-rara.ethbib.ethz.ch/demusmu/doi/10.5079/dmm-46>

[354] Read Montague (2008).

[355] Alberto Oliverio (1999), pp. 106-107.

decisioni intuitive sono soggette ad errori... la nostra mente, si tratti di meccanismi percettivi o cognitivi, può presentare dei limiti in situazioni "anomale" in cui le euristiche, che sono frutto di un processo evolutivo e cui si ricorre in modo semiautomatico, si rivelano insufficienti: in questi casi, per giungere a una più approfondita e veritiera analisi della realtà la mente non può più affidarsi a quei meccanismi che sono in grado di risolvere in modo empirico quelle situazioni percettive e cognitive per cui è programmata ma deve ricorrere a strategie razionali ... lontane dall'immediatezza della percezione...".

Un altro neuroscienziato, Giorgio Vallortigara, scrive di:

"... come gli studi empirici suggeriscano che lo spazio, così come il numero, il tempo, la causalità ... siano pre-disposti nel nostro cervello e configurino di conseguenza la nostra psiche" [356].

Ed ecco cosa ci dice a proposito delle illusioni percettive Marcello Frixione [357]:

"... La presenza praticamente ubiqua di forme di ragionamento non monotono nella vita quotidiana è dovuta al fatto che noi siamo agenti cognitivi limitati, che hanno soltanto un accesso parziale alle informazioni che sarebbero rilevanti per i loro scopi. Da qui la necessità di saltare alle conclusioni a partire da informazioni incomplete.

Si tratta di un problema generale, il quale, oltre che l'ambito del ragionamento riguarda anche altre prestazioni cognitive. Paradigmatico è il caso della percezione visiva. Ricostruire lo stato del mondo a partire dai dati che giungono ai sensori è un classico esempio di ciò che gli ingegneri chiamano un problema inverso mal posto. Vediamo di cosa si tratta per mezzo di un semplice esempio. Un problema diretto è un problema che ammette una soluzione univoca, come, ad esempio, il problema di individuare il numero che si ottiene sommando 5 e 2.

$$5 + 2 = ?$$

In questo caso la risposta è determinata univocamente: il numero cercato è 7. Supponiamo ora di porci la domanda inversa: quali sono due numeri che sommati tra loro producono 7 come risultato?

$$? + ? = 7$$

Ovviamente questa domanda non ammette una sola risposta. Anche se ci si limita i numeri naturali c'è più di una coppia di numeri la cui somma è 7:

7	0
6	1
5	2
4	3
3	4
2	5
1	6
0	7

La seconda domanda costituisce un esempio di problema inverso mal posto. I problemi che deve

[356] Giorgio Vallortigara (2017), p. 38.

[357] Marcello Frixione (2007), pp. 102-115.

risolvere il nostro sistema visivo quando ricostruisce gli stati del mondo esterno a partire dai dati percettivi assomigliano più al secondo caso che non al primo...

Nonostante ciò, nella stragrande maggioranza dei casi, la percezione del mondo avviene senza sforzo e senza esitazioni da parte nostra. Vale a dire, il nostro sistema visivo propone, per così dire, alla nostra coscienza una interpretazione dei dati percettivi che perlopiù risulta affidabile, e questo processo avviene in maniera veloce del tutto automatica, senza che ci costi alcuno sforzo e senza che ne siamo in alcun modo consapevoli.

Questo è reso possibile dal fatto che il sistema visivo incorpora tutta una serie di assunzioni implicite che lo aiutano interpretare i dati percettivi. Per così dire il sistema percettivo «ci aggiunge del suo» per arrivare a una plausibile ricostruzione del mondo. Ciò dipende da una serie di ipotesi che il sistema visivo stesso incorpora, ipotesi che nella maggior parte dei casi risultano attendibili, anche se talvolta in alcuni casi eccezionali inducono in errore. Le illusioni percettive ... possono essere viste come casi eccezionali, in cui queste stesse ipotesi, per così dire, di default, che usualmente portano sistema percettivo a generare un'interpretazione corretta della scena, inducono invece il sistema a sbagliare ... Le illusioni percettive hanno a che fare con il vedere, e, presumibilmente, le nostre abitudini inferenziali non vi hanno parte. È interessante sottolineare però che la percezione e il ragionamento ordinario devono affrontare problemi simili, e sono sottoposti a vincoli in qualche modo analoghi: il nostro sistema cognitivo ha un accesso limitato alle informazioni che sarebbero rilevanti per i compiti che deve risolvere, per cui si trova a dover azzardare ipotesi sulla base di dati incompleti. Ciò costituisce una caratteristica generale della cognizione."

Nella teoria dell'evoluzione abbiamo quindi questi aspetti, tutti e tre problematici:

→ quello storico-descrittivo, che integra i fatti che si sono succeduti negli eoni, nei periodi e nelle ere geologiche in un quadro molto plausibile, pur con le incertezze derivanti da carenze nella documentazione e dal fatto che non abbiamo testimoni oculari [358], ma che implica ordini di grandezza temporali (le centinaia di milioni e i miliardi di anni) che la mente umana non si riesce a raffigurare;

→ quello interpretativo, per il quale chimica, biochimica, genetica molecolare e genetica offrono una base di prove scientifiche monumentale, che per essere fatta propria richiede però una base di competenze scientifiche e tecniche di cui non tutti dispongono;

→ quello dei prodigi di complessità biologica che "istintivamente" si è portati ad attribuire in prima battuta a un disegno, in virtù dell'ordine formale e della appropriatezza adattativa che esprimono [359]. Senza che ci si renda conto del fatto che l'istinto opera impiegando le scorciatoie cognitive cablate nella mente umana dalla sua evoluzione nella savana del pleistocene, utili in quel contesto, ma diventate una zavorra in un mondo in cui la scienza ci insegna che ragionare è più importante che credere. Giusto per capirci: se Maxwell [360] non avesse ragionato scientificamente su elettricità e magnetismo [361] io ora probabilmente starei a scrivere queste mie note su una pergamena alla luce delle candele: ma ottimi esempi dell'utilità del ragionare si possono trovare anche in campo filosofico [362].

[358] Charles Darwin (2011).

[359] Vittorio Girotto, Telmo Pievani e Giorgio Vallortigara (2008).

[360] James Clerk Maxwell (Edimburgo, 13 giugno 1831 - Cambridge, 5 novembre 1879).

[361] J. Clerk Maxwell, F. R. S. VIII. *A dynamical theory of the electromagnetic field*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1865 155, 459-512.

[362] Arthur Schopenhauer (2021).

Superati tutti gli ostacoli culturali e cognitivi connessi con questi tre aspetti, per completare la comprensione dell'evoluzione è però necessario rivolgersi anche alla realtà fisica a livello microscopico, attraverso un'idea che parte da lontano e che nei primi decenni del terzo millennio sta prendendo forma grazie alla fisica.

Scriveva Leibniz nel 1705:

"Si vede bene che il tempo non è una sostanza, perché un'ora, o qualsiasi altra parte del tempo si prenda, non esiste mai intera e con tutte le sue parti insieme. Non è che un principio dei rapporti, un fondamento dell'ordine nelle cose, in quanto si concepisce la loro esistenza successiva, ovvero senza che esistano insieme. Lo stesso deve valere per lo spazio. È il fondamento del rapporto dell'ordine delle cose, ma in quanto le si concepisce esistere insieme. Sono veri l'uno e l'altro di tali fondamenti, benché siano ideali..." [363].

L'idea che spazio e tempo non siano entità bensì relazioni verrà ripresa prima da Einstein e oggi giorno dalla fisica che cerca l'unificazione tra estremamente grande (teoria della relatività) ed estremamente piccolo (fisica quantistica). Vediamo cosa dice a questo proposito Lee Smolin, che con Carlo Rovelli lavora su questo tema. Il punto di partenza è che:

"... il primo principio della cosmologia deve essere "Non c'è nulla al di fuori dell'universo". Questo non significa escludere la religione o il misticismo, perché c'è sempre spazio per quelle fonti di ispirazione per coloro che le cercano. Ma se è la conoscenza che desideriamo, se desideriamo capire cos'è l'universo e come è diventato così, dobbiamo cercare risposte alle domande sulle cose che vediamo quando ci guardiamo intorno. E le risposte possono riguardare solo cose che esistono nell'universo. Questo primo principio significa che consideriamo l'universo, per definizione, un sistema chiuso. Significa che la spiegazione di qualsiasi cosa nell'universo può riguardare solo altre cose che esistono anche nell'universo..." [364].

Da questo, continua Smolin, si ha che:

... una delle [conseguenze] più importanti è che la definizione o descrizione di qualsiasi entità all'interno dell'universo può riferirsi solo ad altre cose nell'universo. Se qualcosa ha una posizione, quella posizione può essere definita solo rispetto alle altre cose nell'universo. Se ha un movimento, quel movimento può essere riconosciuto solo cercando cambiamenti nella sua posizione rispetto ad altre cose nell'universo. Quindi, non c'è alcun significato nello spazio che sia indipendente dalle relazioni tra le cose reali nel mondo. Lo spazio non è un palcoscenico, che potrebbe essere vuoto o pieno, su cui le cose vanno e vengono. Lo spazio non è nulla a parte le cose che esistono; è solo un aspetto delle relazioni che sussistono tra le cose ... la lezione principale della relatività e della teoria quantistica è che il mondo non è altro che una rete di relazioni in evoluzione..." [365].

Ma non basta:

"Passiamo ora al tempo. Lì vale la stessa lezione. Nella teoria di Newton si presume che il tempo abbia un significato assoluto. Scorre, dall'infinito passato all'infinito futuro, lo stesso ovunque nell'universo, senza alcuna relazione con le cose che accadono realmente. Il cambiamento è misurato in unità di tempo, ma si presume che il tempo abbia un significato e un'esistenza che trascende qualsiasi particolare processo di cambiamento nell'universo. Nel ventesimo secolo abbiamo imparato che questa visione del tempo è errata tanto quanto la visione di Newton dello

[363] Gottfried Wilhelm Leibniz (2013).

[364] Lee Smolin (2014).

[365] Lee Smolin, ibidem.

spazio assoluto. Ora sappiamo che anche il tempo non ha alcun significato assoluto. Non esiste tempo al di fuori del cambiamento. Non esiste un orologio al di fuori della rete di relazioni mutevoli. Quindi non si può porre una domanda come quanto velocemente, in senso assoluto, qualcosa sta cambiando: si può solo confrontare la velocità con cui una cosa sta accadendo con la velocità di un altro processo. Il tempo è descritto solo in termini di cambiamento nella rete di relazioni che descrive lo spazio. Ciò significa che è assurdo nella relatività generale parlare di un universo in cui non accade nulla. Il tempo non è altro che una misura del cambiamento, non ha altri significati.

Né lo spazio né il tempo hanno alcuna esistenza al di fuori del sistema di relazioni in evoluzione che comprende l'universo ... non ci sono cose, [ci sono] solo processi che sembrano cambiare lentamente sulle nostre scale temporali umane. ... Quindi non ci sono realmente due categorie di cose nel mondo: oggetti e processi. Ci sono solo processi relativamente veloci e processi relativamente lenti...

... l'universo è costituito da un gran numero di eventi. Un evento può essere pensato come la parte più piccola di un processo, una più piccola unità di cambiamento. Ma non pensare a un evento come a un cambiamento che avviene in un oggetto altrimenti statico. È solo un cambiamento, niente di più. L'universo degli eventi è un universo relazionale. Vale a dire, tutte le sue proprietà sono descritte in termini di relazioni tra gli eventi. La relazione più importante che due eventi possono avere è la causalità ..." [366]."

Nell'immagine ho cercato di riassumere l'evoluzione dei concetti:

→ in alto a sinistra la concezione di Newton: spazio e tempo assoluti, con un regolo e con un orologio si possono ricavare le leggi del moto. Ecco cosa scrive Newton a proposito del tempo nella nota esplicativa (*scholium*) a pagina 5 della prima edizione (1687) dei "*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*": "Nota esplicativa. Finora ho spiegato, per le voci meno note, in che senso devono essere intese nelle pagine seguenti. In verità non definisco tempo, spazio, luogo e moto, in quanto a tutti notissimi. Nondimeno va detto che la persona comune non concepisce queste quantità altrimenti, se non con la loro relazione con le cose sensibili. E di qui sorgono certi pregiudizi, per eliminare i quali conviene distinguerle in assolute e relative, vere e apparenti, matematiche e comuni.

I. Il tempo assoluto, vero e matematico, in sé e per sua stessa natura, senza relazione con alcunché di esterno, scorre uniformemente...

II. Lo spazio assoluto per sua natura, senza relazione con alcunché di esterno, rimane sempre identico e immobile..." (367);

→ in alto a destra la concezione di Ernst Mach, come la riporta Luca Guzzardi:

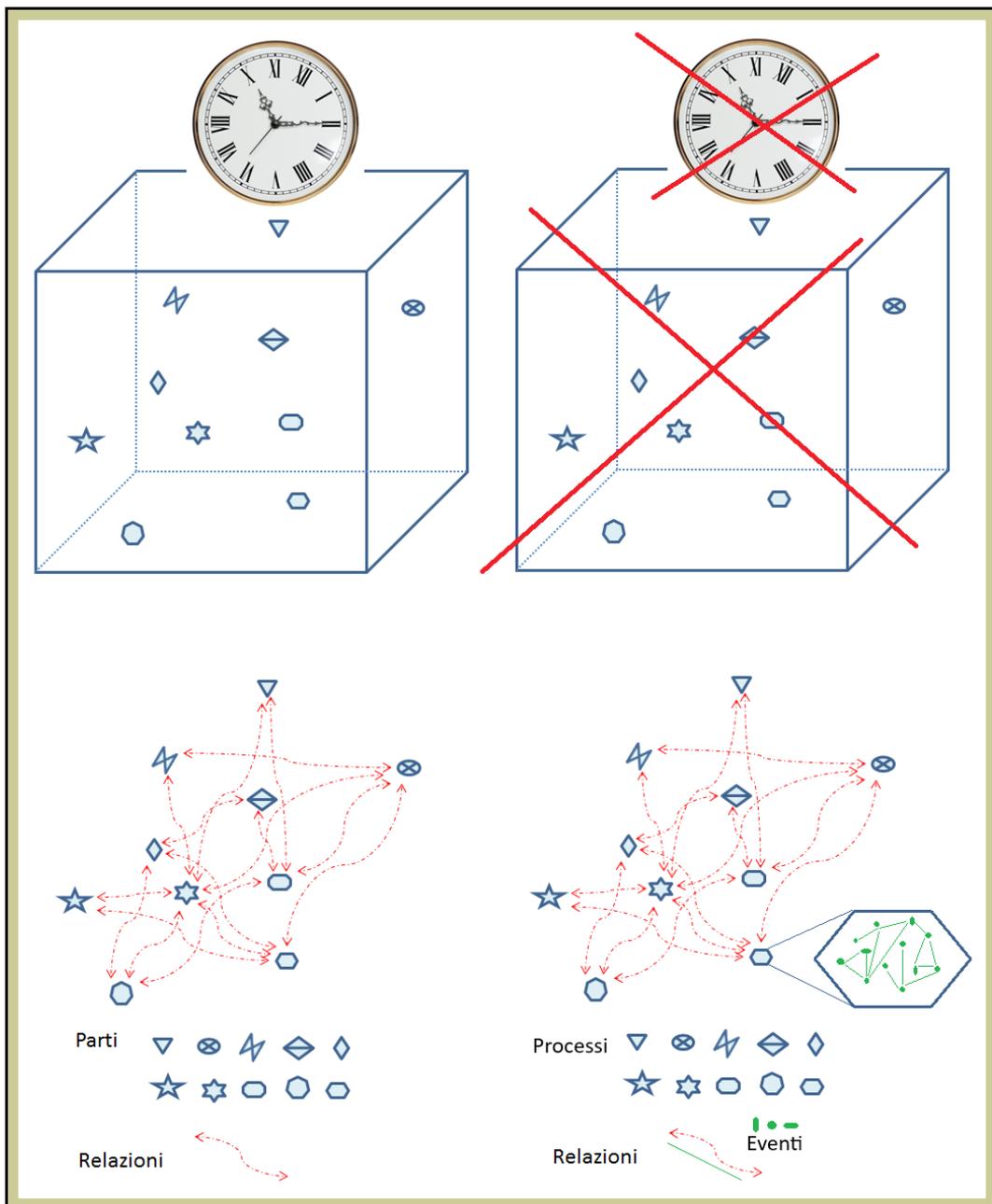
"La fisica newtoniana si reggeva su grandezze irrelative che definivano tutte le altre, chiudendole in un unico sistema di riferimento: spazio assoluto, tempo assoluto. Ora, Mach proponeva di abbandonare qualsiasi nozione assolutistica e di definire tutti i termini in maniera relazionale (operativa), misurandoli gli uni con gli altri; in breve, di utilizzare i corpi come veri e propri sistemi di riferimento gli uni per gli altri, anziché come "contenuti" di un unico sistema. Non diversamente dalla statica antica, la meccanica newtoniana aveva bisogno di un punto d'appoggio per reggere il mondo ... invece, a parere di Mach, poteva benissimo darsi che il mondo si reggesse da sé!" [368];

[366] Lee Smolin, ibidem.

[367] Isaac Newton. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Londini [i.e. London], 1687. ETH-Bibliothek Zürich.

<https://www.e-rara.ch/zut/doi/10.3931/e-rara-440>

[368] Luca Guzzardi (2010).



→ in basso a sinistra la concezione che Einstein [369] introduce nella fisica con la relatività speciale [370] e con la relatività generale [371], e che Ludwig von Bertalanffy [372] introduce in biologia con la teoria dei sistemi [373]: sono spariti regolo e orologio, sono le relazioni a dare forma al mondo, ma in qualche modo al fondo persiste l'idea che le parti siano entità, che esistano le "cose", residuo dell'antica ontologia;

[369] Albert Einstein (Ulm, 14 marzo 1879 - Princeton, 18 aprile 1955).

[370] Albert Einstein. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Ann. d. Phys. 17, 891-921 (1905). | PDF | https://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/einstein-papers/1905_17_891-921.pdf

[371] Albert Einstein. *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*. Ann. d. Phys. 49, 769-822 (1916). | PDF |

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.19163540702>

[372] Ludwig von Bertalanffy (Vienna, 19 settembre 1901 - New York, 12 giugno 1972).

[373] Ludwig von Bertalanffy (2004).

→ in basso a destra, siamo arrivati all'ultimo passo, quello descritto tra gli altri da Lee Smolin e da Carlo Rovelli. A livello delle particelle elementari, del nucleo, dell'atomo non esiste un punto di appoggio, nulla è fisso, nulla è fermo, anche il vuoto è fatto di particelle e antiparticelle che ininterrottamente si generano e si annichilano, il substrato fisico della realtà è fatto di incessanti "accadimenti", di eventi, che attraverso le relazioni che intercorrono tra loro si raccolgono in processi. Se gli eventi ne sono il tessuto microscopico, la realtà è fatta di processi.

Questa visione della fisica prevede un ribaltamento del nostro punto di vista, l'ennesimo, a riprova del fatto che, a dispetto delle presunte certezze con le quali cerchiamo punti fermi che ci assistano nel nostro cammino esistenziale, vedere le stesse cose con nuovi occhi è una strategia che spesso (anche se non sempre, perché bisogna fare attenzione ai ciarlatani) può dare buoni risultati. Siamo portati, da quello che accade in un video, a ritenere che la realtà sia il risultato di immagini statiche che svoltolate in sequenza realizzano il movimento. Ma per la fisica è esattamente l'opposto: quando abbiamo di fronte a noi un oggetto, non abbiamo di fronte a noi una "cosa", ma abbiamo di fronte la somma di ininterrotti "accadimenti", di eventi che continuamente si svolgono nell'estremamente piccolo, che per sua natura non ha "punti di appoggio", e che si fondono in processi che a livello macroscopico ci appaiono come "cose" che si evolvono nello spazio e nel tempo:

"... questo è il mondo descritto dalla meccanica quantistica e dalla teoria delle particelle. Lontanissimo dal mondo meccanico di Newton e Laplace, dove minuscoli sassolini freddi vagavano eterni lungo traiettorie precise di uno spazio geometrico immutabile. meccanica quantistica e gli esperimenti con le particelle ci hanno insegnato che il mondo è un pullulare continuo e irrequieto..." [374] e nel quale *"... alla massa del nucleone, che è quasi un GeV, la massa "nuda" dei quark costituenti contribuisce solo per l'un per cento; il resto è apportato proprio dalla complessa interazione quark-quark, la cui energia si manifesta come massa"* [375].

La conclusione è allora la seguente:

"Se la maggior parte della massa del protone e del neutrone è dovuta all'energia delle interazioni al loro interno, allora siamo davvero di fronte a «massa senza massa», giacché abbiamo il comportamento che tendiamo ad attribuire alla massa, senza bisogno della massa come proprietà..."

... nell'addendum al suo articolo del 1905 sulla relatività ristretta, l'equazione ricavata da Einstein è $m = E/c^2$. Questa è la sua grande intuizione (non $E = mc^2$). E Einstein fu sicuramente preveggente quando scrisse «La massa di un corpo è una misura del suo contenuto di energia». Nel suo libro La leggerezza dell'essere Wilczek scrive: «Se il corpo è un corpo umano, la cui massa emerge per la stragrande maggioranza dai protoni e dai neutroni che contiene, la risposta ora è chiara e decisa. L'inerzia di quel corpo, con una precisione del 95 per cento, è il suo contenuto di energia» [376].

Mentre non posso che inorridire di fronte alla diffusione di visioni misticheggianti che si dicono fondate sulla teoria quantistica – trattamenti estetici inclusi – rassicuro i miei venticinque lettori [377] sul fatto che anche in un mondo relazionale spazio e tempo continuano a comparire e ad

[374] Carlo Rovelli (2014).

[375] Giorgio Chinnici (2023).

[376] Jim Baggott (2019).

[377] *"Pensino ora i miei venticinque lettori che impressione dovesse fare sull'animo del poveretto, quello che s'è raccontato. Lo spavento di que' visacci e di quelle parolacce, la minaccia d'un signore noto per non minacciare invano, un sistema di quieto vivere, ch'era costato tant'anni di studio e di pazienza, sconcertato*

essere assolutamente indispensabili – non solo per arrivare in orario sul posto di lavoro e a un appuntamento, ma anche, giusto per fare un esempio, perché senza gli orologi atomici a bordo dei satelliti del GPS il loro navigatore non li porterebbe da nessuna parte – e che in ogni caso anche l'equazione di Einstein $m = E/c^2$ che ci dice che la massa di un corpo è una misura del suo contenuto di energia non toglie una virgola alla solidità dei corpi.

Tuttavia sottolineare come a livello macroscopico le "cose" stiano lasciando il posto a "processi" è importante per i risvolti che questo ha nel caso della biologia e dell'evoluzione, per due ragioni:

→ la prima è che se anche un "essere vivente" è un processo – e lo è, pur avendo una durata effimera – non serve più interpretare la vita come una proprietà aggiuntiva della materia, scompare il dualismo tra il mondo materiale (il sostantivo "essere") e la metafisica strisciante che soggiace all'attributo "vivente". La prima cellula compare quando nel corso di miriadi di unità di tempo (eoni) miriadi di eventi con miriadi di reciproche relazioni si stabilizzano non in un "essere" (sostantivo), bensì in un "processo" che include l'autoreplicazione e che denominiamo "vita";

→ la seconda è che, poiché la vita è un processo e ogni "essere vivente" è un processo, la difficoltà insita nell'evoluzione quando immaginiamo una specie che si trasforma in un'altra – quasi fosse l'esito di una trasmutazione magica o alchemica di una cosa in un'altra – viene a cadere. E visto che un essere vivente è un processo, quello di specie diventa anch'esso un concetto fluido, così come l'intera evoluzione nella quale, anche se l'informazione alla base dei caratteri, l'informazione genetica, viene trasmessa sotto forma di entità discrete, è impossibile trovare discontinuità. Nel corso degli eoni miriadi di eventi interagiscono attraverso miriadi di reciproche relazioni generando miriadi di processi: che non sono entità scolpite nella pietra come siamo abituati a vedere gli appartenenti alle specie della tassonomia di Linneo, ma sono entità che cambiano in continuazione, mai uguali a se stesse, e che interagendo tra loro attraverso miriadi di relazioni determinano la diversificazione (evoluzione) delle specie che ci è dato osservare.

Seduto davanti al mio PC in Italia a 45° di latitudine nord mentre scrivo questi appunti mi sto muovendo – a causa della rotazione della Terra su sé stessa – a una velocità di circa 1 179 chilometri all'ora. Inoltre con il resto dell'umanità e con la Terra mi sto muovendo – in seguito al moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole – a circa 30 chilometri al secondo (attenzione: chilometri al secondo e non chilometri all'ora). Come se non bastasse con il Sole mi sto (ci stiamo) muovendo alla velocità di circa 220 chilometri al secondo attorno al centro della galassia – a causa del moto di rivoluzione del Sole attorno al centro di questa. Infine il fatto che i fotoni della radiazione cosmica di fondo a microonde [³⁷⁸] in una direzione mostrano uno spostamento verso il rosso e in direzione opposta mostrano uno spostamento verso il blu, tipici dell'effetto doppler, indica che con anche me a bordo la nostra casa nell'Universo, insieme ai 200 miliardi di stelle della nostra galassia, si sta muovendo in una specifica direzione (quella dalla quale provengono i fotoni che mostrano uno spostamento verso il blu), alla velocità di 600 chilometri al secondo [³⁷⁹].

in un punto, e un passo dal quale non si poteva veder come uscirne: tutti questi pensieri ronzavano tumultuariamente nel capo basso di don Abbondio".

[https://it.wikisource.org/wiki/Pagina:l_promessi_sposi_\(1840\).djvu/31](https://it.wikisource.org/wiki/Pagina:l_promessi_sposi_(1840).djvu/31)

[378] Il Premio Nobel per la Fisica del 2006 è stato assegnato a John C. Mather and George F. Smoot per le loro scoperte sulla radiazione cosmica di fondo a microonde, CMB o "Cosmic Microwave Background".

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2006/summary/>

[379] Andrew Fraknoi. Foothill College & the Astronomical Society of the Pacific. *How Fast Are You Moving When You Are Sitting Still?* | **PDF** |

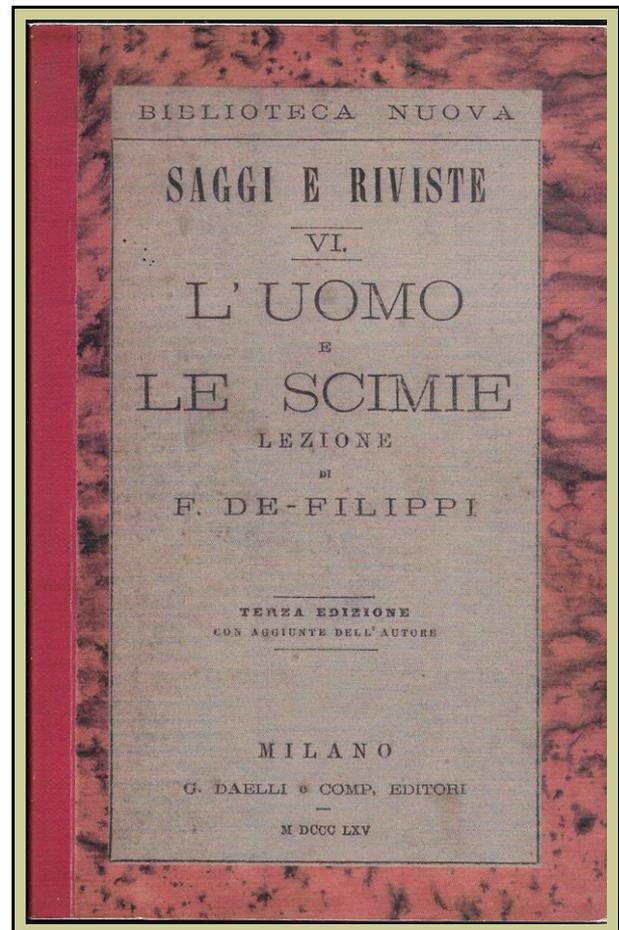
https://astrosociety.org/file_download/inline/d1394916-a529-4107-9cb1-a0e3f3a76bf5

Da queste constatazioni di ordine cosmologico, dalla breve storia della Terra e della vita delineata in queste pagine e dall'attuale stato dell'ambiente, che è sotto gli occhi di tutti, mi pare inevitabile poter dedurre:

- come l'uomo sia insignificante, per di più a fronte di "un'evoluzione che non ci aveva previsto" e in "un mondo che poteva fare a meno di noi"^[380];
- che pur avendo come obiettivo in sé lecito del singolo la sopravvivenza in condizioni migliori di quelle della generazione precedente, la specie *Homo sapiens* collettivamente si è comportata come una specie invasiva, la peggiore mai comparsa sulla Terra, che si è diffusa ovunque sfruttando le risorse naturali al punto da portare la Terra oramai vicina al collasso;
- che racchiudere per semplicità numerica i 4 miliardi e mezzo di anni di storia della Terra e i 3 miliardi e mezzo di storia della vita in una giornata di 24 ore – o in un anno di 365 giorni – che terminano rispettivamente alla mezzanotte ovvero in una presumibilmente fredda e buia giornata invernale, potrebbe rivelarsi la triste metafora del nostro futuro, non quello remoto di quando il sole con una vampata distruggerà il sistema planetario che lo circonda, ma un futuro ormai prossimo.

Purtroppo la consapevolezza che i vantaggi per l'uomo – oggi ci possiamo lavare, vestire, scaldare, possiamo curare e in molti casi prevenire le malattie, possiamo istruirci, abbiamo tempo libero, possiamo viaggiare – stavano costando troppo alla nostra casa nell'Universo è arrivata molto tardi, perché nemmeno un pazzo poteva pensare di opporsi al "progresso". La Lezione Pubblica su "L'uomo e le scimie" tenuta da Filippo De Filippi, zoologo, nel 1864, lezione che segna non senza polemiche l'esordio del darwinismo in Italia, così si concludeva:

"Ora le piante prendono tutto il loro carbonio dell'aria, ove esiste in quella combinazione che è detta acido carbonico. L'acido carbonico dell'aria è dunque il principale alimento delle piante. Tutto il carbonio che è solidificato o nell'organismo delle piante, od in quello degli animali, od in quei grandi strati di lignite e di carbone fossile che fanno parte della corteccia terrestre, tutto fu preso dall'aria, e, per l'economia generale della natura, deve essere nuovamente nell'aria rivisto. Ma quegli immensi strati di lignite e di carbon fossile sono un ingente capitale affatto perduto per la vegetazione, tagliato fuori intieramente dal circolo della vita. L'uomo solo è chiamato dalla natura a vivificare questo capitale, a restituirlo fruttifero per le mille e mille bocche delle sue risonanti officine, nel grande emporio dell'atmosfera. Lo stemma del regno umano abbia adunque la doppia corona dell'ordine morale e dell'ordine teleologico" ^[381].



[380] Telmo Pievani (2011), pag. 235.

[381] Filippo De Filippi. *L'uomo e le scimie*. Lezione pubblica detta in Torino la sera dell'11 gennaio 1864.

Lasciando perdere, per carità di patria, qualsiasi considerazione sulla corona dell'ordine morale che dovremmo indossare, la teoria dell'evoluzione ha consentito di decostruire l'illusione che possiamo vantare nel nostro stemma quella dell'ordine teleologico: non siamo proprio lo scopo, né del cosmo, né della galassia, né della Terra, né della vita e tanto meno dell'evoluzione – contrariamente a quanto De Filippi poteva pensare, ma allora eravamo in pieno '800 e le sensibilità erano molto diverse.

Partendo dal presupposto che comunque tutto quanto il progresso sia stato concepito e realizzato a fin di bene, il senno di poi sta mostrando il rovescio della medaglia: la specie *Homo sapiens*, come tutte le specie che ci hanno preceduto e che si sono estinte, è finita in un cul di sacco evolutivo, un fenomeno di per se naturale, ma aggravato sia dai limiti della mente ancestrale che molto governa dei suoi comportamenti, sia, ed è qui che sta la beffa finale, dai danni provocati dalla capacità di pensiero astratto e razionale comparsa nel corso della sua evoluzione:

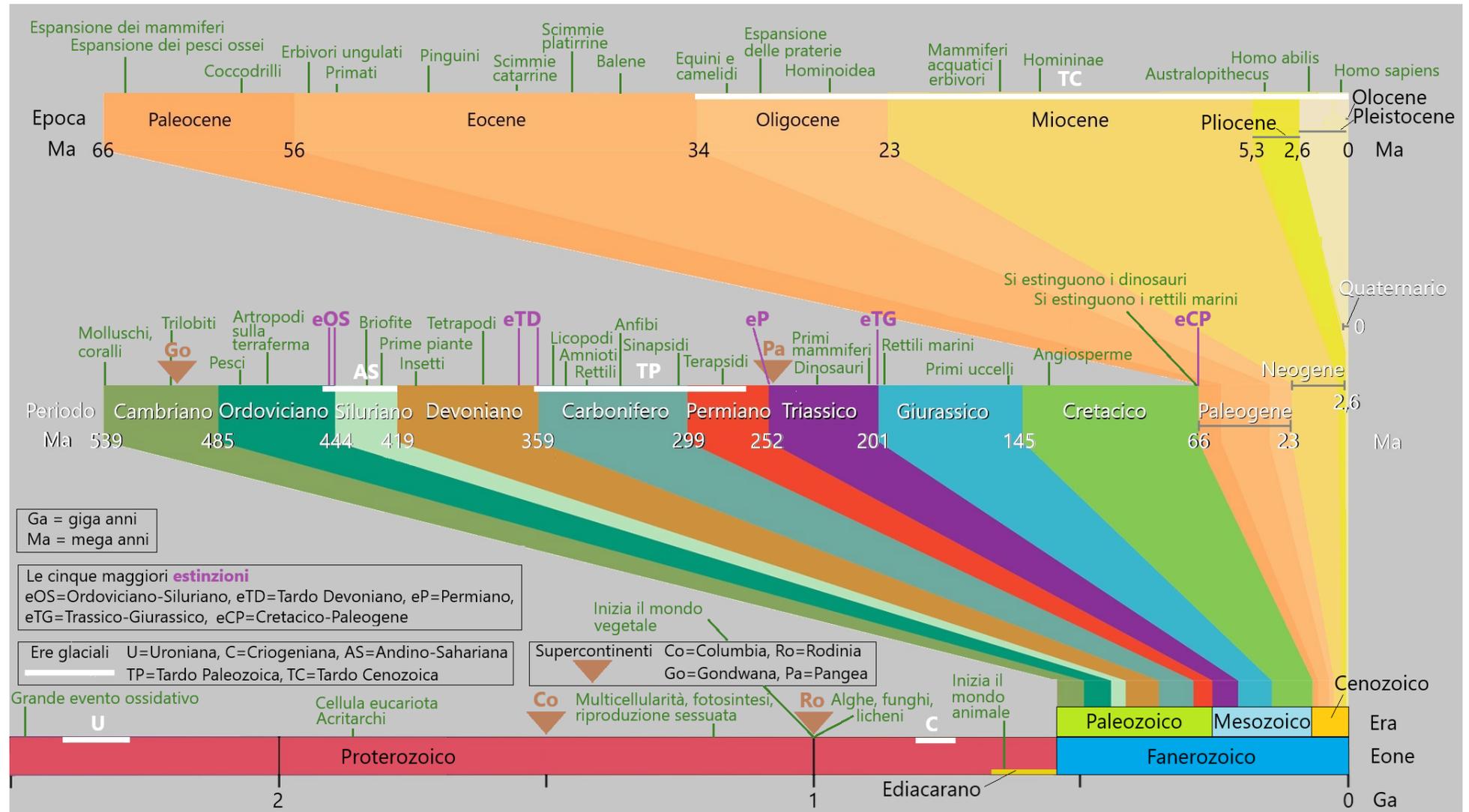
"Il 99% di tutte le specie vissute sulla Terra è già estinto. Homo sapiens è nato meno di 200 000 anni fa in Africa orientale e da qui a qualche tempo, come è successo per tutte le altre specie, non ci sarà più. La Terra stessa che ci ospita ha avuto un'origine, 4,5 miliardi di anni fa, e scomparirà insieme al Sole, quando questo esploderà fra 5 o 6 miliardi di anni. Quando succederà, si tratterà di un evento del tutto marginale nella storia del cosmo: la fine di una stella posta alla periferia di una fra i miliardi di galassie dell'universo. L'evoluzione ... non può essere facilmente assimilata al progresso, semmai a un più neutrale cambiamento. Che in questa doppia finitudine, individuale e di specie, una radicale contingenza storica possa aver avuto un ruolo centrale è probabilmente una prospettiva che sfida profondamente i nostri adattamenti cognitivi primari. È doppiamente impensabile. Non solo siamo finiti, ma le cose potevano andare diversamente. Non vi era alcuna necessità che arrivassimo fin qui e che fossimo proprio noi a innalzare il vessillo dell'intelligenza autocosciente. Siamo l'esito di una sequenza di eventi improbabili – figli di «pura storia» scriveva Stephen J. Gould – che ci sembrano inevitabili soltanto per l'illusione prospettica del senno di poi" [³⁸²].

Nel frattempo, ora che so che gli uccelli sono una classe di *Dinosauria / Theropoda*, ogni volta che ne guardo uno che si rifornisce di semi alla mangiatoia nel mio giardino mi illumino e vedo un minuscolo stupendo dinosauro piumato con le ali. Quando osservo un essere vivente ho la consapevolezza di vedere un processo effimero, ma che può essere straordinariamente bello. Quando mi affaccio alla finestra e guardo le montagne mi rendo conto che la nostra casa nell'Universo è davvero un posto magnifico dove stare. Spero che questo possa accadere anche ad altri.

Ristampa anastatica della terza edizione (Milano, G. Daelli e Comp., 1865). Museo di Anatomia Umana dell'Università di Torino, Torino, 2009, pag. 53.

[382] Vittorio Girotto, Telmo Pievani e Giorgio Vallortigara (2008), cap. 8.

QUADRO SINOTTICO



Per animali e piante le date indicano orientativamente il momento della comparsa delle prime specie.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

Douglas Adams. *Guida galattica per gli autostoppisti*. Arnoldo Mondadori Editore S.p.A., Milano, 1999, ISBN 88-46463-1, pag. 7.

"*Lontano, nei dimenticati spazi non segnati nelle carte geografiche dell'estremo limite della Spirale Ovest della Galassia, c'è un piccolo e insignificante sole giallo*".

Aristotele. *Fisica*. A cura di Roberto Radice. Bompiani / RCS Libri, Milano, 2011, ISBN 978-88-452-6921-9.

Aristotele. *Il cielo*. A cura di Alberto Jori. Bompiani / RCS libri, Milano, 2015, ISBN 978-88-452-9193-7.

Jim Baggott. *Massa. L'origine della materia dall'atomo dei greci alla meccanica quantistica*. Adelphi eBook, 2019, ISBN 978-88-459-8195-1. Edizione in ebook del Kindle.

<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=B07YNT2JKQ&id=cqui6bjln5fh5ijvzot22oxhda>

Michael J. Benton. *La più grande catastrofe di tutti i tempi. Quando sulla Terra la vita rischiò di scomparire*. Newton & Compton Editori, Roma, 2005, ISBN 88-541-0405-1.

Michael J. Benton, David A. T. Harper. *Introduction to Paleobiology and the Fossil Record*. Second edition. Wiley-Blackwell, 2020, ISBN 978-1-119-27285-4.

Ludwig von Bertalanffy. *Teoria generale dei sistemi. Fondamenti, sviluppi, applicazioni*. Arnoldo Mondadori Editore, Milano, 2004, ISBN 88-04-53342-0.

Giorgio Chinnici. *Il segreto del nucleo. Il mondo nel cuore della materia*. Codice edizioni, Torino, 2023, ISBN 979-12-5450-079-8. Edizione in ebook del Kindle.

<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=BOBSNVSN7N&id=lfswyotfg5bcxibjxkmjuwqzfi>

Charles Darwin. *Lettera a J. D. Hooker*, 1 febbraio 1871.

<https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docid=letters/DCP-LETT-7471.xml>

Charles Darwin. *L'origine delle specie. Selezione naturale e lotta per l'esistenza*. Boringhieri, Torino, 1967, CL 61-8840-0. Traduzione dall'originale: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, 6ª edizione, 1872.

Charles Darwin. *L'origine delle specie. Il libro rivoluzionario che ha cambiato per sempre il nostro modo di pensare*. Traduzione di L. Fratini. Bollati Boringhieri, Torino, 2011, ISBN 978-88-339-7098-1. Edizione in ebook del Kindle.

<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=B0064BZTQ4&id=soz6dggf235gvtemfimt5y2yny>

Richard Dawkins. *Il gene egoista*. Nicola Zanichelli, Bologna, 1979.

Filippo De Filippi. *L'uomo e le scimie*. Lezione pubblica detta in Torino la sera dell'11 gennaio 1864. Ristampa anastatica della terza edizione (Milano, G. Daelli e Comp., 1865). Museo di Anatomia Umana dell'Università di Torino, Torino, 2009.

Daniel C. Dennett. *Rompere l'incantesimo. La religione come fenomeno naturale*. Raffaello Cortina, Milano, 2007, ISBN 978-88-6030-097-3.

Marcello Frixione. *Come ragioniamo*. Gius. Laterza & Figli, 2007, ISBN 978-88-420-8312-2.

Henry Gee. *Brevissima storia della vita sulla Terra. 4,6 miliardi di anni in dodici capitoli*. Giulio Einaudi editore, Torino, 2022. ISBN 978-88-25133-8.

Vittorio Girotto, Telmo Pievani e Giorgio Vallortigara. *Nati per credere. Perché il nostro cervello sembra predisposto a fraintendere la teoria di Darwin*. Codice edizioni, Torino, 2008, ISBN 978-88-7578-110-1. Edizione in ebook del Kindle.

<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=B006AVQM4G&id=7wwhxljnozb23j5srtjcm2c5wu>

Stephen Jay Gould. *Otto piccoli porcellini. Riflessioni di storia naturale*. Il Saggiatore, Milano, 2003, ISBN 88-428-1105-X.

Luca Guzzardi. *Lo sguardo muto delle cose. Oggettività e scienza nell'età della crisi*. Raffaello Cortina Editore, Milano, 2010, ISBN 978-88-6030-325-7.

Thomas Halliday. *I mondi di ieri. Alle origini della Terra*. La nave di Teseo, Milano, 2023. ISBN 978-88-346-13393-1.

Éric Karsenti. *Breve storia delle origini della vita. Dalla cellula all'essere umano, la più bella storia mai raccontata: la nostra*. Adriano Salani Editore, Milano, 2022, ISBN 978-88-310-0408-4.

Thomas S. Kuhn. *La rivoluzione copernicana. L'astronomia planetaria nello sviluppo del pensiero occidentale*. Giulio Einaudi editore, Torino, 1972, ISBN 88-06-33332-1.

Richard Leakey. *Le origini dell'Umanità*. Sansoni Editore, Milano, 1994, ISBN 88-383-1657-0.

Gottfried Wilhelm Leibniz. XXVII *Due lettere alla Principessa Sofia* 1. 31 ottobre 1705. In: Gottfried Wilhelm Leibniz. *Opere*. A cura di Massimo Mugnai ed Enrico Pasini. Unione Tipografico-Editrice Torinese, Torino, 2013, ISBN 978-88-418-9406-4.

Primo Levi. *Se questo è un uomo*. Giulio Einaudi, Torino, 2014, ISBN 978-88-5842-043-0. Edizione in ebook del Kindle.

<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=B015S2M9OO&id=sdgsx2hkzbdvvc4gwdbbaxn5ta>

Lucrezio. *De rerum natura*. Liber V, 195. In: Lucrezio. *La natura delle cose*. Mondadori Libri, Milano, 2018, ISBN 978-88-17-16954-7, pag. 439.

"Quod <si> iam rerum ignorem primordia quae sint, / hoc tamen ex ipsis caeli rationibus ausim / confirmare aliisque ex rebus reddere multis, / nequaquam nobis divinitus esse paratam / naturam rerum, tanta stat praedita culpa" [383].

Jacques Monod. *Il caso e la necessità. Saggio sulla filosofia naturale della biologia contemporanea*. Arnoldo Mondadori, Milano, 1970.

Read Montague. *Perché l'hai fatto? Come prendiamo le nostre decisioni*. Raffaello Cortina, Milano, 2008, ISBN 978-88-6030-199-4.

[383] *"Se anche ignorassi quale sia l'origine delle cose, / tuttavia dalle stesse vicende del cielo arderei / affermare e dagli altri fenomeni concludere questo, / che non per volere divino è stata per noi generata / la natura del mondo, segnata da pecche sì gravi"*.

Alberto Oliverio. *Esplorare la mente. Il cervello tra filosofia e biologia*. Raffaello Cortina, Milano, 1999, ISBN 88-7078-575-0.

Telmo Pievani. *La vita inaspettata. Il fascino di un'evoluzione che non ci aveva previsto*. Raffaello Cortina Editore, Milano, 2011, ISBN 978-88-6030-407-0.

Karl R. Popper. *Congetture e confutazioni*. Il Mulino, Bologna, 1972, ISBN 978-88-15-12804-1.

Donald R. Prothero. *Fossili fantastici e chi li ha trovati. La storia dei dinosauri in 25 scoperte straordinarie*. Aboca Edizioni, Sansepolcro, 2020, ISBN/EAN 9788855230209. Edizione in ebook del Kindle.
<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=B08CN4P21M&id=axbwkae5qjdy7ih5bfnekagcpq>

Donald R. Prothero. *La storia della vita in 25 fossili. Le meraviglie dell'evoluzione e i suoi intrepidi ricercatori*. Aboca Edizioni, Sansepolcro, 2021, ISBN/EAN 9788855231114. Edizione in ebook del Kindle.
<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=B097RDTPJ5&id=pyppk2fa5jasnjdb3pqh2lnmia>

Donald R. Prothero. *Rompicapo geologici e chi li ha risolti. La storia della Terra in 25 rocce*. Aboca Edizioni, Sansepolcro, 2022, ISBN/EAN 9788855231886. Edizione in ebook del Kindle.
<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=B0BPSR24Z3&id=d6y6vwkfdvgzppopd4bm36qeta>

Jack Repcheck. *L'uomo che scoprì il tempo. James Hutton e l'età della terra*. Raffaello Cortina Editore, Milano, 2004, ISBN 88-7078-864-4.

Carlo Rovelli. *La realtà non è come ci appare. La struttura elementare delle cose*. Raffaello Cortina, Milano, 2014, ISBN 978-88-6030-641-8.

Carlo Rovelli. *Sette brevi lezioni di fisica*. Adelphi, Milano, 2014, ISBN 978-88-459-2925-0.

Vittorio Silvestrini. *Guida alla teoria della relatività*. Editori Riuniti university press, Roma, 2011, ISBN 978-88-6473-071-4.

Arthur Schopenhauer. *O si pensa o si crede. Scritti sulla religione*. Mondadori Libri, Milano, 2018, ISBN 978-88-17-17322-3.

Lee Smolin. *Three Roads to Quantum Gravity. A new understanding of space, time and the universe*. Phoenix, 2014, ISBN 978-1-7802-2769-6. Edizione in ebook del Kindle.
<https://leggi.amazon.it/kp/kshare?asin=B00IO29X2C&id=5egoapjdozfbti7oipq6qddq2me>

Paul D. Taylor, Aaron O'Dea. *La storia della vita in 100 fossili*. Sironi Editore, Milano, 2017, ISBN 978-88-518-0280-6

Giorgio Vallortigara. *Da Euclide ai neuroni. La geometria del cervello*. Lit Edizioni, 2017, ISBN 978-88-3282-186-4.

Wikimedia Commons. *Category:Fossils*

<https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Fossils>

Le categorie e sottocategorie riportate in questa pagina forniscono l'accesso a raccolte con migliaia di immagini di fossili.