

Astronomia Osservativa C
Introduzione all'Astrobiologia

Capitolo 3
Origine ed evoluzione della vita

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

1

Origine della vita

- **Abiogenesi**
 - L'approccio scientifico al problema dell'origine della vita consiste nell'ipotizzare una sequenza di processi spontanei, detta *abiogenesi*, che porta alla formazione dei primi organismi viventi a partire da composti chimici non biologici

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

2

Origine della vita terrestre

- Le considerazioni che faremo sono basate sull'ipotesi che la vita che conosciamo si sia originata sulla Terra
 - Tale ipotesi non è direttamente verificabile dal punto di vista sperimentale
- Alcuni autori ipotizzano che la vita che conosciamo si sia originata fuori dalla Terra
 - Non vi sono evidenze sperimentali a favore di questa ipotesi
 - Sappiamo che dallo spazio arriva materiale organico, anche complesso, ma non abbiamo evidenza di organismi viventi
 - Tale ipotesi presenta i seguenti svantaggi
 - Richiede un maggior numero di assunzioni
 - Non permette di avere un quadro di riferimento delle condizioni fisico/chimiche nelle quali avrebbe potuto aver luogo l'abiogenesi

Vincoli temporali sull'origine della vita terrestre

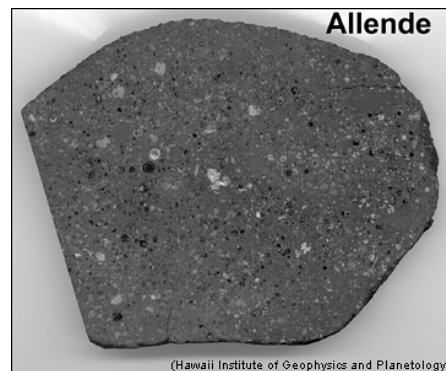
- Possiamo ottenere dei limiti temporali sull'epoca in cui dev'essersi originata la vita dal confronto delle cronologie
 - dei processi formativi della Terra
 - delle più antiche evidenze di vita trovate sulla crosta terrestre
- Tecniche di radiodatazione
 - È possibile datare con precisione l'età di formazione del Sistema Solare e della Terra mediante tecniche di radiodatazione
 - Si confrontano le abbondanze di radioisotopi con tempi di decadimento lunghi con le abbondanze dei loro prodotti di decadimento stabili
 - Esempi di radioisotopi con tempo di decadimento lungo
 - ^{238}U ($\tau=4.5 \times 10^9$ anni), ^{235}U ($\tau=7.0 \times 10^8$ anni)

Età di formazione del Sistema Solare

- Si può datare con precisione l'età di formazione del Sistema Solare dallo studio dei meteoriti
- Oggetto più antico del Sistema Solare: 4.57×10^9 anni
 - Meteorite Allende

classificato come CV

Caduto in Messico nel 1969



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

5

Età di formazione del sistema Terra-Luna

- Dalla radiodatazione di rocce terrestri e lunari
- Formazione sistema Terra-Luna
 - Luna: $\sim 4.50 \times 10^9$ anni
 - Crosta terrestre: $\sim 4.45 \times 10^9$ anni
- Ipotesi di formazione della Luna
 - Conseguenza dell'impatto della proto-terra con un embrione planetario
 - L'impatto avrebbe prodotto una nube di frammenti attorno alla Terra a partire dalla quale si sarebbe formata la Luna per condensazione
 - I modelli teorici indicano che la Luna si sarebbe formata ad una distanza di pochi raggi terrestri

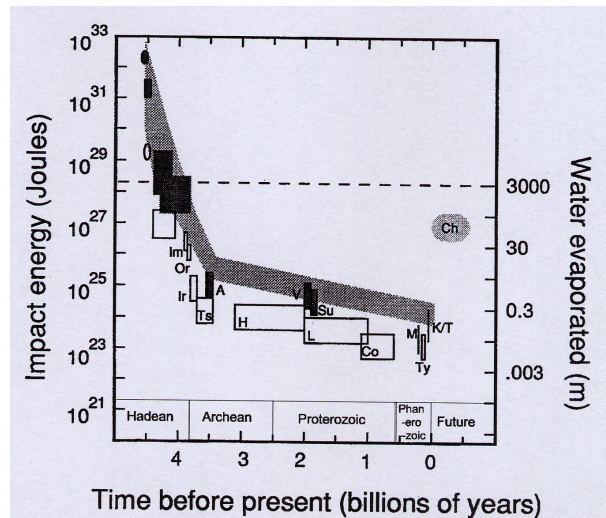


Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

6

Bombardamento meteorico tardivo “Late heavy bombardment”

- L'analisi dei crateri presenti sui corpi rocciosi del Sistema Solare interno rivela una lunga storia di impatti a partire dall'epoca della formazione del Sistema Solare
- L'analisi dei crateri lunari indica l'esistenza di un alto numero di impatti in un periodo successivo alla formazione del Sistema Solare
 - tali “bombardamento tardivo” deve aver avuto luogo anche sulla Terra, dove però non possiamo trovarne evidenze dirette
 - la frequenza ed intensità degli impatti diminuisce drasticamente tra 4.1 e 3.7 x 10⁹ anni
- Si ritiene comunemente che solo dopo il “Late Heavy Bombardment” la Terra abbia potuto avere condizioni adatte a sostenere la vita



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

7

Prime evidenze di vita sulla Terra

- Le evidenze più antiche della vita sulla Terra vengono cercate negli strati geologici più antichi della crosta terrestre
- È estremamente difficile trovare regioni di crosta terrestre antica a causa dell'attività tettonica che ricicla costantemente la crosta
- Non esistono tracce dei primi 500 milioni di anni
 - Inizialmente a causa della fusione della crosta dovuta all'impatto con l'embrione planetario e successivamente anche a causa del *late heavy bombardment*
- Esiste pochissimo materiale risalente a 4.0-3.5 miliardi di anni fa, molto alterato
- Il primo materiale di crosta ben conservato risale a 3.5-3.2 miliardi di anni fa

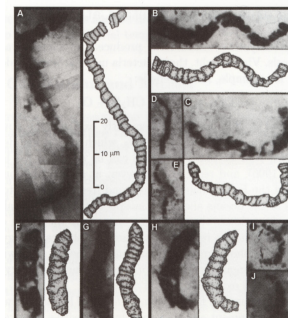
Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

8

- Le tracce di vita passata nella crosta terrestre più antica vengono dedotte mediante
 - Studio di rapporti isotopici che possono essere alterati biologicamente
Esempio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$
 - Evidenze morfologiche che suggeriscono un'origine biologica
Microfossili possono preservarsi grazie alla mineralizzazione della materia organica di origine biologica
- Tali metodi sono offrono indizi, piuttosto che conclusioni definitive in merito alla presenza di vita passata
 - I risultati vanno presi con una certa cautela

Prime evidenze di vita sulla Terra

- Le primissime (possibili) evidenze di vita datano a circa 3.8 miliardi di anni fa
 - Rocce sedimentarie nel sud-est della Groenlandia (Isua, Akilia)
 - Rapporto isotopico $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$
- Le prime evidenze (più convincenti) datano a circa 3.2 - 3.5 miliardi di anni fa
 - “Greenstone belts” in Australia (Pilbara) e Sud-Africa (Barbeton)
 - Rapporti isotopici di C e N
 - Microfossili
 - Sedimenti che suggeriscono la presenza di vita diffusa in acque poco profonde vicino al litorale



Finestra di tempo per la formazione della vita sulla Terra

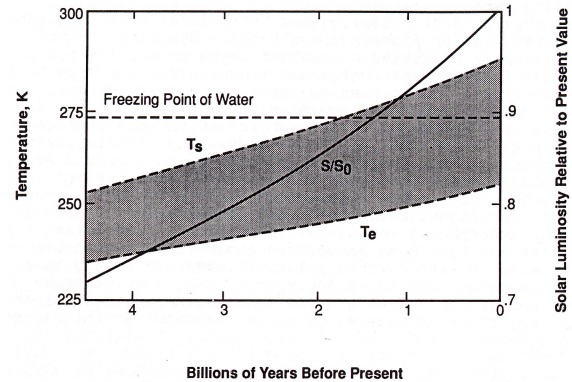
- La finestra temporale disponibile per la formazione della vita ha una durata di qualche centinaio di milioni di anni
 - Comunemente si considera l'intervallo tra la fine del *late heavy bombardment*, 3.9 Ga, e le date delle più antiche tracce biologiche convincenti, 3.5 Ga
 - Anche prendendo il valore più conservativo (3.5 Ga) è chiaro che la vita deve essersi originata prima
per aver avuto il tempo di sviluppare microrganismi già simili a quelli odierni e già diffusi

Condizioni ambientali all'epoca dell'origine della vita

- Lo studio delle condizioni fisico/chimiche della Terra primitiva di ci offre un quadro di riferimento per gli studi dei processi fisico/chimici che possono aver portato all'origine della vita
- Consideriamo brevemente i seguenti aspetti:
 - Temperatura superficiale
 - Origine e caratteristiche dell'atmosfera
 - Origine e caratteristiche degli oceani

Paradosso del Sole giovane debole Faint Young Sun paradox

- Il modello standard di evoluzione solare indica che il Sole avesse una luminosità del 30% inferiore di quella attuale al momento della formazione del Sistema Solare
- A tale luminosità corrisponderebbe una temperatura superficiale media della Terra ben inferiore al punto di congelamento dell'acqua
 - Ammettendo un'efficienza dell'effetto serra simile a quella attuale
- Vi sono però evidenze geologiche che l'acqua liquida fosse presente già 4.4 miliardi di anni fa



T_e – Temperatura effettiva di emissione della Terra
 T_s – Temperatura media superficiale della Terra
 La regione ombreggiata mostra la grandezza dell'effetto serra

Paradosso del Sole giovane debole Faint Young Sun paradox

- Possibili soluzioni del paradosso
 - Maggior efficienza dell'effetto serra?
atmosfera ricca di CO_2 e (probabilmente) CH_4
 - Maggior efficienza di sorgenti di calore interno?

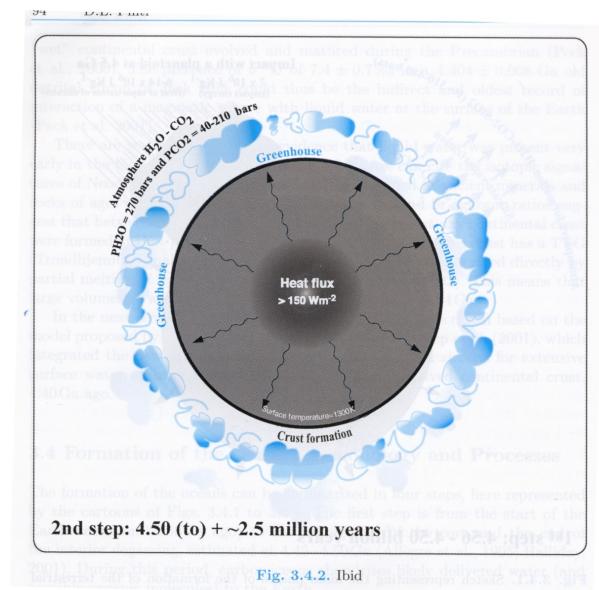


Fig. 3.4.2. Ibid

L'atmosfera primordiale

- Ogni eventuale atmosfera primaria deve essere andata perduta
 - Lo si deduce dall'impoverimento dei gas rari (^{20}Ne , ^{36}Ar , ^{84}Kr) nell'atmosfera attuale della Terra rispetto alle abbondanze cosmiche degli stessi elementi
- Le ipotesi sulla formazione dell'atmosfera presente, atmosfera secondaria, si collocano nell'ambito dei modelli di formazione della Terra, che sono cambiati nel tempo
 - Modello "vecchio"
 - Formazione "lenta" della Terra con un interno freddo ricco di volatili
 - Con il tempo l'interno viene riscaldato dal decadimento radioattivo e i volatili vengono liberati dalle emissioni vulcaniche
 - Questi gas vulcanici producono un' atmosfera primordiale altamente riducente contenendo H_2 , CH_4 , NH_3
 - Modello attuale
 - Formazione più rapida della Terra – 10-100 milioni di anni
 - Interno caldo privo di volatili in seguito agli impatti di corpi planetari
 - L' atmosfera primordiale alla fine del bombardamento meteoritico è debolmente riducente essendo dominata da CO_2 e N_2 con tracce di CO e H_2

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

15

Formazione degli oceani

- L'analisi di zirconi trovati nelle rocce sedimentarie delle Jack Hills (Australia) testimoniano la presenza di acqua liquida sulla Terra 4.4 miliardi di anni fa
- L'origine di questa acqua è ancora oggetto di dispute a sostegno di due diverse ipotesi
 - L'acqua e gli altri volatili sono stati liberati dall'interno della Terra al momento della sua formazione
 - Alcuni tipi di planetesimi hanno portato il grosso dell'acqua presente sulla Terra nello stadio finale della sua formazione
- Il confronto del rapporto D/H misurato negli oceani e in tali corpi planetari ci fornisce un criterio forte per la scelta fra possibili tipi di planetesimi (condriti carboniose idrate o comete)



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

16

Formazione dell'idrosfera

- Le comete, ricche di ghiaccio d'acqua, si formano nelle regioni più esterne del sistema solare
 - Il valore del rapporto D/H nelle comete è 2-3 volte superiore al rapporto trovato nelle acque degli oceani terrestri
- Le condriti carboniose, fra i corpi più primitivi del sistema solare, contengono una grande quantità di acqua
 - I loro rapporti D/H sono consistenti con quelli misurati nell'acqua degli oceani terrestri
- Questi sembrano suggerire che i meteoriti, piuttosto che le comete, possano avere contribuito in misura significativa alla formazione delle riserve d'acqua terrestri

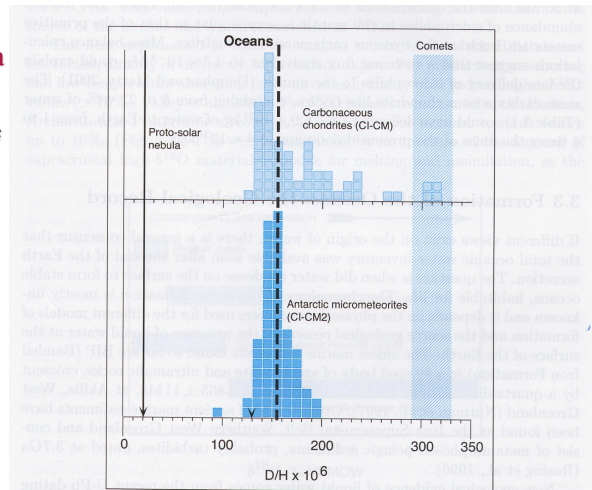
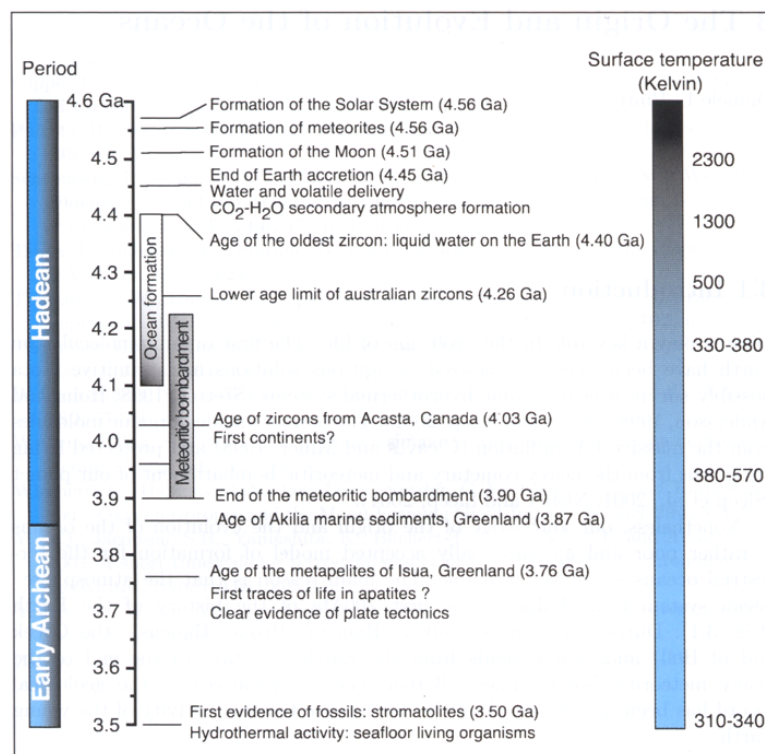


Fig. 3.2. Frequency distribution of the D/H ratios measured in carbonaceous chondrites and Antarctic micrometeorites compared to values for the PSN, Earth oceans and comets. Data: Déroule et al., 1991; Engrand et al., 1999; Maurette et al., 2000; Robert et al. 2000

- Ma il quadro sperimentale è lontano dall'essere chiarito: una recente misura di D/H in una cometa della fascia di Kuiper ha fornito un valore simile a quello degli oceani

Quadro sintetico di riferimento per gli studi dell'origine della vita sulla Terra



Studi sull'origine della vita

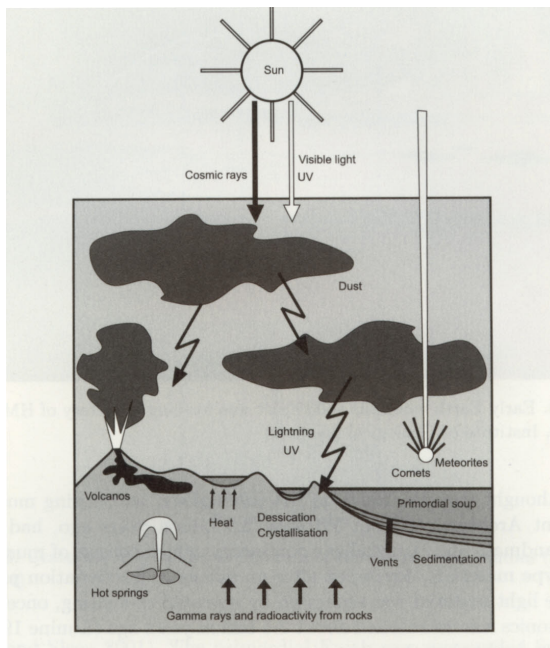
- Accenniamo ad alcuni delle tematiche su cui si concentra la ricerca scientifica sull'origine della vita
 - Sintesi di precursori biologici
 - Nascita delle funzionalità metaboliche e replicative
 - Caratterizzazione dei primi organismi viventi
- Si utilizzano due diversi tipi di approcci:
 - “bottom-up”
si cerca di ricostruire in laboratorio la complessità biologica a partire da costituenti non biologici
 - “top-down”
si cerca di ricostruire le caratteristiche delle forme di vita meno evolute a partire dalla conoscenza di quelle più complesse

Sintesi di precursori biologici

- Stadi dell'evoluzione chimica precedenti la vera e propria origine della vita
- Si studiano i possibili percorsi chimici di sintesi spontanea di materiale prebiotico che possano aver portato alla formazione delle prime macromolecole biologiche
 - Si cerca di capire quali molecole organiche siano particolarmente utili in tali percorsi chimici
- Esistono due possibili scenari per la sintesi di materiale prebiotico
 - Sulla Terra
 - Nello spazio

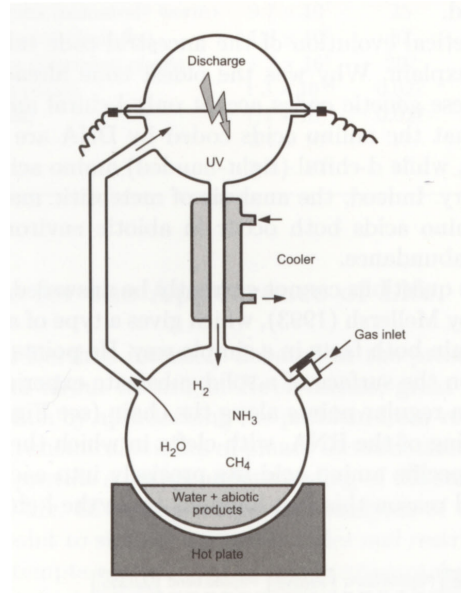
Materiale prebiotico sintetizzato sulla Terra

- Condizioni fisiche della Terra primitiva



➤ Esperimento di Urey-Miller

Formazione di amminoacidi a partire da materiale prebiotico

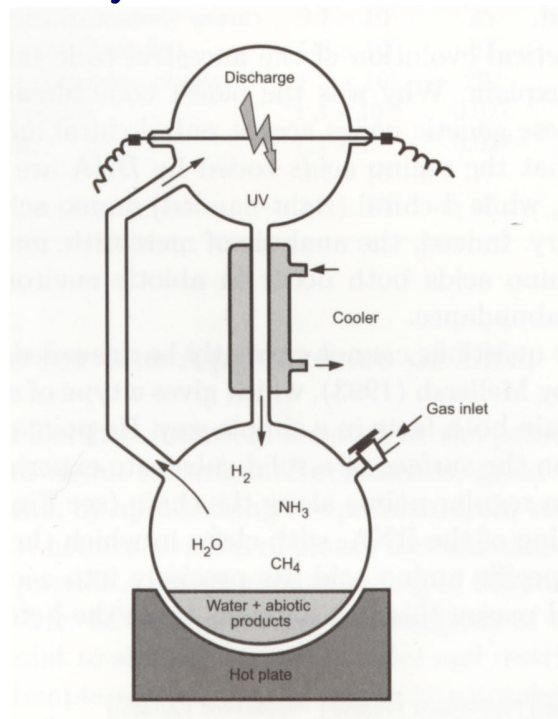


Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

21

Esperimento di Urey-Miller

- Nella prima versione si supposeva che l'atmosfera terrestre primordiale fosse fortemente riducente
 - Questo portava ad un'alta efficienza dell'esperimento nel produrre amminoacidi
- Versioni recenti dell'esperimento adottano un'atmosfera primordiale debolmente riducente, in linea con le conoscenze attuali
 - L'esperimento riesce ancora a produrre amminoacidi, ma con un'efficienza decisamente minore

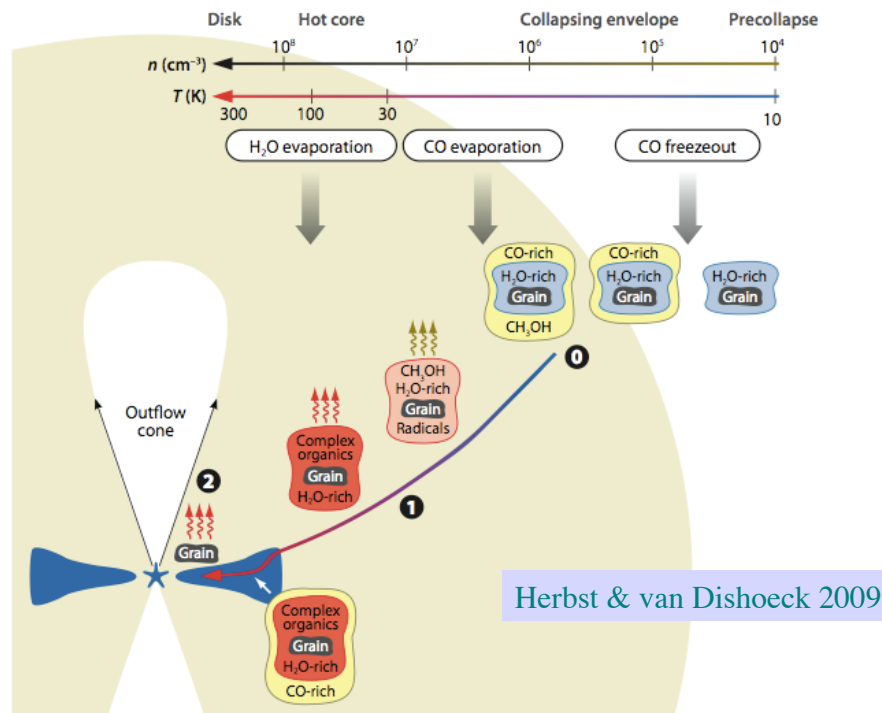


Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

22

Sintesi di materiale prebiotico nello spazio

Dalle nubi di molecolari alle fasi di formazione planetaria



23

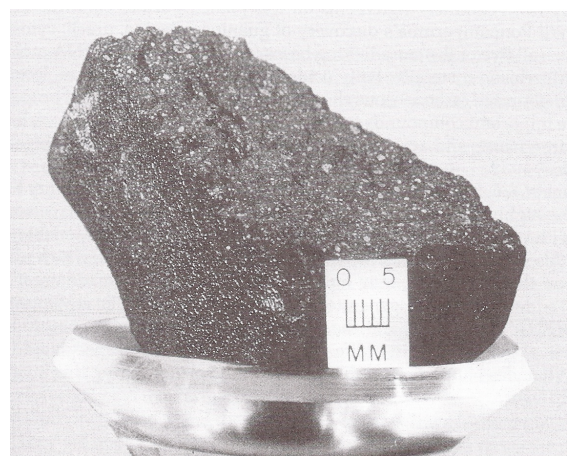
Materiale prebiotico portato dai meteoriti

- I meteoriti sono rappresentativi dell'epoca della formazione planetaria, sebbene meno primordiali delle comete
 - Mostrano evidenze di materiale organico complesso, di probabile origine interstellare
- In alcuni casi, come nel meteorite di Murchison (Australia, 1969) sono state trovate evidenze di amminoacidi e basi azotate

L'origine non terrestre di tali composti è confermata:

Gli amminoacidi biologici sono 11 su 74

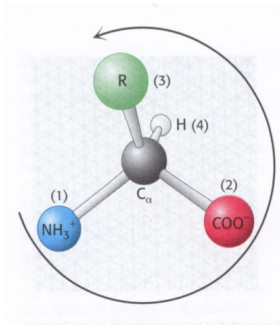
Gli amminoacidi appaiono, in gran parte, con entrambi gli enantiomeri L e D, ma c'è con un lieve eccesso di enantiomeri L



- Questa ed altre evidenze sperimentali indicano che materiale organico complesso può quindi essere stato portato sulla Terra dai meteoriti

Origine dell'omochiralità delle macromolecole biologiche

- L'origine della omochiralità resta da scoprire
 - Può gettar luce sull'origine della vita, o quantomeno sui percorsi chimici che hanno portato alla sintesi del materiale prebiotico
- È possibile che vi fosse un lieve eccesso di un enantiomero nel materiale prebiotico
 - Tale eccesso dovrebbe poi essere stato amplificato



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

25

Origine dell'omochiralità delle macromolecole biologiche

- Sono stati presi in considerazione tipi di effetti che possono portare a un eccesso enantiomerico
- L'ipotesi di un eccesso enantiomerico di origine astronomica viene presa in seria considerazione
 - A causa della scoperta di un lieve eccesso di enantiomeri L negli amminoacidi trovati nel meteorite Murchison
- **Possibile scenario interpretativo:**
 - Effetti di campo di radiazione interstellare circolarmente polarizzato che agisce durante la formazione delle molecole interstellari prebiotiche

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 3, Vladilo (2011)

26

Nascita delle funzionalità metaboliche e replicative

- **Problema di fondo**

- Nelle attuali cellule viventi le funzioni metaboliche e replicative sono svolte rispettivamente dalle proteine e dagli acidi nucleici
- Tali molecole sono strettamente dipendenti l'una dall'altra
 - Le sintesi degli acidi nucleici è catalizzata da enzimi
 - Le proteine che costituiscono gli enzimi sono sintetizzate utilizzando l'informazione contenuta negli acidi nucleici

- **Chi è nato prima?**

- Proteine o acidi nucleici ?
- Funzioni metaboliche o genetiche ?

- **Approcci seguiti per affrontare il problema**

- Nel passato: “Metabolism first” oppure “genes first”
- Attualmente: si cercano macromolecole che abbiano entrambe le proprietà

Il “mondo a RNA”

- Teoria attualmente in voga
- Termine coniato da Walter Gilbert (1986) a seguito della scoperta dei ribozimi
 - Molecole di RNA con proprietà catalitiche
- Secondo questa teoria il sistema genetico emerge per primo, ma ha capacità autocatalitiche
 - I ribozimi sarebbero una sorta di fossili molecolari dell'antico “mondo dell'RNA”
- Il mondo a RNA si sarebbe evoluto a quello attuale a causa dei vantaggi:
 - in termini di stabilità genetica
derivanti dall'introduzione del DNA
 - in termini di flessibilità
derivanti dall'introduzione delle proteine per svolgere le funzionalità metaboliche



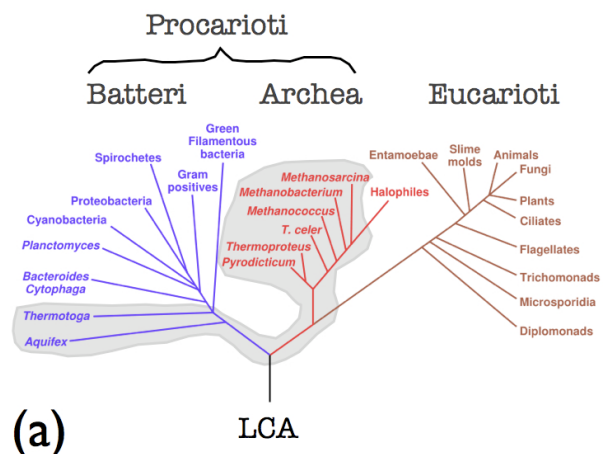
I primi organismi viventi

- In questo tipo di studi si segue l'approccio “top-down”
 - Dallo studio degli attuali organismi viventi cerchiamo di caratterizzare i primi organismi viventi, ripercorrendo all'indietro il cammino dell'evoluzione
- Uno dei metodi utilizzati è basato sul confronto di sequenze genetiche degli attuali organismi viventi
 - Da tale tipo di confronto è possibile ricostruire all'indietro il cammino evolutivo avvenuto a livello molecolare
 - Per visualizzare i risultati si costruisce un “albero filogenetico”, in cui la distanza tra diverse specie è proporzionale al grado di differenza trovato nelle sequenze genetiche

La ricerca dell'ultimo antenato comune

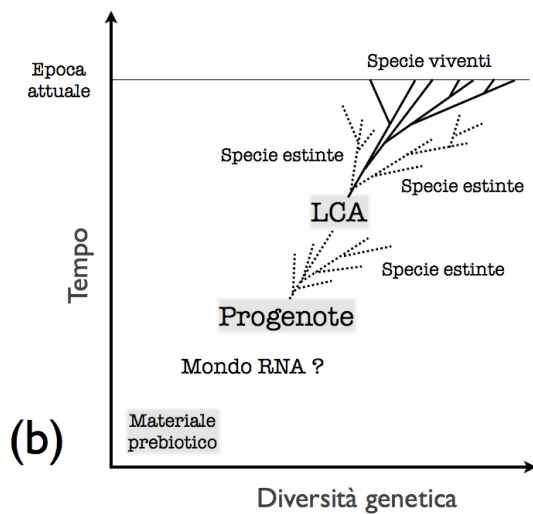
- L'albero filogenetico dà indicazioni sull'ultimo antenato comune di tutte le specie viventi
 - Last Common Ancestor
- In prossimità della “radice” si trovano Archea e Batteri termofili
 - La vita potrebbe essersi originata in ambienti di alta temperatura
 - Ad esempio nelle fumarole sottomarine dove troviamo tuttora archeobatteri

Le condizioni di tali ambienti potrebbero essere rimaste immutate nel corso del tempo



La ricerca dell'ultimo antenato comune

- Non è affatto detto che l'ultimo antenato comune sia rappresentativo delle primissime forme di vita
 - È plausibile che altre forme di vita, a noi sconosciute, abbiano preceduto l'ultimo antenato comune
 - Le primissime forme di vita si sono probabilmente estinte, così pure come gran parte delle specie da loro evolute
- L'interpretazione è complicata dalla presenza di “horizontal gene transfer”
 - Scambio di materiale genetico che sappiamo avvenire anche tra batteri



Abiogenesi nell'Universo

Considerazioni generali tratte dallo studio
dell'origine della vita terrestre

Scala di tempo e probabilità del processo di abiogenesi

- **Scala di tempo “breve” dell’origine della vita sulla Terra**

- Il fatto che sulla Terra la vita sembri essersi formata rapidamente viene talvolta preso come un’indicazione che la vita si formi facilmente purchè l’ambiente diventi abitabile

Non è però lecito saltare a questa conclusione: non bisogna confondere la velocità con cui accade un processo con la probabilità che tale processo abbia luogo

- L’ipotesi che la vita si origini con alta probabilità (purchè l’ambiente sia abitabile) può essere messa alla prova

Ad esempio cercando tracce di vita passata in ambienti ritenuti abitabili nel passato, come Marte

Oppure dallo studio della vita terrestre, che ci può dare indicazioni a questo riguardo

Lo studio della vita terrestre come diagnostico della probabilità del processo di abiogenesi

- **Fatto sperimentale**

- Tutte le forme di vita terrestre sono talmente simili a livello molecolare (omochiralità, codice genetico, ...) da suggerire che sia esistita un’unica abiogenesi

- **Implicazioni**

- Se, per ipotesi, il processo di abiogenesi avvenisse con alta probabilità in tempi brevi in qualsiasi ambiente abitabile ci aspettiamo che sulla Terra dovrebbero aver avuto luogo numerosi processi di abiogenesi negli ultimi 4 Ga
- Tali ipotetici processi di abiogenesi sarebbero avvenuti in maniera indipendente l’uno dall’altro e pertanto avrebbero potuto originare organismi con differenze significative a livello molecolare/genetico
- Tale conclusione è in contraddizione con l’impressionante grado di uniformità molecolare della vita terrestre

Come superare tale contraddizione ?

Esistono diverse possibilità:

- La vita che conosciamo dovrebbe continuamente eliminare altre forme di vita che man mano vengono originate
 - Spiegazione comunemente adottata, già ipotizzata da Darwin
- L'origine della vita è talmente deterministica da produrre esattamente il tipo di vita che conosciamo
- Microrganismi diversi da quelli che conosciamo esistono ma non sono ancora stati scoperti in quanto la vita microscopica terrestre rimane in gran parte inesplorata
 - Ipotesi della “shadow biosphere” di Paul Davies
- Le condizioni fisico/chimiche che hanno permesso l'abiogenesi sono state presenti solo in un primo periodo della storia della Terra
 - Alcune tappe del processo di abiogenesi potrebbero essere avvenute in un ambiente “non abitabile”

Ipotesi del “Panspermia”

Alcuni autori dubitano che un fenomeno così complesso come quello della vita possa essersi originato su scale di tempo brevi rispetto a quelle dell'evoluzione cosmica

Questa è una delle principali motivazioni addotte a sostegno dell'ipotesi che la vita si sia originata ben prima della formazione della Terra e sia ivi stata trasportata dallo spazio (ipotesi del “panspermia”)

Teoria della “panspermia”

Spore batteriche spinte dalla pressione di radiazione si diffonderebbero dallo spazio e avrebbero portato la vita sulla Terra

–S. Arrhenius (1908)

–F. Hoyle & C. Wickramasinghe (anni ‘60)

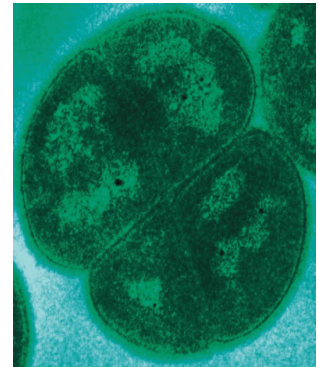
Argomenti utilizzati a sostegno dell’ipotesi

- Una quantità significativa di materiale organico può essere effettivamente giunta sulla Terra dallo spazio
- Esistono microrganismi in grado di sopravvivere all’ambiente spaziale (“Deinococcus Radiodurans”)

Ipotesi presa in considerazione solo in un ambito scientifico molto limitato

- Nessuna conferma sperimentale
- Feroci critiche dai biologi
- Accettarla equivale a spostare il problema dell’origine della vita in un luogo e un tempo imprecisati

In tal caso non esisterebbe un quadro di riferimento fisico/chimico per formulare una teoria dell’origine della vita



Evoluzione della vita

-Non esiste una linea di demarcazione netta tra “origine” ed “evoluzione” della vita

-Anche l’origine della vita, così come la sua evoluzione, è un insieme di processi che avvengono in tempi diversi

-Una volta che la vita si diffonde, ha un effetto forte sul proprio ambiente, arrivando a dominarne la chimica

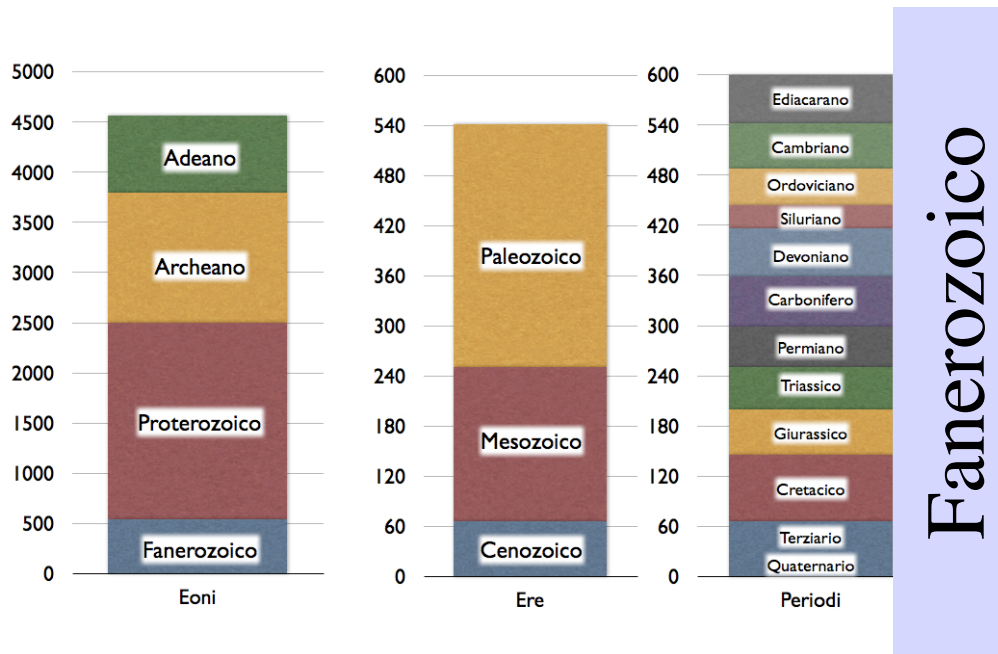
-Impossibile descrivere l’evoluzione della vita senza descrivere quella del proprio ambiente

-Per avere una visione d’insieme del quadro evolutivo occorre considerare in maniera unitaria l’ evoluzione della biosfera

Metodi di studio dell’evoluzione della vita terrestre

- **Principalmente basati sull’analisi degli strati geologici in cui si trovano le tracce dei fossili degli organismi viventi**
 - Mediante tecniche di radiodatazione si ottengono datazioni assolute degli strati (oltre che relative)
 - Lo studio geochimico degli strati permette:
 - di dedurre le condizioni ambientali in cui si trovavano a vivere gli organismi di cui troviamo le tracce dei fossili
 - di evidenziare, in certi casi, tracce di attività biologica passata anche quando non siano presenti fossili macroscopici
- **Basati anche su analisi filogenetiche**
 - Fondamentali per tracciare l’evoluzione a livello molecolare
 - Non permettono di ottenere una datazione assoluta

Scala dei tempi geologica



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

41

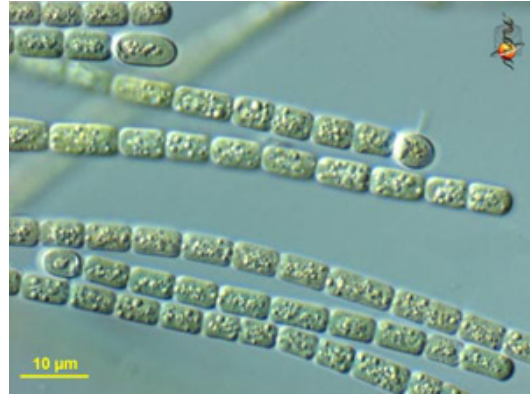
Principali tappe dell'evoluzione della vita terrestre

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

42

Nascita della fotosintesi

- **Fotosintesi**
 - Fonte di energia praticamente illimitata nel tempo
 - Enorme vantaggio evolutivo
- **I primi sistemi di fotosintesi già presenti attorno alla metà dell'archeano**
 - Sistemi prevalentemente anossigenici
 - non trovati nel dominio degli Archea
 - Batteri verdi (solfurei e non solfurei), batteri purpurei (solfurei e non solfurei)
- **La fotosintesi ossigenica era sicuramente presente 2.9 miliardi di anni fa, ma forse anche molto prima**
 - Cianobatteri

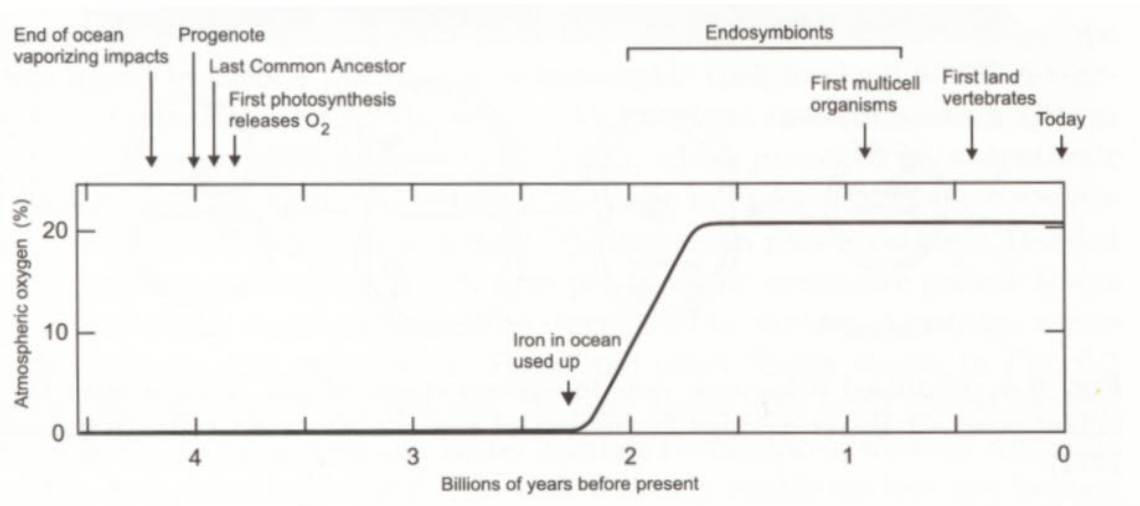


Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

43

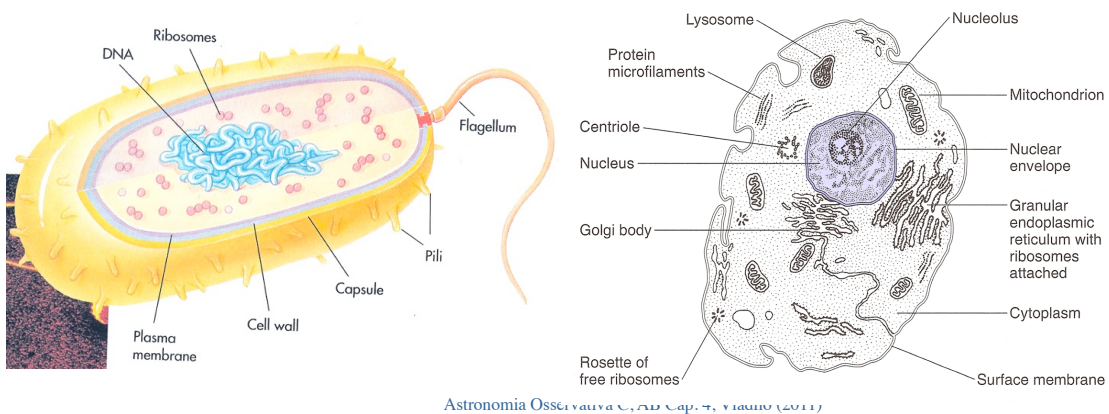
Il “great oxidation event”

- **L'ossigeno prodotto dalla fotosintesi viene inizialmente consumato dall'ossidazione dei minerali presenti sulla superficie terrestre**
 - Per un lungo periodo il livello di ossigeno atmosferico non aumenta
- **Tra 2.5 e 2.0 Ga c'è un aumento improvviso dell'ossigeno atmosferico**
 - Il livello si porta a ~1% PAL, per poi raggiungere ~10% circa 1.5 Ga



Evoluzione dell'organizzazione cellulare

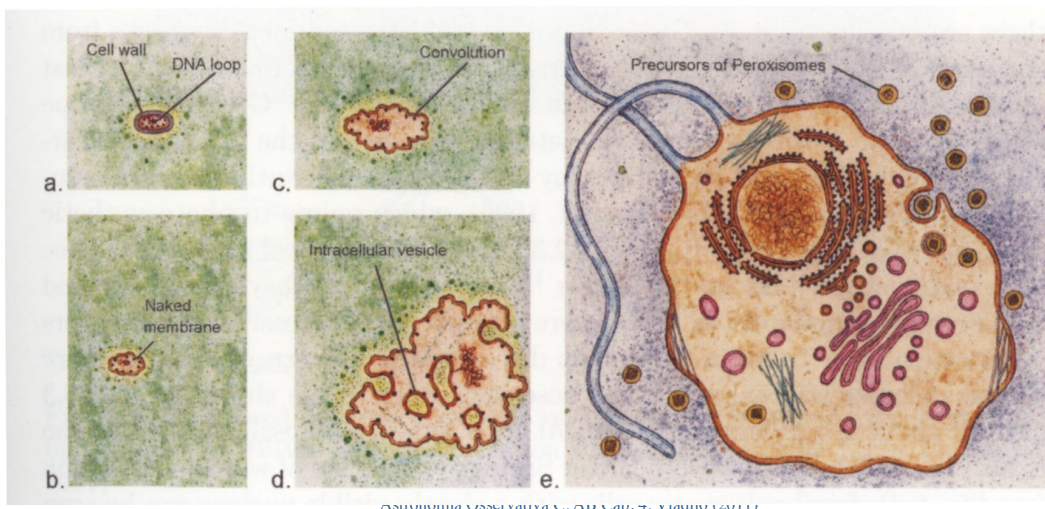
- Dalle cellule dei procarioti (archea e batteri) a quelle degli eucarioti
 - A differenza delle cellule dei procarioti, le cellule degli eucarioti
 - Racchiudono il proprio materiale genetico in un nucleo
 - Hanno organelli reminiscenti di batteri, con precise proprietà funzionali
- Esempi:
- cloroplasti** dai cianobatteri
 - mitocondri** dai batteri purpurei



45

Evoluzione dell'organizzazione cellulare

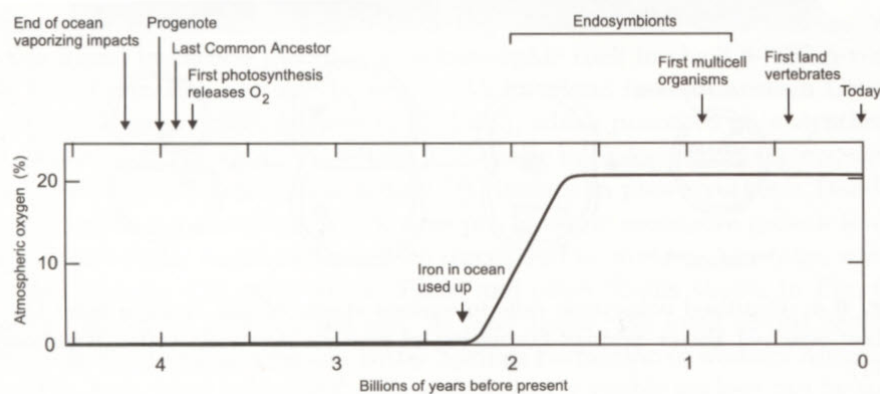
- Dalle cellule dei procarioti (archea e batteri) a quelle degli eucarioti
 - Gli organelli reminiscenti dei batteri sono interpretati come il prodotto di un fenomeno di **endosimbiosi**



46

Comparsa degli organismi pluricellulari

- Perchè nascano organismi macroscopici bisogna attendere lo sviluppo delle cellule eucariotiche
 - Le uniche che hanno dato luogo a organismi pluricellulari
- Esistono evidenze certe di eucarioti attorno a 2.6-2.7 Ga
 - Probabilmente presenti abbastanza tempo prima
- Organismi pluricellulari apparsi probabilmente attorno 1.0-0.8 Ga
- L'aumento del livello di ossigeno deve aver giocato un ruolo importante nello sviluppo di organismi pluricellulari
 - Il metabolismo ossigenico è più efficiente



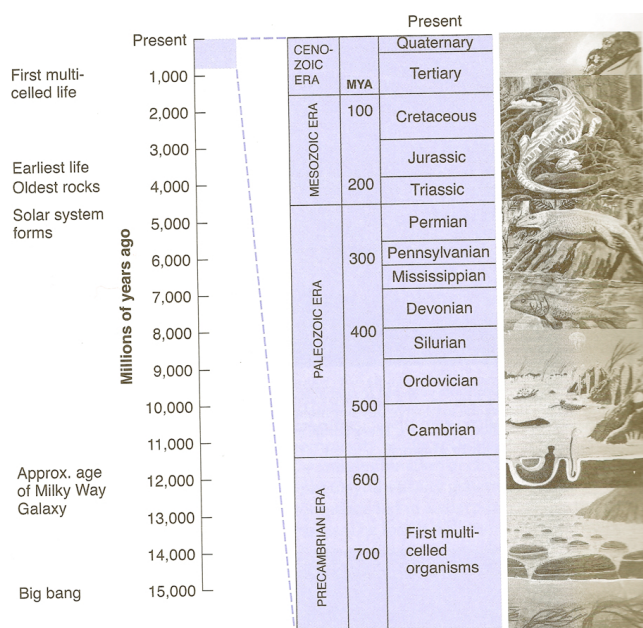
47

Evoluzione degli organismi macroscopici

- Circa 600 milioni di anni fa compaiono i primi organismi macroscopici
 - La loro formazione ha quindi richiesto all'incirca 3 miliardi di anni a partire dall'apparizione delle prime forme di vita



- Nel periodo Cambriano si sviluppano molto rapidamente tutte le specie attuali
 - Circa 540 Ma
- Gli organismi autocoscienti compaiono pochi milioni di anni fa
 - Circa 3 miliardi e mezzo di anni dopo i primi organismi unicellulari



I meccanismi dell'evoluzione

- **Selezione naturale**

- Gli individui di una popolazione con tratti genetici più adatti a sopravvivere a un determinato cambiamento ambientale hanno maggior capacità di trasmettere i loro tratti genetici a future generazioni
- Questo processo produce un graduale adattamento della popolazione al proprio ambiente; l'accumulazione nel corso del tempo dei tratti genetici così selezionati porta all'origine di nuove specie

- **Mutamenti genetici**

- La capacità di accumulare mutamenti genetici è uno degli ingredienti fondamentali dell'evoluzione

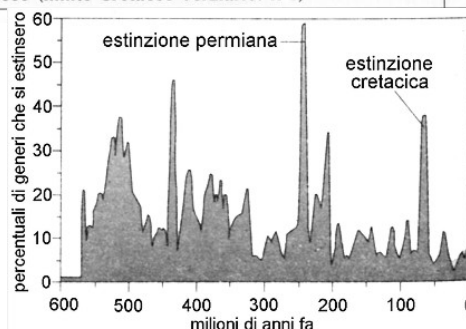
La natura di tali mutamenti a livello molecolare era sconosciuta ai tempi di Darwin

Oggi sappiamo che tali mutamenti possono avvenire grazie a mutazioni o ricombinazioni dei geni codificati nel DNA

Estinzioni di massa

- Le maggiori intervallate di circa 100 - 200 milioni di anni

Nome estinzione	Età (Ma)	Specie estinte
Precambriano	~650	~70%
Tardo Precambriano (periodo Vendiano)	~610	incerta
Inizio del Cambriano (limite Botomiano-Toyoniano)	510-530	incerta
Tardo Cambriano	490-510	incerta
Tardo Ordoviciano (limite Ordoviciano-Siluriano: O-S)	~440	~85%
Tardo Devoniano (limite Frasniano-Frammeniano: F-F)	~365	~72%
Permiano medio-sup. (Capitaniano-Wuchiapingiano: C-W)	~265	incerta
Fine Permiano (limite Permiano-Triassico: P-T)	~250	~90
Fine Triassico (limite Triassico-Giurassico: T-J)	~200	~80
Fine Cretaceo (limite Cretaceo-Terziario: K-T)	~65	~62



Fenomeni di origine astronomica che potrebbero aver causato estinzioni

Esplosioni di supernove vicine

- Entro ~ 10 pc dalla Terra l'esplosione di una supernova avrebbe effetti biologici catastrofici
 - Lo strato di ozono atmosferico verrebbe distrutto
 - La ionosfera potrebbe portarsi fino al livello del suolo
- Quanto spesso potrebbe succedere?
 - Circa una supernova ogni 300 milioni di anni entro ~10 pc di distanza
 - Considerate le incertezze, non possiamo sapere se una supernova vicina possa aver causato una delle estinzioni di massa degli ultimi 540 milioni di anni
 - Sicuramente alcune supernove con forti effetti biologici sono esplose durante i 3,5 miliardi di anni di evoluzione della vita sulla Terra



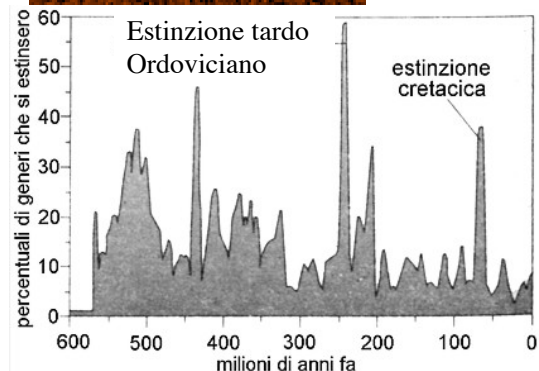
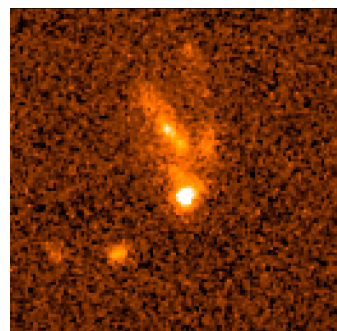
Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

51

Fenomeni di origine astronomica che potrebbero aver causato estinzioni

Esplosioni di Gamma Ray Burst nella Galassia

- Più rari, ma più energetici delle Supernove
 - Esplosione convogliata in un fascio collimato
 - Se ci si trova nella direzione del fascio gli effetti biologici possono essere distruttivi anche a distanze di 1 o 2 kpc
- L'estinzione del tardo Ordoviciano causata da un evento di questo tipo ?
 - Possibili indizi ...
 - Le specie sopravvissute provengono da acque profonde protette da radiazioni
 - Presenza di un periodo di glaciazione di difficile spiegazione, possibile conseguenza del raffreddamento dovuto alla opacità del NO₂
 - Transizione delle piante sulla Terra forse stimolata dall'eccesso di nitrati
 - ... ma non c'è consenso
 - Alcuni autori ritengono non possano esserci state esplosioni di Gamma Ray Burst relativamente vicine



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

52

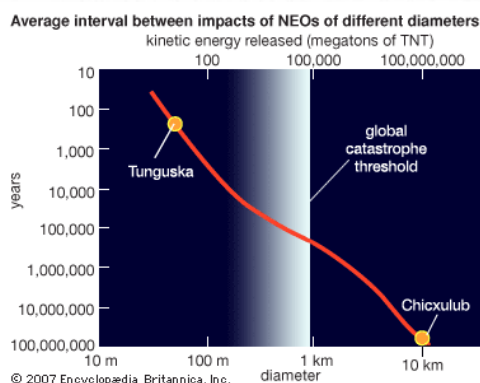
Fenomeni di origine astronomica che potrebbero aver causato estinzioni

Collisioni con corpi minori del Sistema Solare

- **Effetti climatici e biologici dell'impatto di un corpo di grandi dimensioni (~10 km)**
 - Nube di polveri su scala planetaria blocca la fotosintesi per vari mesi
 - Organismi dipendenti dalle piante nella loro catena alimentare si estinguono
- **Esistono esempi plausibili?**
 - C'è un certo consenso riguardo l'estinzione alla fine del Cretaceo
 - Strato ricco di iridio antico 65 milioni di anni trovato in molti siti terrestri
 - Non si escludono concause
 - Eruzioni vulcaniche concomitanti
- **Possono avere influito sull'evoluzione ?**
 - Molto probabile: più frequenti nel passato del Sistema Solare

Tab. 7.2 Età di grandi crateri da impatto trovati sulla Terra, in ordine decrescente di diametro.

Nome cratere	Età (Ma)	Diametro (km)	Località
Chicxulub	64,98	100	Yucatan (Messico)
Manicouagan	214 ± 1	100	Quebec (Canada)
Morokweng	145 ± 3	100	Sud Africa
Popigai	35 ± 5	100	Russia
Chesapeake Bay	35,5 ± 0,6	95	Virginia (USA)
Puchezh-Katunki	220 ± 10	80	Russia
Siljan	368 ± 1,1	55	Svezia
Tooonooka	128 ± 5	55	Queensland (Australia)
Charlevoix	357 ± 15	54	Quebec (Canada)
Kara-Kul	25	52	Tagikistan
Montagnais	50,5 ± 0,76	45	Nova Scotia (Canada)
Araguainha Dome	249 ± 19	40	Brasile
Carswell	115 ± 10	39	Saskatchewan (Canada)
Manson	65,7 ± 1	35	Iowa (USA)
Clearwater Lake West	290 ± 20	32	Quebec (Canada)



Evoluzione della vita nell'Universo

Lezioni tratte dalla vita terrestre riguardo:

- l'esistenza universale del fenomeno evolutivo,
- le sue caratteristiche di casualità/necessità,
- le sue scale di tempo
- la probabilità che l'evoluzione possa portare alla formazione di organismi di alta complessità, fino al livello dell'autocoscienza

La selezione naturale come fenomeno universale

- **Plausibile che il meccanismo della selezione naturale sia universale**
 - La selezione naturale può aver luogo indipendentemente dal modo in cui gli organismi organizzano o codificano il proprio patrimonio genetico
 - Darwin aveva dedotto la sua teoria dell'evoluzione, basata sulla selezione naturale, senza essere a conoscenza dei meccanismi che creano la diversità genetica a livello molecolare

“Caso e necessità” nell'evoluzione

I mutamenti genetici, che avvengono in maniera aleatoria, rappresentano il caso

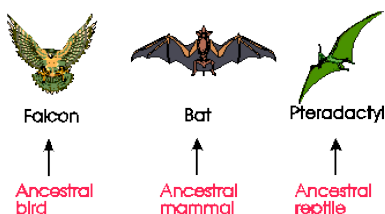
La selezione naturale, che filtra tali mutamenti, rappresenta la necessità

Convergenza evolutiva

- Specie diverse sono dette convergenti allorchè, sulla spinta delle stesse pressioni ambientali, si evolvono per selezione naturale sviluppando strutture ed abilità simili in maniera indipendente

– Esistono numerosi esempi di convergenza evolutiva comprovati dal confronto di caratteristiche morfologiche e genetiche

Un esempio classico è quello dello sviluppo delle ali, che è avvenuto in maniera indipendente varie volte nel corso dell'evoluzione



- La convergenza evolutiva introduce un elemento di determinismo (“necessità”) nell'evoluzione
 - Si presume che anche fuori dalla Terra uno stesso tipo di pressione ambientale (ad es. la necessità di volare) possa portare alla formazione di strutture analoghe sviluppate dalla vita terrestre (ad es. le ali)

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

57

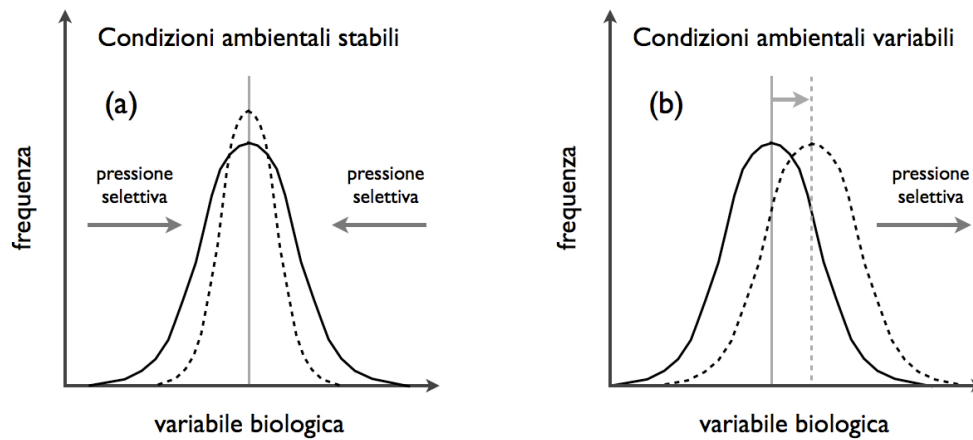
Scale di tempo dell'evoluzione della vita

- Quanto è universale la scala di tempo di ~ 4 Ga che è stata necessaria per arrivare a produrre organismi coscienti sulla Terra ?
 - Non potremo saperlo finchè non comprenderemo in profondità la storia delle singole tappe dell'evoluzione
 - Con che probabilità avvengono?
 - Che condizioni richiedono?
 - Con che scala di tempo avviene ciascuna tappa evolutiva?
- Capire le scale di tempo dell'evoluzione è essenziale per stimare la probabilità di esistenza di forme di vita coscienti fuori in altri pianeti
 - Ad esempio, se fosse
$$t_{\text{coscienza}}(\text{esobiologia}) \ll t_{\text{coscienza}}(\text{Terra})$$
La probabilità di esistenza di organismi coscienti nell'Universo sarebbe relativamente alta

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

58

Tasso di evoluzione e cambiamenti ambientali



- Il tasso di evoluzione sarà in generale correlato positivamente con la variabilità delle condizioni ambientali

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

59

Probabilità delle tappe evolutive

Per avere un'idea della probabilità con cui può aver luogo una determinata tappa evolutiva possiamo far riferimento alla frequenza con cui tale evento ha avuto luogo nell'arco dell'evoluzione della vita terrestre

- La comparsa di organismi pluricellulari è una delle poche tappe dell'evoluzione della vita terrestre che si è ripetuta più volte (animali, piante e funghi)
 - E' presumibile che tale tappa evolutiva potrebbe aver luogo con una buona probabilità in un'eventuale biosfera extraterrestre
- Varie importanti tappe evolutive della vita terrestre sembrano però aver avuto luogo una sola volta (in particolare, la nascita della coscienza e del linguaggio)
 - Sulla sola base di questo tipo di ragionamento non abbiamo idea con quale probabilità potrebbero aver luogo tali importanti tappe in un'eventuale biosfera extraterrestre

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 4, Vladilo (2011)

60

Dimensione e complessità degli organismi

Nonostante la crescita della complessità nel corso dell'evoluzione, la grandissima maggioranza degli organismi terrestri è rimasta di dimensione microscopica e con livello di organizzazione relativamente semplice

- Questo fatto non è casuale
 - Cellule di piccole dimensioni hanno rapporto superficie/volume ottimale per il proprio funzionamento
 - Gli organismi complessi richiedono un maggior consumo di energia, maggiori risorse ambientali e maggiore spazio
 - Gli organismi complessi hanno una minor flessibilità di adattamento a cambiamenti ambientali
- Ci aspettiamo che l'evoluzione porti a una prevalenza di organismi microscopici anche in altri pianeti

Conclusioni

- Dando per scontata la presenza di vita in altri pianeti, la frazione di organismi macroscopici sarà verosimilmente piccola, come nel caso della Terra, in quanto tali organismi
 - Richiedono una scala di tempo lunga per il loro sviluppo, accompagnata da condizioni di abitabilità continua
 - Stabilità stellare, orbitale, climatica
 - Sono poco adattabili dal punto di vista evolutivo a cambiamenti ambientali
- Dando per scontata la presenza di organismi complessi non sappiamo con quale probabilità l'evoluzione possa portare alla formazione di organismi autocoscienti
 - Se tale probabilità fosse bassa, la vita autocosciente potrebbe essere particolarmente rara nell'Universo