

Scuola Interdisciplinare Superiore per la Ricerca Interdisciplinare (SISRI)

***ORIGINS: le grandi domande sul cosmo, la vita e l'intelligenza
nella scienza, nella filosofia e nelle culture***

**L'origine della vita e le relazioni nell'organismo:
dalla chimica alla biologia**

30 ottobre 2021

Paolo Tortora

Università di Milano - Bicocca

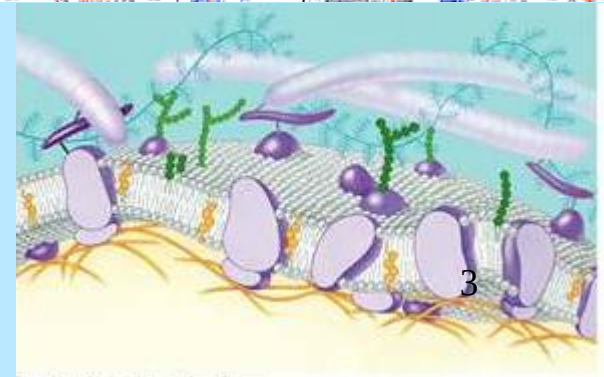
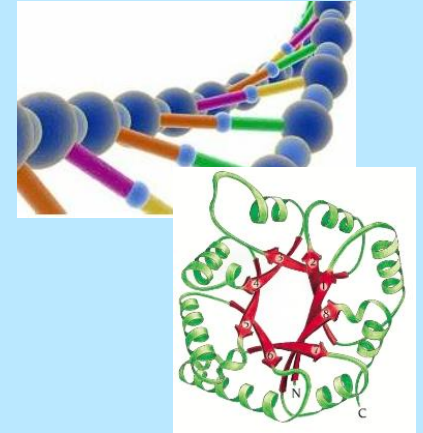


L'origine della vita: i punti nodali che l'indagine scientifica deve affrontare

- ☛ Investigare un evento **accaduto nel passato**. Si tratta nella sostanza di investigare la chimica del processo, anche se questo è il livello iniziale del problema. Come vedremo, ciò che compare è necessariamente l'esito di un processo chimico-fisico, ma è solo molto parzialmente riconducibile ad esso. In ogni caso, ciò richiede la conoscenza degli scenari chimico-fisici della Terra primordiale e dei loro sviluppi cronologici.
- ☛ **La natura del fenomeno vita** (il punto di arrivo). Si tende talvolta a minimizzare il fatto che **non ne abbiamo una comprensione piena**. Evidentemente, questa non è una osservazione marginale, dato che la comprensione della genesi della vita deve presupporre implica la comprensione della sua natura.

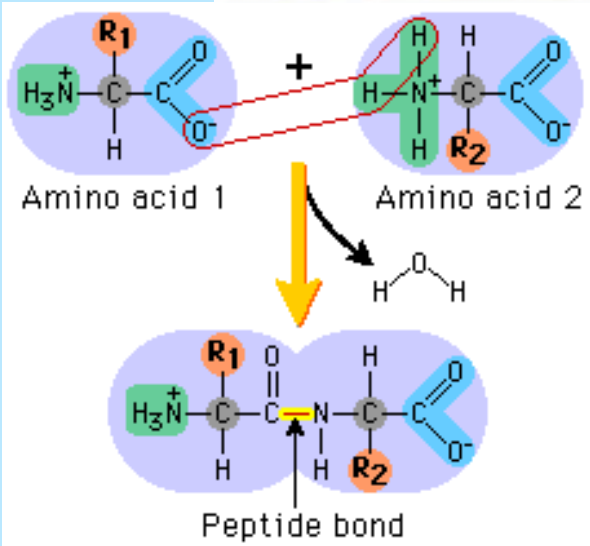
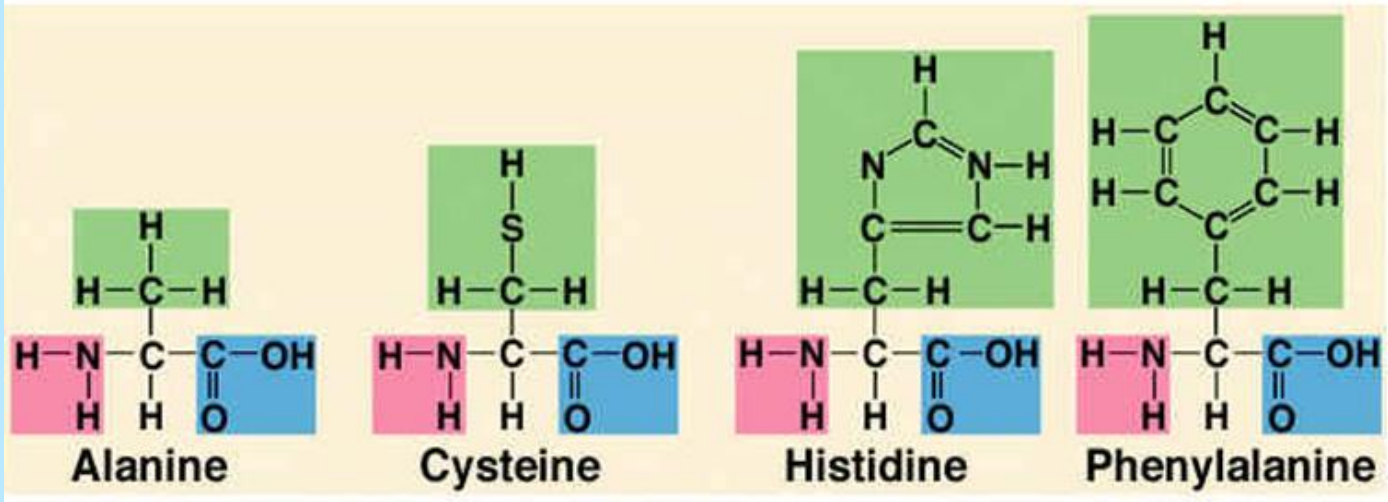
Il minimo indispensabile per la costruzione di un organismo elementare (unicellulare)

- Un deposito di informazione che contenga il progetto per la costruzione dell'organismo e che possa essere replicato in modo quasi invariante (di norma il **DNA**)
- I componenti del macchinario per il funzionamento dell'organismo (un ampio repertorio di **proteine**)
- Una rete di reazioni per la fabbricazione delle molecole necessarie e per l'ottenimento di energia necessaria alle differenti funzioni (**metabolismo**)
- Un sistema di confinamento dell'organismo per delimitarlo dall'ambiente (**membrana cellulare**: composta da un doppio strato lipidico, in determinate condizioni capace di autoassemblarsi)



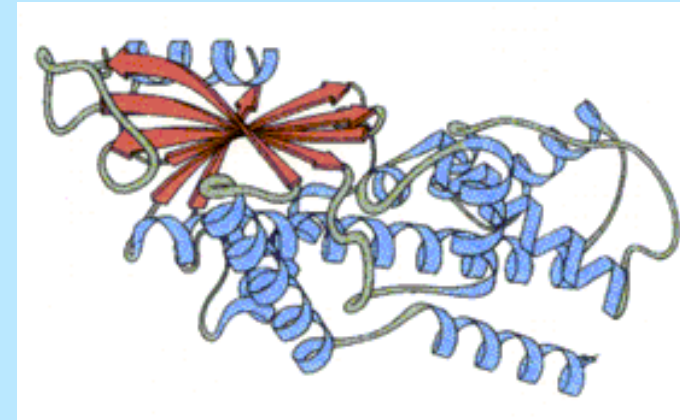
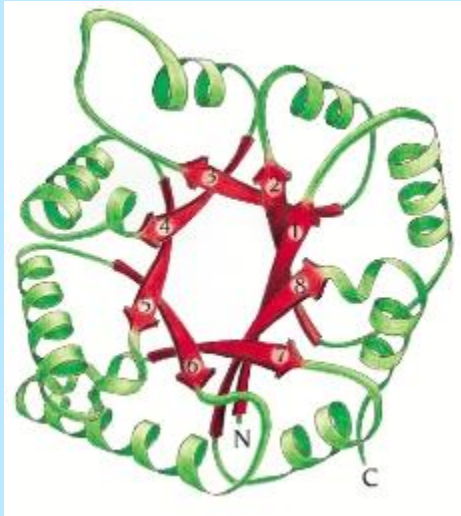
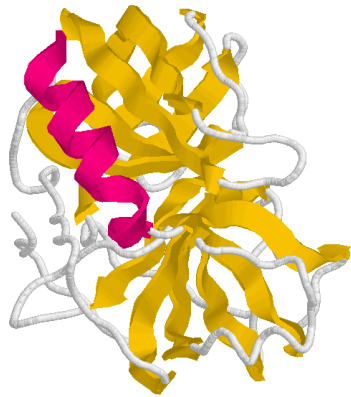
Le proteine: sono composte di unità elementari, gli **amminoacidi** che si uniscono a dare polimeri filiformi ma generalmente raggomitolati a dare strutture compatte. Sostengono tutte o quasi le funzioni biologiche.

Quattro dei venti amminoacidi che compongono le proteine

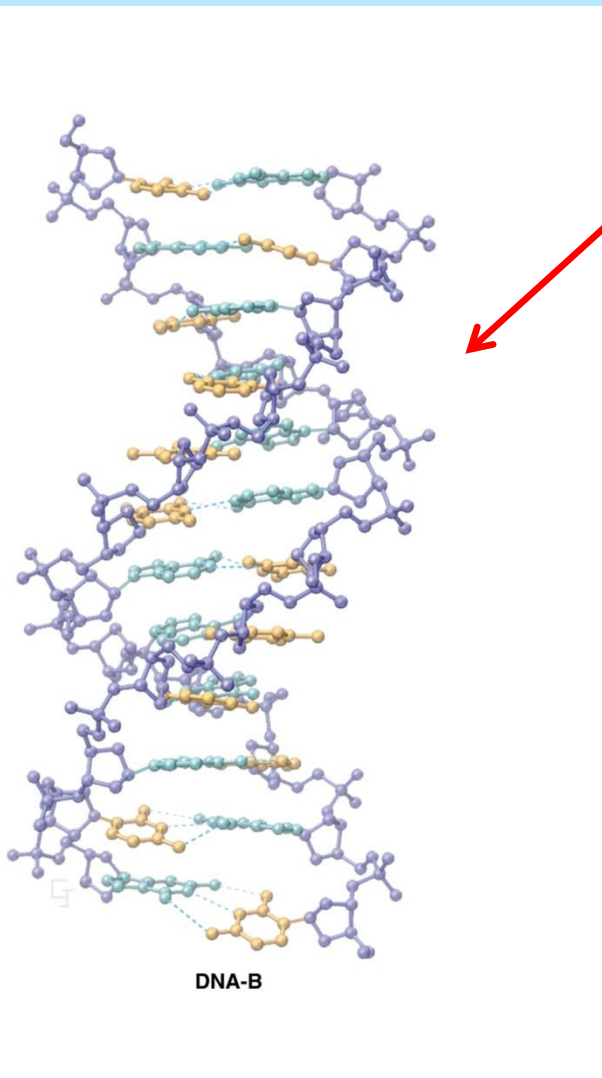


Gli amminoacidi condensano insieme formando un legame peptidico, formando così lunghi polimeri lineari, per l'appunto le proteine

Una rassegna di strutture proteiche secondo la rappresentazione convenzionale più frequentemente utilizzata

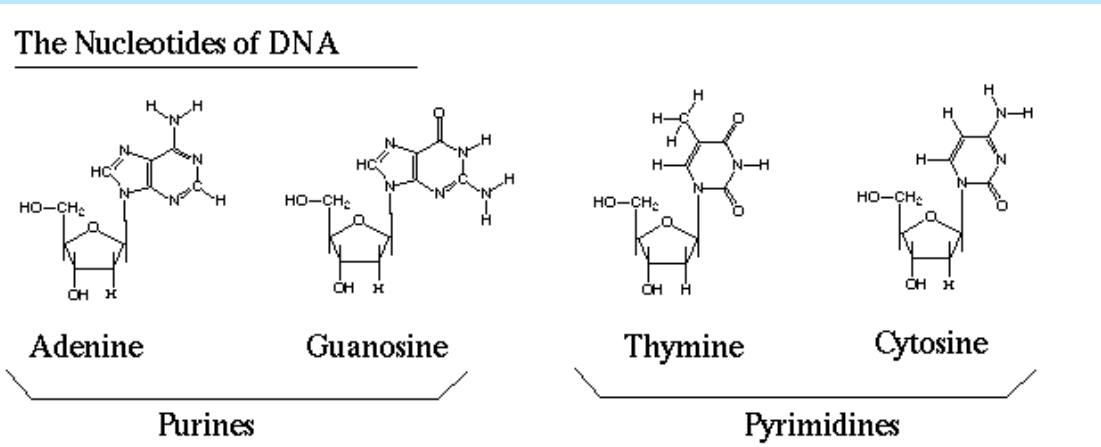


Acidi nucleici: polimeri filiformi di **nucleotidi (i blocchi di costruzione). Il principale ruolo è l'immagazzinamento dell'informazione per la produzione delle proteine**

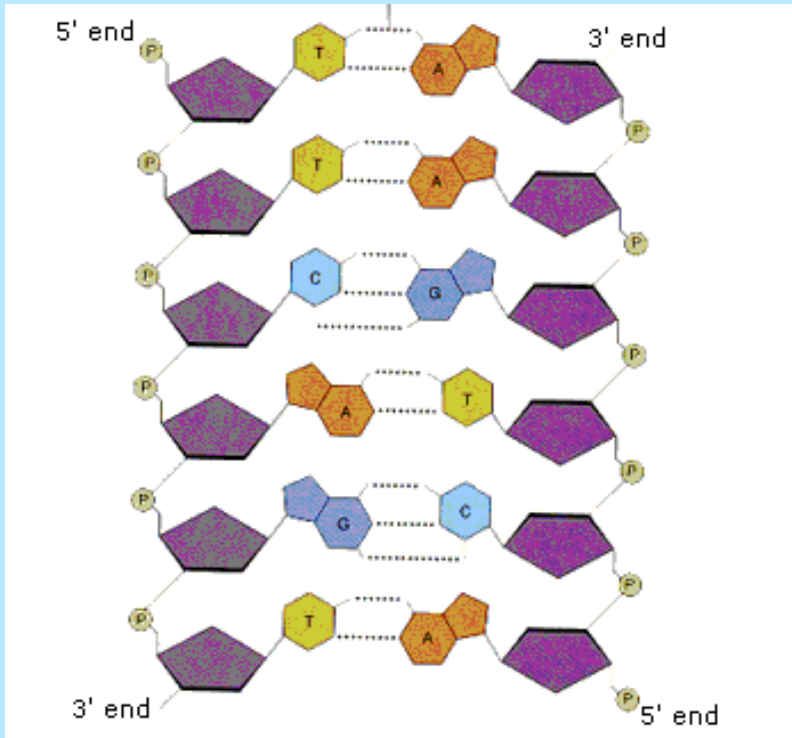


La struttura elicoidale a doppio filamento del **DNA** (**acido deossiribonucleico**), il principale depositario dell'informazione genetica. I **geni** sono tratti di DNA che normalmente codificano proteine.

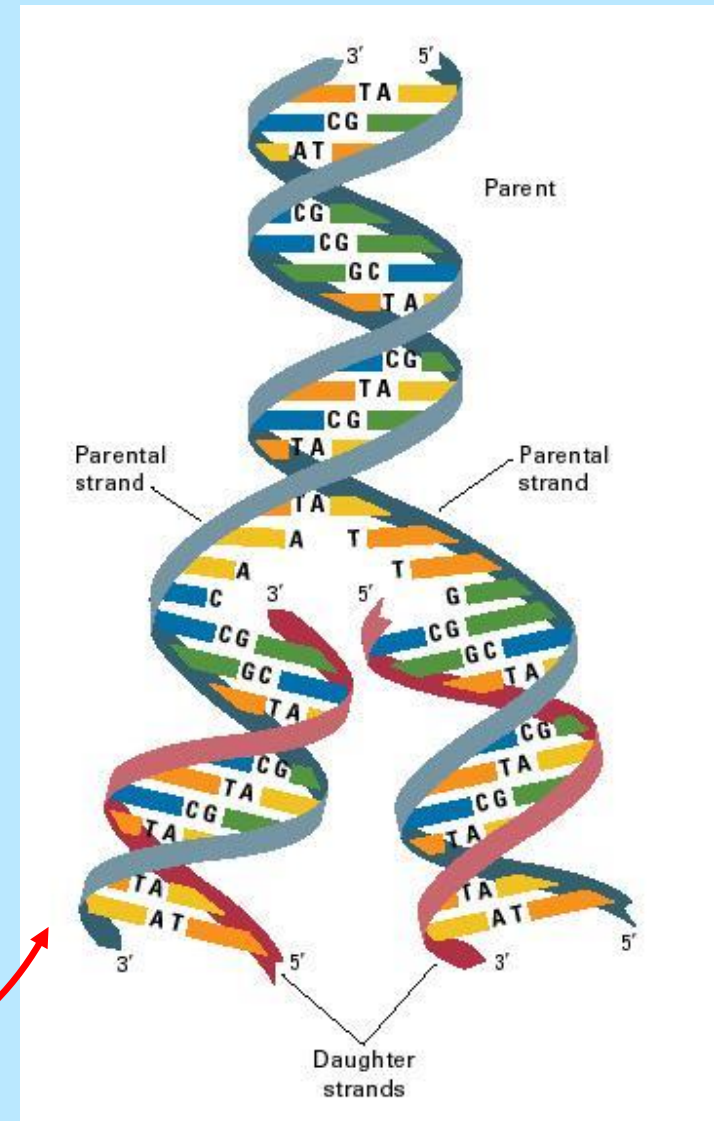
I quattro nucleotidi “canonici” che compongono il DNA (composti ciascuno di una diversa base azotata, dello zucchero deossiribosio e di un fosfato)



I due filamenti di DNA hanno sequenze *complementari*; vale a dire, le basi si appaiano in modo tale per cui una adenina (A) su un filamento si leghi mediante legami idrogeno con una timina (T) sull'altro filamento; una guanina (G) su un filamento si leghi mediante legami idrogeno con citosina (C) sull'altro filamento (sono le cosiddette regole di Chargaff)

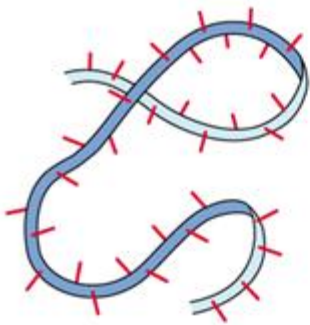


Questa struttura ha immediatamente suggerito a Watson e Crick che la proposero una modalità di replicazione del DNA. In effetti ciascuno dei due filamenti mantiene la stessa informazione (come sequenza di basi), sia pur in modo complementare. Di conseguenza, durante la replicazione ciascun filamento funge da stampo per la sintesi di un filamento complementare.

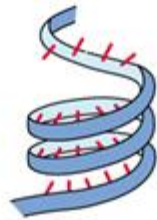


Un altro acido nucleico, l'**RNA** (acido ribonucleico) è strutturalmente molto simile al DNA, ma può presentare anche tratti a singola elica

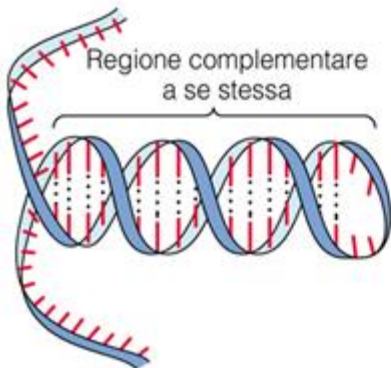
Al posto della timina, possiede una base leggermente diversa l'**uracile** (U), e al posto dello zucchero deossiribosio possiede il ribosio.



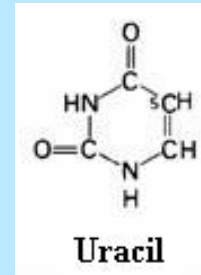
(a) Struttura ad avvolgimento casuale



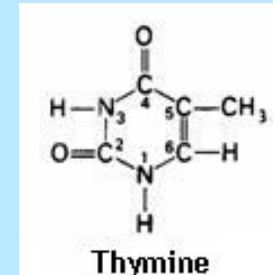
(b) Struttura con le basi impilate (elica a singolo filamento)



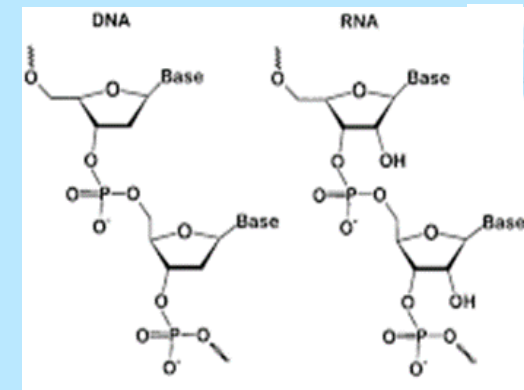
(c) Formazione di una forcina in una regione di autoappaiamento (doppia elica)



Uracil



Thymine



L'RNA ha un ruolo fondamentale nella **traduzione**, cioè nel processo di decodificazione dell'informazione contenuta nel DNA, che è alla base della sintesi delle proteine.

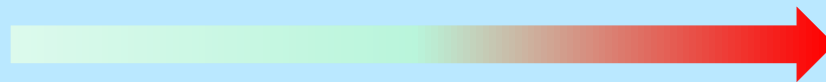
Le due fasi fondamentali del percorso

Chimica prebiotica

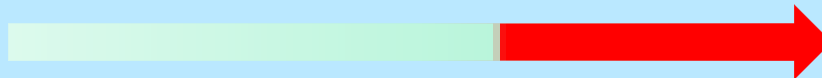
le prime semplici molecole organiche → blocchi di costruzione →

ABIOGENESI (molecole e sistemi biologici:
ca. 3,5-3,8 miliardi di anni fa)

→ macromolecole → cellule



*Evoluzione
molecolare graduale?*



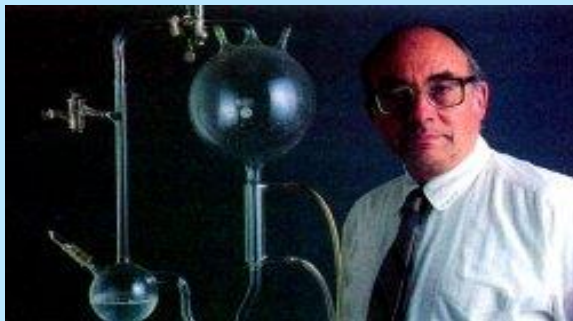
Discontinuità?

La chimica prebiotica

La chimica prebiotica è un evento ragionevolmente riproducibile in laboratorio (Stanley Miller e Harold Urey, 1953) e si osserva anche al di fuori della Terra, come dimostrato mediante analisi spettroscopiche degli spazi interstellari e analisi chimiche delle condriti carbonacee.

Prodotto	Formula	Produzione (N° di µmol)	Atomi di C in µmol	Atomi di C in µmol
Acido formico	$H - COOH$	2330	1	2330
Glicina *	$H_2N - CH_2 - COOH$	630	2	1260
Acido glicolico	$HO - CH_2 - COOH$	560	2	1120
Alanina *	$H_3C - CH(NH_2) - COOH$	340	3	1020
Acido lattico	$H_3C - CH(OH) - COOH$	310	3	930
β-Alanina	$H_2N - CH_2 - CH_2 - COOH$	150	3	450
Acido acetico	$H_3C - COOH$	150	2	300
Acido propionico	$H_3C - CH_2 - COOH$	130	3	390
Acido iminodiacetico	$HOOC - CH_2 - NH - CH_2 - COOH$	55	4	220
Acido diaminoacetico	$H_3C - NH - CH_2 - COOH$	50	3	150
Acido α-amino-n-butirico	$H_3C - CH_2 - CH(NH_2) - COOH$	50	4	200
Acido α-idrossi-n-butirico	$H_3C - CH_2 - CH(OH) - COOH$	50	4	200
Acido succinico	$HOOC - CH_2 - CH_2 - COOH$	40	4	160
Urea	$H_2N - CO - NH_2$	20	1	20
N-Metilurea	$H_2N - CO - NH - CH_3$	15	2	30
N-Metilalanina	$H_3C - CH(NH - CH_3) - COOH$	10	4	40
Acido glutammico *	$HOOC - CH_2 - CH_2 - CH(NH_2) - COOH$	6	5	30
Acido aspartico *	$HOOC - CH_2 - CH(NH_2) - COOH$	4	4	16
Acido α-aminoisobutirico	$H_3C - C(CH_3)(NH_2) - COOH$	1	4	4
		Tot. 4916		Tot. 8944

(* = Amminoacidi proteinogeni)



Stanley Miller (1930-2007)



Alcune osservazioni di metodo

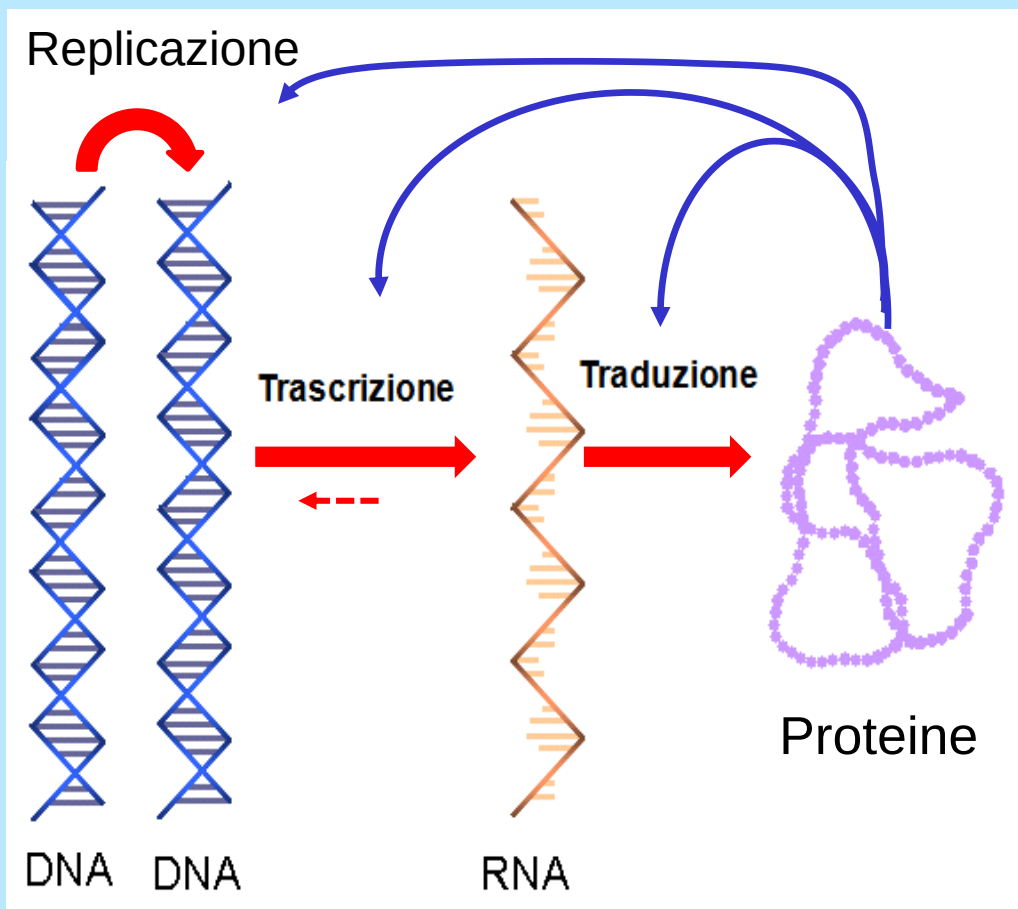
- Le forme viventi (anche le più elementari, come vedremo poco oltre) sono realtà **incomparabili rispetto alla semplice chimica prebiotica** (non solo per complessità ma anche perché portatrici di informazione).
- Almeno dal nostro attuale punto di osservazione, il passaggio da non vivente a vivente è un evento puntuale (e forse anche unico). In altre parole, **non si riscontrano "forme intermedie" tra vivente e non vivente.**
- Assistiamo così a un "salto di qualità", avvenuto in passato (3,5-3,8 miliardi di anni fa), prodotto di un'**evoluzione chimica**, e che nessuno ha potuto riprodurre.
- L'investigazione scientifica deve così confrontarsi con un problema che preclude l'utilizzo ordinario degli strumenti fondamentali di cui essa si avvale: l'**osservazione** e la **riproducibilità** dell'esperimento.

Un confronto tra evoluzione chimica e evoluzione biologica

- Anche l'evoluzione biologica è un evento del passato, sebbene permanentemente in atto fino ad oggi. Ciò nondimeno, siamo in grado di monitorarne con una certa attendibilità il progresso, soprattutto grazie ad indagini molecolari (in particolare analisi di sequenze di DNA e di proteine).
- **L'evoluzione biologica è infatti un *continuum***, sia pur attraverso percorsi complessi e tortuosi, che ha lasciato tracce nelle molecole degli organismi attualmente esistenti.

Dove è, allora, l'aspetto più problematico nell'abiogenesi?

- I sistemi viventi, anche i più semplici, si sostengono grazie a una intricatissima **rete di interazioni tra i vari componenti** e classi di molecole, così che per la funzione del macchinario tutte (o molte) sono indispensabili ad un tempo.



- L'esempio forse più rappresentativo di questo concetto è il **cosiddetto dogma centrale della biologia molecolare**: il DNA viene trascritto nell'RNA che veicola una informazione codificata per la sintesi di proteine (traduzione). Ma un repertorio di proteine è indispensabile per sostenere trascrizione e traduzione.

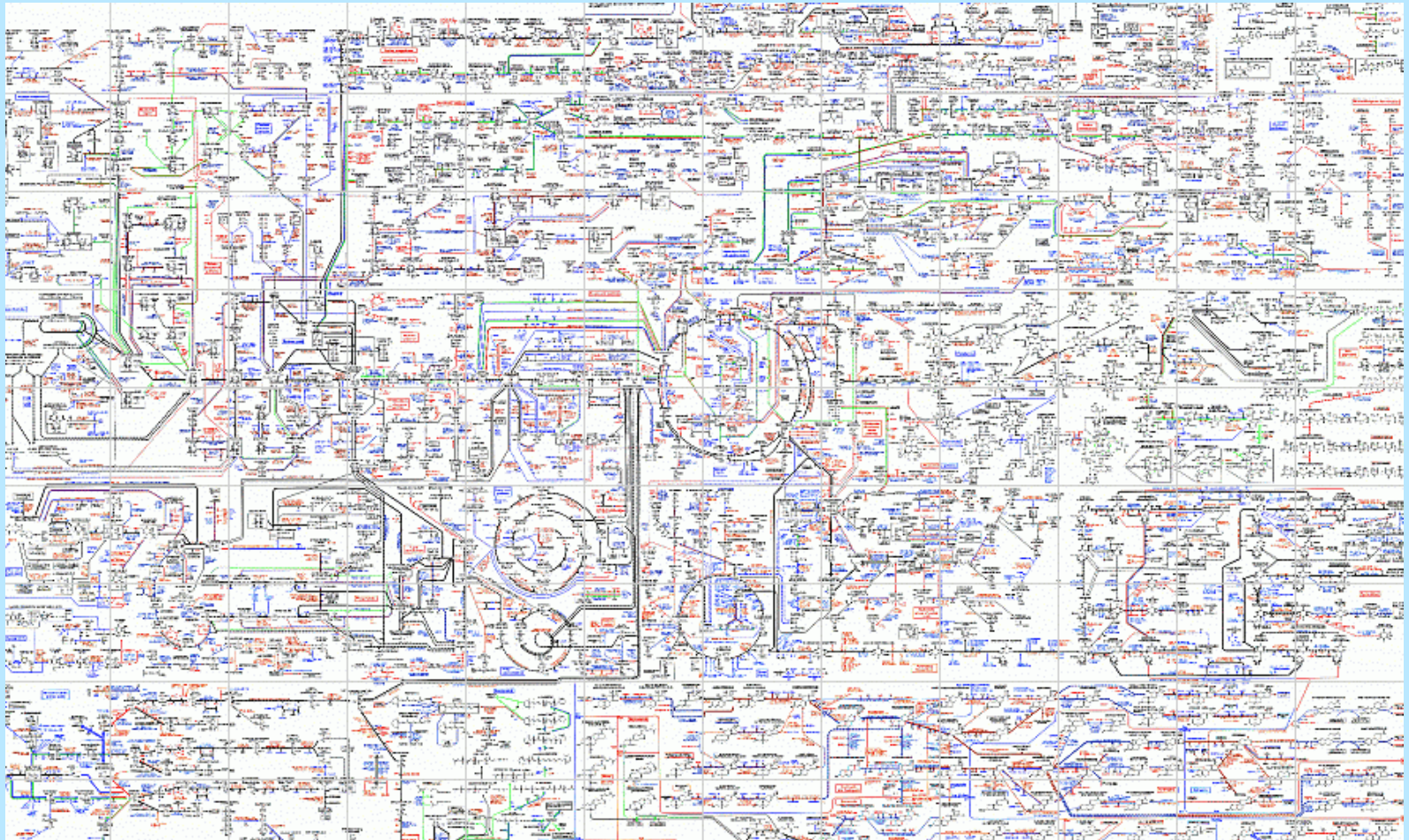
Il codice genetico contiene l'informazione necessaria per convertire la sequenza in basi del DNA in sequenza in amminoacidi delle proteine

Il DNA immagazzina (in forma lineare) l'informazione per la sintesi delle proteine (esse stesse polimeri lineari) codificandola mediante una specifica sequenza di tre nucleotidi per ogni amminoacido.

		Second Letter				
		U	C	A	G	
1st letter	U	UUU Phe UUC UUA Leu UUG	UCU UCC Ser UCA UCG	UAU Tyr UAC UAA Stop UAG Stop	UGU Cys UGC UGA Stop UGG Trp	U C A G
	C	CUU CUC Leu CUA CUG	CCU CCC Pro CCA CCG	CAU His CAC CAA Gln CAG	CGU CGC Arg CGA CGG	U C A G
	A	AUU AUC Ile AUA AUG Met	ACU ACC Thr ACA ACG	AAU Asn AAC AAA Lys AAG	AGU Ser AGC AGA Arg AGG	U C A G
	G	GUU GUC Val GUA GUG	GCU GCC Ala GCA GCG	GAU Asp GAC GAA Glu GAG	GGU GGC Gly GGA GGG	U C A G

Le reti metaboliche: un altro straordinario esempio di interazione tra componenti diversi alla base di funzioni biologiche essenziali

Questa figura rappresenta una parte delle trasformazioni chimiche promosse da enzimi (proteine a funzione catalitica) le quali nel loro insieme garantiscono la sintesi di tutti i composti necessari per la costruzione di nuove cellule e per l'approvvigionamento energetico necessario per il sostegno di tutte le loro funzioni.



Il dogma centrale della biologia molecolare e il caso delle reti metaboliche sono alcuni tra i molti esempi possibili che mettono in evidenza un problema chiave e ineludibile legato alla comparsa degli organismi a seguito dell'evoluzione molecolare:

È difficile (anche se non necessariamente impossibile) immaginare un processo evolutivo che porti alla comparsa di una classe di molecole biologiche per volta (es. prima DNA e poi proteine, o viceversa). Infatti tutti i componenti molecolari, qualsiasi sia la loro natura chimica, debbono cooperare interagendo tra loro in modo perfettamente coordinato.

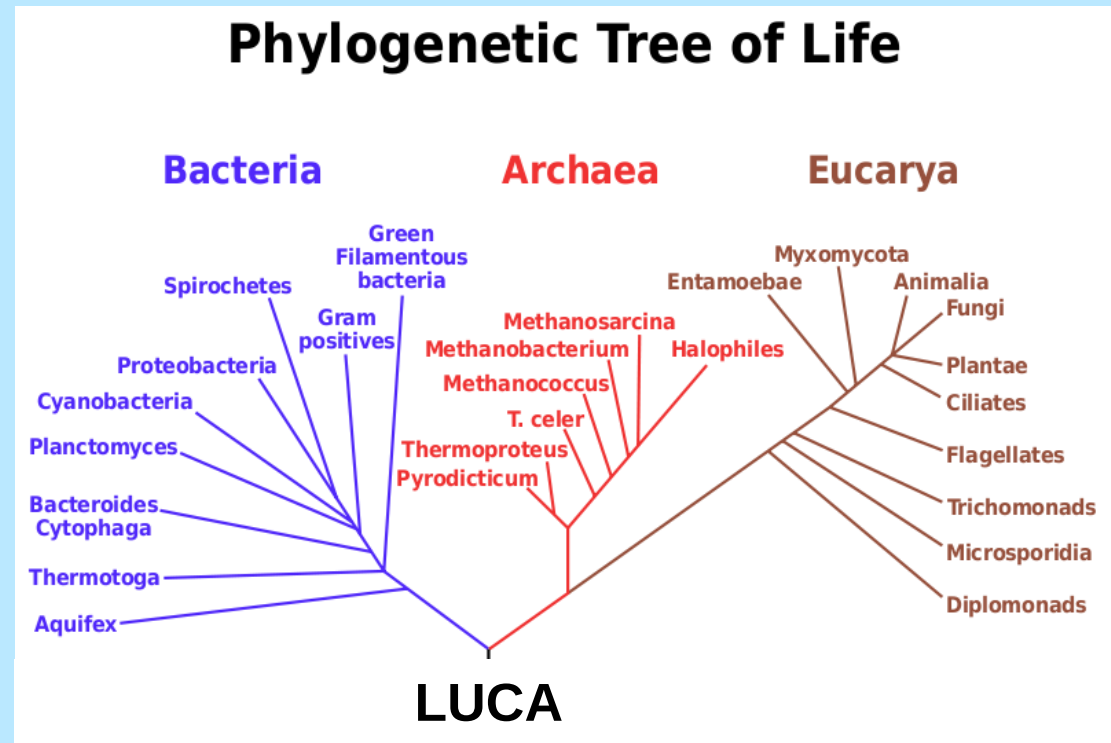
→ come analogia della genesi di un sistema vivente non si può prendere ad esempio la costruzione di un edificio o di una macchina, perché questi possono essere assemblati pezzo per pezzo, mentre un sistema vivente richiede fin dall'inizio la presenza contemporanea di tutti (o quasi) i pezzi per sostenere tutte le sue funzioni.

La prima forma di vita era unicellulare, ma a livello molecolare aveva una complessità paragonabile a quella degli organismi più evoluti

Tutte le evidenze molecolari portano alla conclusione che tutti gli organismi discendono da un **unico** progenitore. Questo microrganismo ipotetico è stato denominato **LUCA** (**L**ast **U**niversal **C**ommon **A**ncestor). Ciò equivale a dire, in altre parole, che **il mondo biologico è monofiletico**.

È stato ricostruito un identikit, del LUCA: a livello molecolare, esso sembrerebbe molto simile ai microrganismi presenti oggi, possedendo, in particolare, DNA, RNA, proteine, codice genetico, reti metaboliche, oltre a meccanismi di replicazione del DNA, trascrizione e traduzione in tutto paragonabili a quelli odierni.

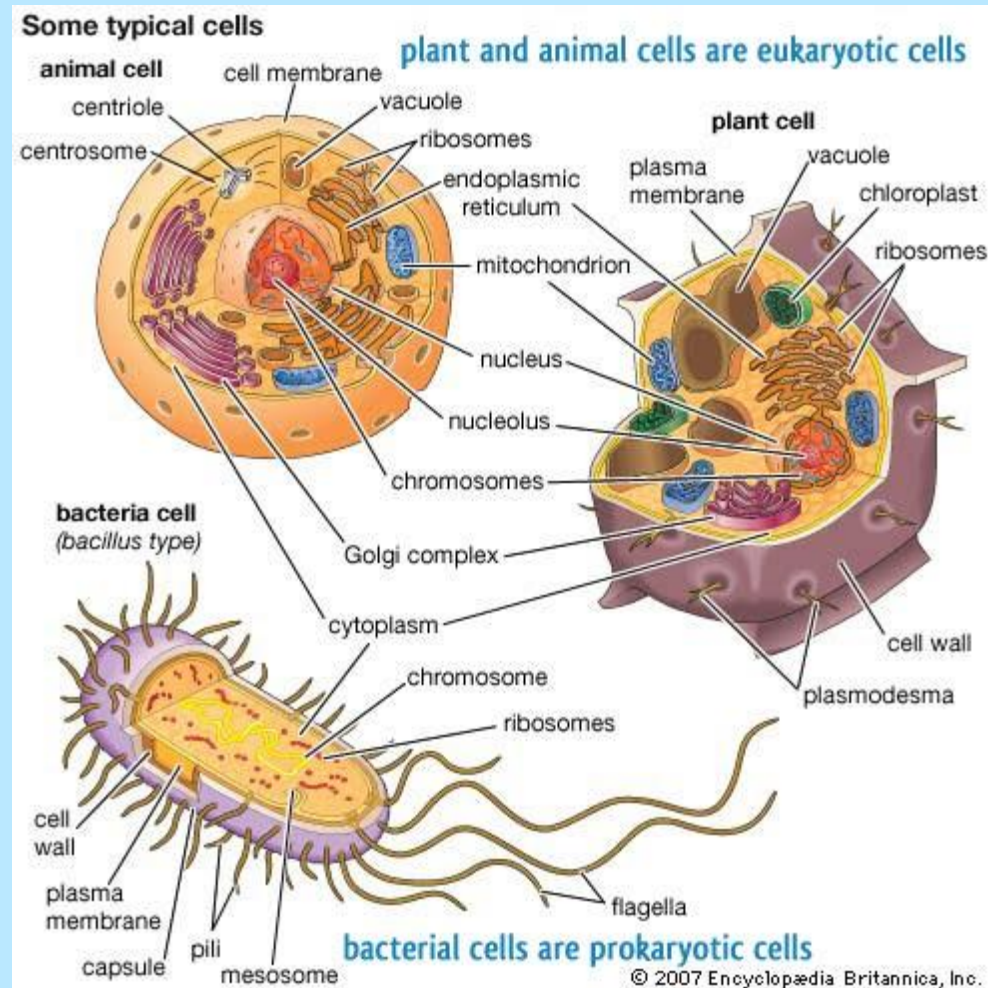
In breve: almeno dal nostro punto di osservazione sembra che **il nucleo essenziale della complessità del mondo biologico emerga fin dal primo momento e non venga acquisita per gradi**. Anche questa osservazione suggerisce una **discontinuità** nel processo di abiogenesi.



Cellule procariotiche e cellule eucariotiche

Procariotiche (archibatteri ed eubatteri): nessuna compartimentazione; dimensioni attorno a 1-2 μm

Eucariotiche:
compartimentate; dimensioni attorno a 10-20 μm . Proprie di tutti gli organismi pluricellulari



Come si sono sviluppati storicamente i tentativi di chiarire (o ricostruire) l'abiogenesi

- Il limite più evidente in tutte le teorie è che esse hanno affrontato un aspetto per volta, trascurando così il problema fondamentale, vale a dire le modalità con cui le varie componenti hanno interagito tra di loro nel corso del processo, autoassemblandosi.
- Le teorie proposte risentono in modo decisivo delle conoscenze biologiche (e in parte anche geologiche) disponibili all'epoca della loro formulazione. Pertanto esse riflettono soprattutto lo sviluppo del pensiero scientifico al tempo di ciascuna di esse: è molto più sulla base del progresso delle conoscenze che non di specifiche sperimentazioni che le teorie si sono affinate.



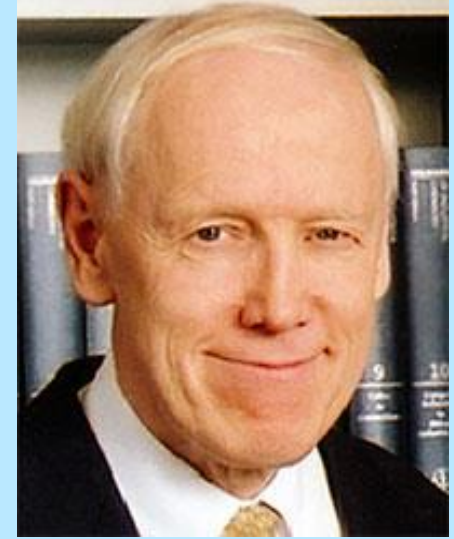
Aleksandr Oparin
(1894-1980)

Coacervati



Sidney Fox
(1912-1998)

Proteinoidi



Günter Wächtershäuser
(1938-)

Metabolism first

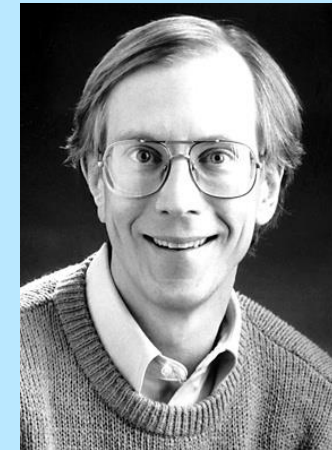


Alexander Cairns
Smith (1931-2016)

Vita dalle argille



Sidney Altman (1939-)



Thomas Cech (1947-)

Mondo a RNA

Metabolism first

Pyrite (FeS_2) formation

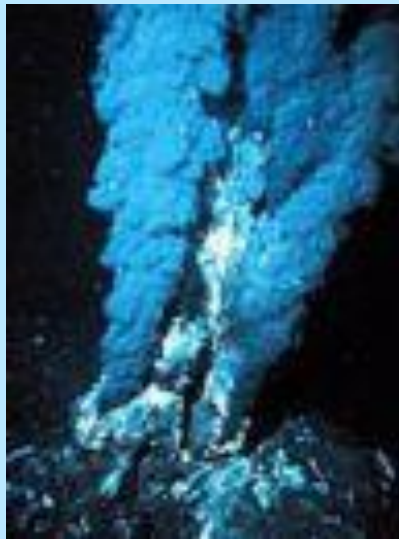
- H_2
- NH_3 (in presence of N_2)
- reduction of organic compounds



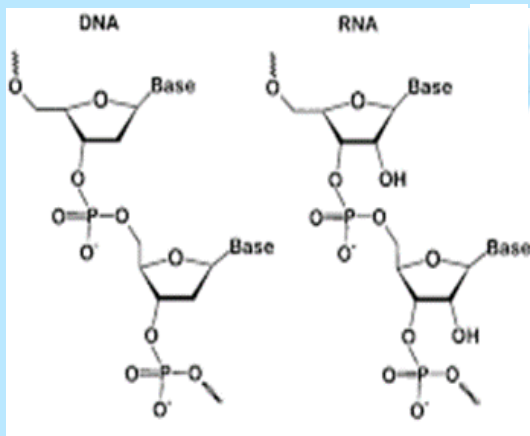
Autocatalytic lithotrophic metabolism

Lipids naturally self-assemble into bilayers

→ Proto-cell membrane



Mondo a RNA



1

RNA si forma a partire dalle sostanze organiche presenti nel brodo primordiale

2

Evolvendo, impara a duplicarsi

3

Inizia a sintetizzare proteine che possono funzionare da catalizzatori

4

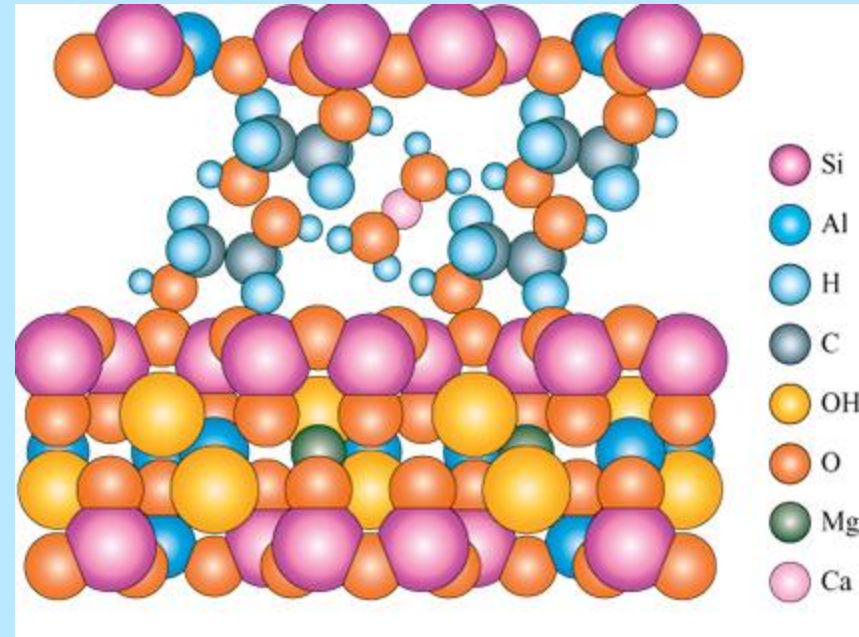
Alcune proteine favoriscono la formazione di doppie eliche che poi evolveranno in DNA

5

Il DNA si afferma

Vita dalle argille

- **Argille:** minerali composti di silicio e alluminio ma anche altri elementi come il magnesio. Tipica struttura consistente di *strati molecolari sovrapposti l'uno all'altro*.
- In ambiente acquoso sono in grado di concentrare piccole molecole di varia natura, come quelle disciolte nell'ambiente oceanico, includendole tra i vari strati. Questo è un prerequisito importante per realizzare sintesi di molecole più complesse.
- **Promuovono diverse reazioni chimiche**, (es: polimerizzazione di amminoacidi): sono quindi catalizzatori **come gli enzimi**.
- La loro stessa struttura potrebbe fungere da deposito primitivo di informazione genetica



Si tratta di vere ipotesi scientifiche?

- In senso stretto, un'ipotesi scientifica presuppone la verificabilità o al falsificabilità; presuppone, in altre parole, la possibilità di progettare esperimenti che portino alla raccolta di dati in accordo o in contrasto con l'ipotesi medesima.
- Nulla del genere – o quasi – è stato possibile come sviluppo investigativo per ciascuna delle teorie elencate. Come dato di fatto, una volta formulate, non hanno avuto praticamente alcuno sviluppo, e quindi né conferme né smentite su base sperimentale.
- Esse rappresentano pertanto quindi dei quadri interpretativi dell'abiogenesi, più che una vere e proprie ipotesi.

La biologia dei sistemi, un recente sviluppo scientifico-tecnologico: cosa ci dice in merito alla natura del vivente

- La biologia dei sistemi rappresenta una rivoluzione nel modo stesso di concepire le investigazioni sui sistemi biologici.
- Mentre tradizionalmente una ricerca partiva da una domanda specifica e focalizzata (es.: come agisce un certo ormone? Qual è il meccanismo di azione di un certo farmaco?), per rispondere alla quale si mettevano sotto indagine una o poche molecole, oggi è possibile tentare di studiare il funzionamento di un sistema biologico (cellula, tessuto o organismo) *analizzando contemporaneamente tutti gli elementi che lo costituiscono*.
- *All'origine di questo cambiamento di paradigma sta una serie di rivoluzioni tecnologiche*, le cosiddette -omiche che consentono l'analisi "high throughput" (ad alta resa); esse consentono in sostanza di analizzare ad un tempo l'intero repertorio di un certo tipo di molecole biologiche (proteine, geni, metaboliti, ecc.).

Le “-omiche” e la bioinformatica: propulsori dello sviluppo della biologia dei sistemi

- Le “-omiche” si caratterizzano per la capacità, almeno teorica, di caratterizzare una **intera classe di molecole biologiche o di fenomeni molecolari**.
- Di seguito le principali (ma non le sole) “-omiche”:
 - **Genomica** (studia l’insieme dei geni di un organismo: il **genoma**)
 - **Trascrittomica** (studia l’insieme dei trascritti → RNA codificanti proteine: il **trascrittoma**)
 - **Proteomica** (studia l’insieme delle proteine: il **proteoma**)
 - **Interattomica** (studia l’insieme delle interazioni tra molecole biologiche, l’**interattoma**. Si tratta in particolare, ma non solo, di proteine)
 - **Metabolomica** (studia il **metaboloma**, ossia l’insieme dei metaboliti, composti prodotti e trasformati dalle reazioni catalizzate da enzimi negli organismi)
- L’altro supporto tecnologico indispensabile per la biologia dei sistemi è la **bioinformatica**, che sulla base di algoritmi interpretativi dei fenomeni sotto indagine, sviluppa soluzioni di equazioni matematiche che consentano di ottenere previsioni numeriche dei fenomeni biologici.

Un esempio di “-omiche”

Interattomica

Nella figura, a titolo esemplificativo appare l'interattoma di un nematode, il *Caenorhabditis elegans*, (un piccolo verme lungo circa 1 mm che è un eccellente modello animale per investigare l'effetto di farmaci e agenti tossici). I punti colorati sono proteine (**nodes**); i trattini (**edges**) rappresentano le interazioni tra proteine (o tra proteine e acidi nucleici). Le interazioni consistono in fenomeni di attivazione o inibizione di funzioni diverse (es.: attività enzimatiche, attivazione/inibizione trascrizionale, ecc.)

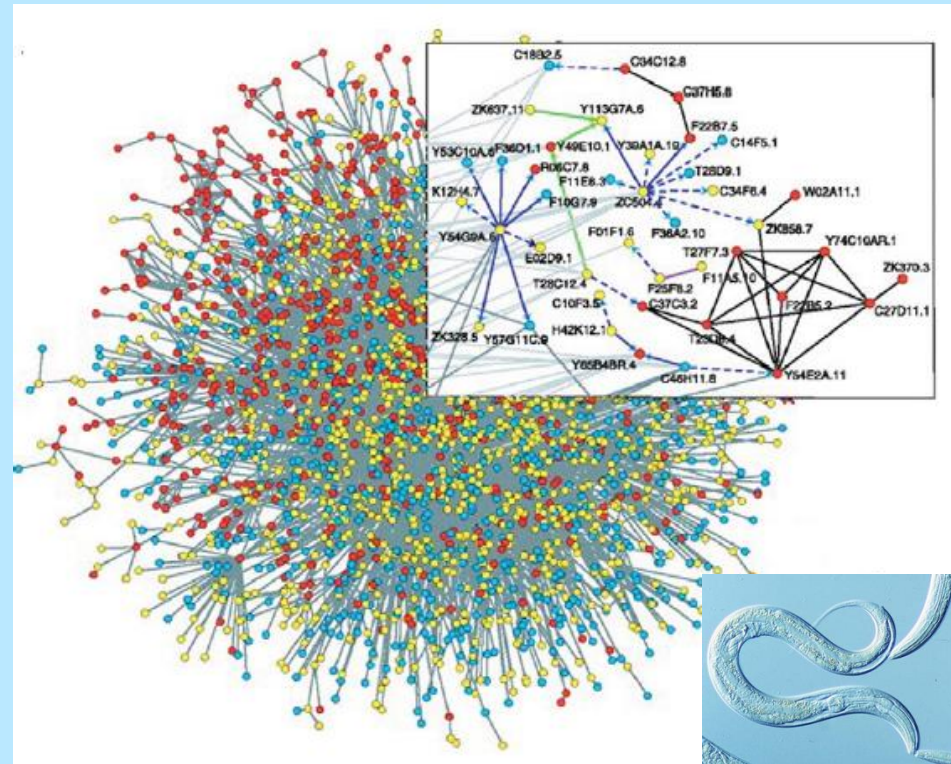


Fig. 3. *C. elegans* protein interaction network. The nodes are colored according to their phylogenetic class: ancient, red; multicellular, yellow; and worm, blue. The inset highlights a small part of the network. Figure reproduced with permission from the American Association for the Advancement of Science (Li, S. et al., 2004).

Quali considerazioni alla luce degli sviluppi più recenti della biologia

- Le tecniche odierne di investigazione e manipolazione dei sistemi viventi hanno raggiunto uno straordinario livello di sofisticazione. Ma ciò nondimeno gli approcci oggi praticabili tutto quello che possono fare è intervenire su un organismo o struttura biologica preesistente e modificarla conferendole nuove proprietà. In altre parole, **nessuno, almeno fino ad ora, è stato capace di progettare un nuovo organismo partendo dai suoi componenti più elementari.**
- L'odierna biologia dei sistemi mostra con sempre maggiore evidenza che **l'aspetto essenziale di un sistema vivente, dai più semplici ai più complessi, non è riconducibile a una o a qualcuna delle sue componenti: è l'interazione delle varie parti che attua il fenomeno vitale.** Pertanto, scomponendo un organismo si perde l'essenza del fenomeno stesso.

Alcune riflessioni di Erwin Chargaff sul fenomeno “vita”

“Probabilmente non è un caso che fra tutte le scienze sia proprio la biologia quella che non riesce a definire l’oggetto che studia: noi non possediamo una definizione scientifica della vita. In effetti sono solo cellule e tessuti morti quelli che vengono sottoposti alle analisi più dettagliate.”

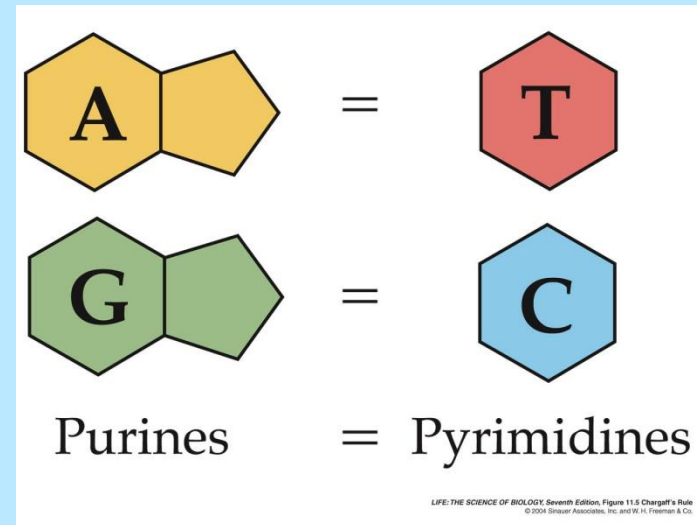
“L’analisi delle parti che compongono un organismo vivente comporta, salvo poche eccezioni, il venire meno dell’elemento essenziale della vita stessa.”

“Nella nostra caccia ai frammenti abbiamo smarrito le sublimi fattezze della vita.”

(Erwin Chargaff. Tratto da: “Mistero impenetrabile”, 1980)



1905-2002



Chargaff's rules

Oltre l'abiogenesi: quali riflessioni ci suggeriscono le modalità dell'evoluzione della vita dopo la sua comparsa?

L'imprevedibilità

Già 3 miliardi e mezzo di anni fa erano tanto diffusi da formare accumuli massicci, macroscopici e presenti ovunque. Essi sono ancora oggi come depositi sedimentari fossilizzati, che chiamiamo **stromatoliti**: si tratta di batteri ad attività fotosintetica presenti in quasi tutti i continenti.

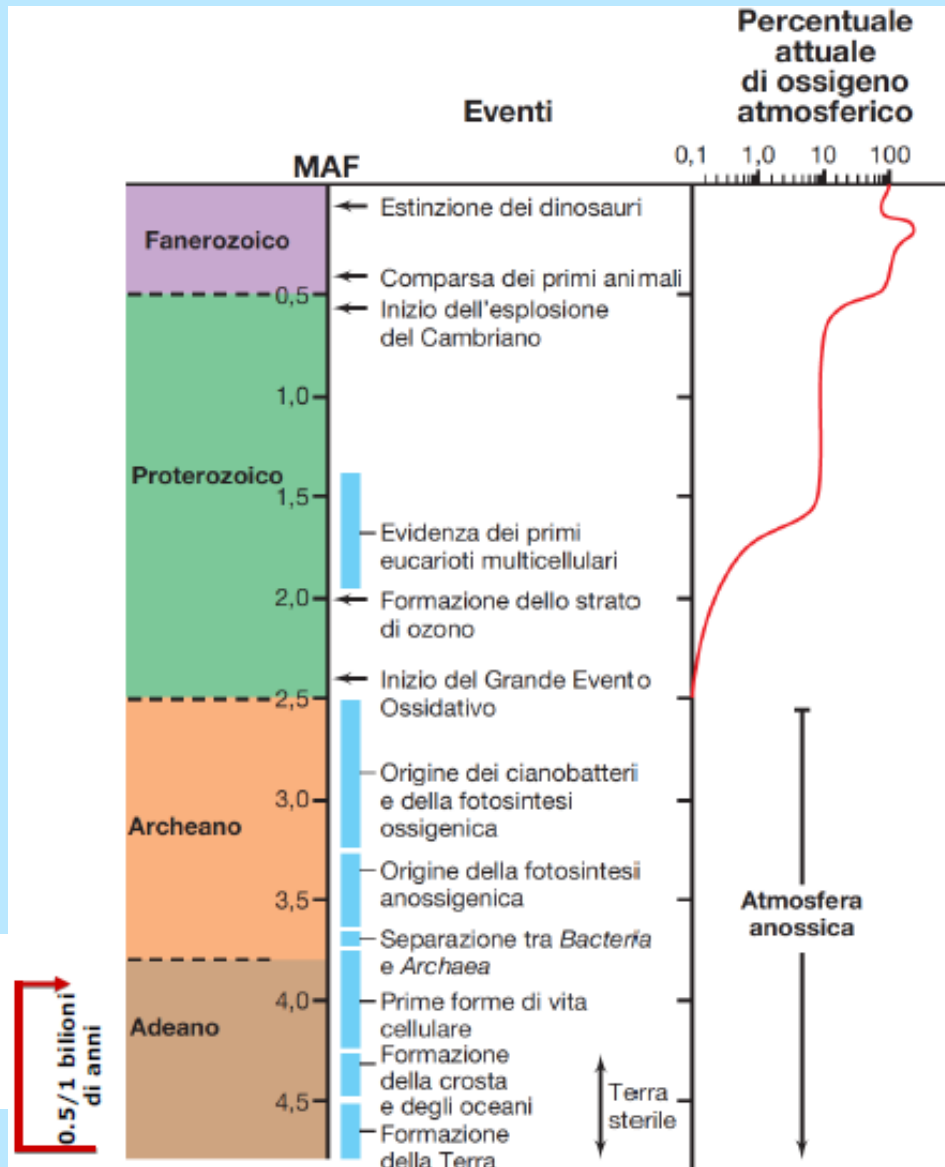


Subentra poi un periodo di stasi in cui non accade nulla di significativo per circa 2 miliardi di anni. Se qualcuno avesse avuto la possibilità di vivere sulla Terra primitiva subito dopo la comparsa degli stromatoliti, avrebbe potuto desumere che nulla di nuovo sarebbe più accaduto nel tempo a venire.

Eppure tra 1,5 e 2 miliardi di anni fa l'evoluzione riparte in grande stile: si formano le cellule eucariotiche per ragioni non del tutto chiare, ma probabilmente legate almeno in parte all'accumulo dell'ossigeno nell'atmosfera, prodotto dalla fotosintesi.

vita →

no vita →

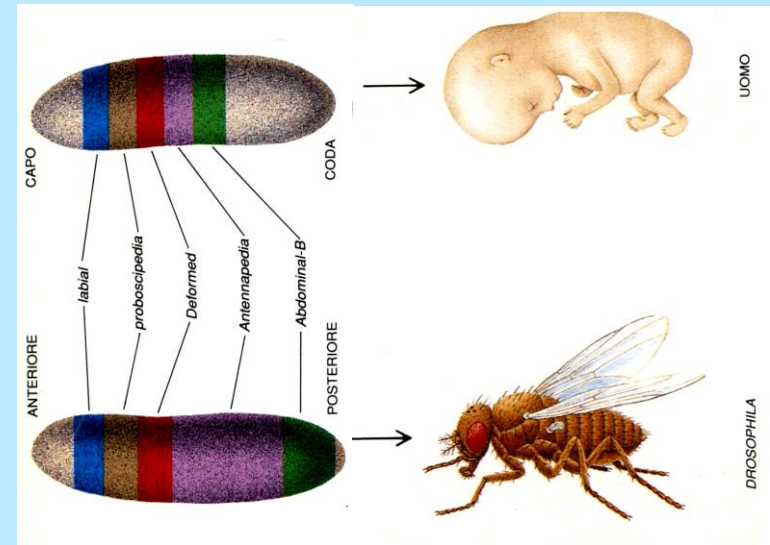


La intrinseca predisposizione a evolvere (evolvability)

Uno dei risultati più straordinari della biologia molecolare è la dimostrazione che **il meccanismo che presiede alla costruzione delle diverse parti di un organismo è conservata in organismi diversissimi tra loro come un insetto, un verme, un topo e l'uomo**. La famiglia dei geni *hox* è praticamente la stessa in tutti gli animali (cambia solo il numero) sebbene la differenziazione della linea filogenetica degli animali che ne sono dotati risalga almeno al periodo Cambriano (circa 500 milioni di anni fa). Si stima addirittura che la comparsa di questi geni risalga a circa due miliardi di anni fa.

Lo stesso kit di geni quindi è usato per istruire lo sviluppo di organi e strutture profondamente diversi. Evidentemente è il "come, il dove e il quando" questi geni vengono usati che fa la differenza.

In qualche senso, l'evoluzione ha predisposto la genesi di questi "kit genetici" per specie che sarebbero comparse centinaia di milioni di anni dopo!



Esiste la vita al di fuori della Terra?

La domanda va scomposta nelle sue due componenti:

- 1) Qual è la probabilità che la vita si sviluppi se le condizioni chimico fisiche la rendono possibile?
- 2) Quanto frequenti sono i pianeti sui quali esistano condizioni chimico-fisiche che rendono possibile la vita?

1) Qual è la probabilità che la vita si sviluppi se le condizioni chimico fisiche la rendono possibile?

Le stime vanno da 1 (=100%) a 10^{-40000}

(Stuart Kauffman – At home in the Universe)

In buona sostanza questo significa: **non lo sappiamo!**

Le ragioni di questa nostra “ignoranza” sono quelle già menzionate:

si tratta di un evento unico (almeno dal punto di vista degli esseri umani) e mai riprodotto in laboratorio. Sulle singolarità l'investigazione scientifica non ha strumenti per azzardare predizioni.

2) Quanto frequenti sono pianeti sui quali esistono condizioni chimico-fisiche che rendono possibile la vita?

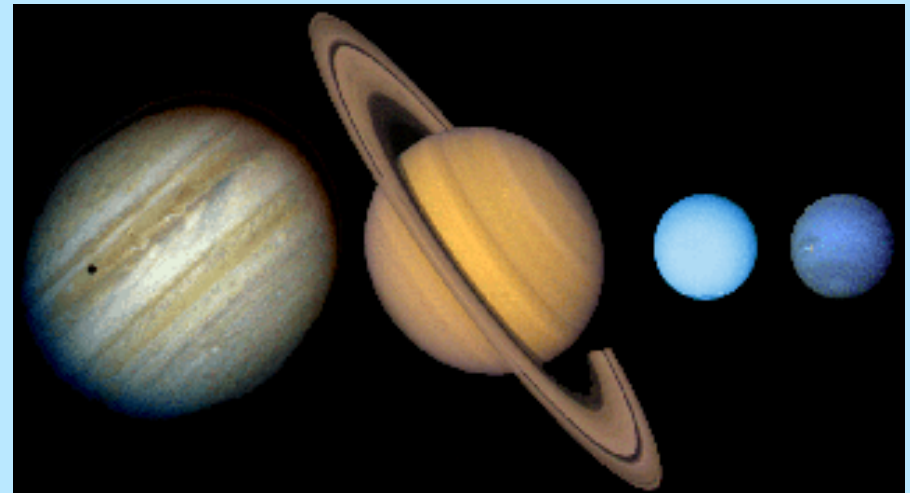
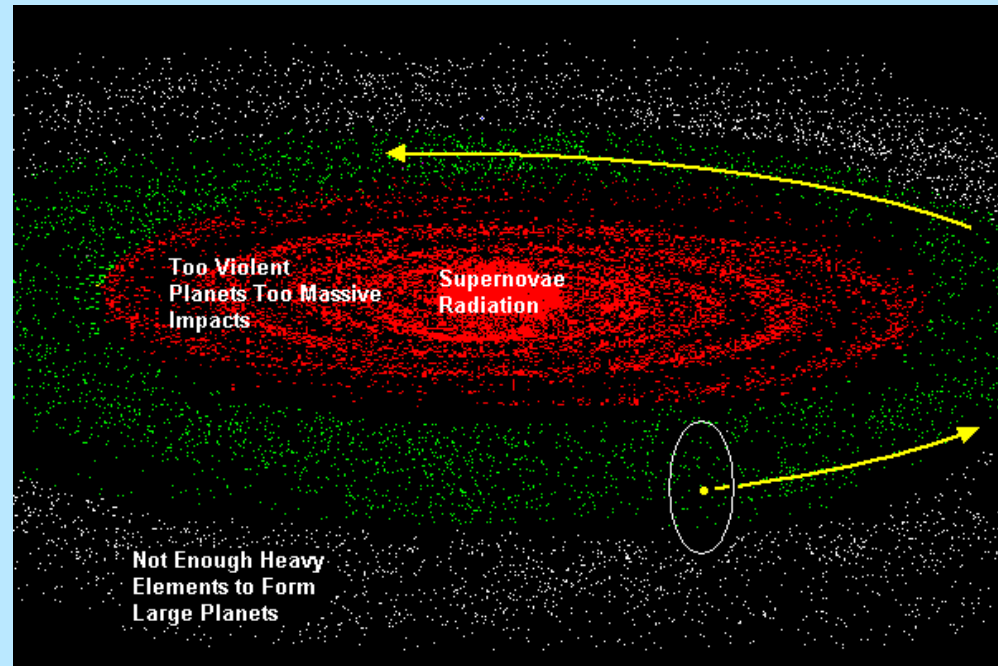
Si potrebbe pensare che i prerequisiti chimico-fisici perché un ambiente sia idoneo a consentire l'origine della vita siano relativamente pochi (per esempio, presenza d'acqua e temperature né troppo alte né troppo basse). In realtà i progressi dell'astrofisica e della biologia dimostrano che i prerequisiti richiesti sono numerosi e che la loro compresenza è il prodotto di una combinazione altamente improbabile di fattori. **Ne deriva che il pianeta Terra è un ambiente particolarmente privilegiato, se non proprio unico.**

Segue un elenco (certamente incompleto) delle condizioni richieste:

- Il Sole deve essere una stella di seconda generazione, derivante dalla condensazione della materia prodotta dall'esplosione di una supernova. Nell'esplosione si producono elementi pesanti (come ad esempio il ferro), indispensabili per la “costruzione” degli organismi.
- Il Sole non deve essere parte di un sistema binario, vale a dire composto di due stelle: ciò comporterebbe irradiazioni di intensità estremamente variabile sui pianeti, con una conseguente drammatica instabilità climatica.
- Il Sole deve orbitare nella galassia non troppo vicino al centro né alla periferia. In prossimità del centro: radiazioni cosmiche troppo intense. Alla periferia: sistemi planetari poveri di metalli.

Galactic Habitable Zone?

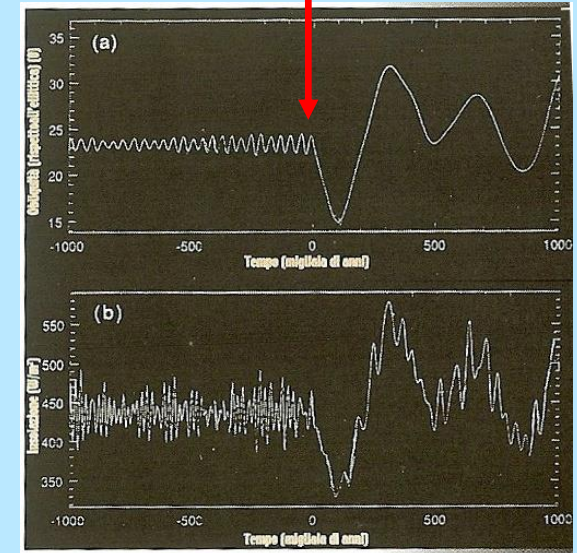
- L'irradiazione del Sole deve essere sostanzialmente costante nel tempo (come in effetti è, mentre ciò non è appannaggio di tutti i sistemi planetari). Ciò ha consentito il mantenimento di acqua liquida sulla superficie del pianeta per miliardi di anni.
- La Terra deve essere un pianeta roccioso, che ruota attorno al Sole nella zona abitabile e con un'orbita non troppo ellittica, così da permanere entro un intervallo di distanze dalla stella idoneo a garantire la permanenza di acqua liquida.
- La presenza di pianeti giganti gassosi esterni ha garantito, grazie al loro forte campo gravitazionale, una sostanziale protezione da impatti di asteroidi nell'arco di miliardi di anni.



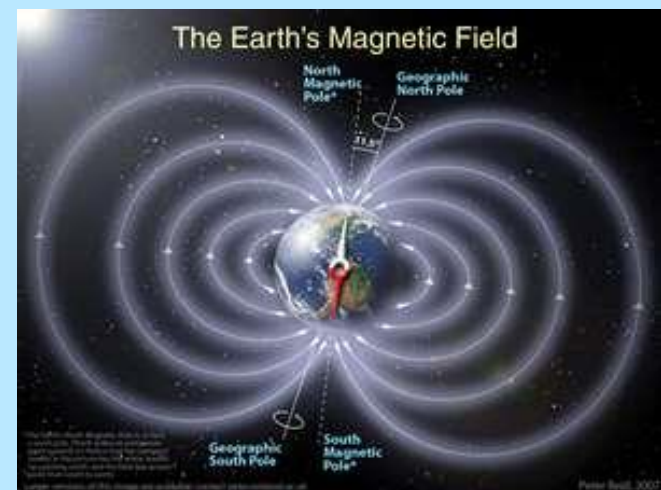
- La presenza di un satellite massiccio (la Luna) ha garantito alla Terra una notevolissima stabilità nell'inclinazione dell'asse di rotazione del nostro pianeta. In mancanza di ciò il clima avrebbe subito ripetutamente variazioni vertiginose (cambiamenti della temperatura media anche di parecchie decine di gradi) nell'arco di tempo in cui si è verificata l'evoluzione biologica. Nessun altro pianeta del sistema solare possiede un satellite di massa così relativamente elevata, come quella della Luna rispetto a quella della Terra.
- La tettonica a placche e il conseguente vulcanesimo, ha garantito un apporto di CO_2 nell'atmosfera tale da generare un effetto serra naturale, senza il quale la temperatura – secondo alcune stime – sarebbe stata più bassa di circa 30°C .



“Rimozione” della Luna



- La Terra possiede un forte campo magnetico (contrariamente alla maggior parte dei pianeti del sistema solare) che scherma la superficie da buona parte dei raggi cosmici. In sua assenza la superficie verrebbe sterilizzata da un continuo bombardamento di radiazioni.



Qual è dunque la probabilità? (e quindi la frequenza?)

La probabilità di un evento composto è data dal prodotto delle probabilità degli eventi singoli

Su questo principio si basa la **formula di Drake** (anni '60):

$$N = R f_1 f_2 n_e f_3 f_4 f_5 L$$

N: numero di civiltà nella nostra Galassia

R: tasso medio di formazione di stelle nella Galassia

f_1 : frazione di stelle con proprietà compatibili con lo sviluppo della vita

f_2 : frazione di stelle che hanno sistemi planetari

n_e : numero medio di pianeti, in un sistema planetario, che possiedono un ambiente favorevole alla comparsa della vita

f_3 : frazione di pianeti in cui la vita effettivamente è nata

f_4 : frazione di pianeti in cui la vita si è sviluppata fino a generare forme intelligenti

f_5 : frazione di pianeti in cui la vita si è sviluppata fino a generare forme intelligenti capaci di tecnologie avanzate

L: vita media delle civiltà evolute

The Drake equation:

“A wonderful way to organize our ignorance”

(Jill Tarter, Former Director of the Center for SETI Research)

(Dopo 40 anni di ricerche il progetto SETI non ha prodotto ancora alcun risultato)

Dunque?

- La combinazione di tutti i prerequisiti chimico-fisici (che abbiamo sopra discusso a grandi linee) *potrebbe* rendere la probabilità di un pianeta abitabile evanescentemente piccola.
- La vita *potrebbe* non esistere nell'Universo (al di fuori della Terra) perché **l'Universo è “troppo piccolo”. Solo $\approx 10^{23}$ stelle.**

Tuttavia il progetto SETI continua

- Sta per entrare in funzione lo SKA (**Square Kilometer Array**), un gigantesco radiotelescopio da un chilometro quadrato composto un gran numero di piccole antenne distribuite su un'area immensa, principalmente tra il Sudafrica e l'Australia.
- Consentirà di captare segnali **fino a 100 anni luce di distanza** per un volume di circa 4 miliardi di anni luce cubi (**un milione di volte maggiore di quello esplorato fino ad oggi**), corrispondente a circa 1/50-1/100 del volume della galassia, tutto ubicato all'interno della zona abitabile!
- Prevedibilmente, entro i prossimi 15-20 anni sarà possibile captare il primo segnale radio extraterrestre della storia, *naturalmente se esiste!*
- Qualsiasi possa essere l'esito di queste nuove indagini, esso ci consentirà di affinare maggiormente le nostre valutazioni in merito alla possibilità dell'esistenza della vita nel cosmo.

”Analogamente a quanto è accaduto con la formazione dei pianeti, sembrano esserci solo due possibilità: **o la nascita della vita intelligente sulla Terra è stata il frutto di un processo ben preciso, che si innesca ogni volta che su un pianeta si danno certe condizioni iniziali (e in tal caso, dato l’immenso numero dei pianeti, la vita intelligente dovrebbe essere molto comune) o è stata il frutto della coincidenza casuale di numerosi processi indipendenti (e in tal caso, nonostante l’immenso numero dei pianeti, la vita intelligente dovrebbe essere molto rara), mentre una situazione intermedia appare difficile persino da immaginare. In fondo si tratta sempre del vecchio dilemma di Jacques Monod (1910-1976): il caso o la necessità? ”**

(Paolo Musso. Emmeciquadro. Alla ricerca di civiltà extraterrestri. Giugno 2018, n.69)



*Grazie per
l'attenzione!*