



*Ministero dell'Istruzione
dell'Università e Ricerca*



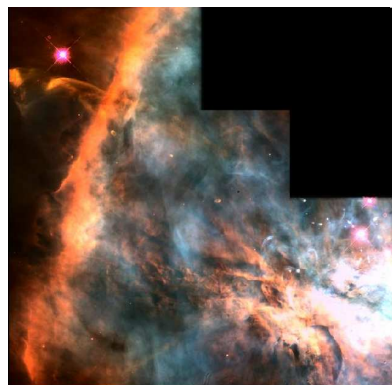
XVI OLIMPIADI ITALIANE DI ASTRONOMIA – MILANO – 2016

4 novembre 2015

Prof. Manlio Bellesi

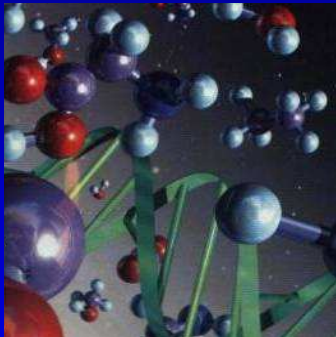
LA VITA

NEL COSMO



VITA = *Che cos'è?*

“Sistema chimico autosufficiente, soggetto a evoluzione darwiniana”



(NASA exobiology program)

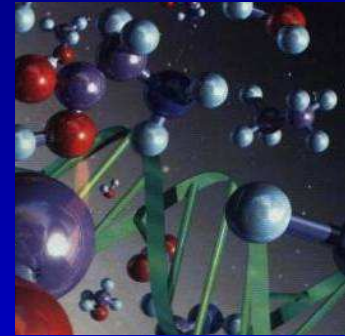
Possibile traduzione in italiano...

“Vita” è un qualsiasi sistema in grado di regolarsi in modo autonomo attraverso reazioni chimiche, capace di riprodursi e di evolversi (e anche di morire)

CONTROESEMPIO : un mulo non può essere “vivo” !!

VITA : GLI INGREDIENTI

- ⌘ *Molecole (di una certa complessità)*
- ⌘ *Una sorgente di energia*
- ⌘ *Un sistema di gestione delle reazioni chimiche ...*
- ⌘ *... e un solvente per le molecole interagenti*



Tali requisiti implicano la presenza di:

ACQUA *(allo stato liquido)*

CARBONIO

PERCHÉ L'ACQUA ?

💧 *Serve un ambiente liquido per dissolvere le molecole e favorire le reazioni chimiche*

💧 *L'acqua è un solvente quasi universale ed è un composto molto comune nell'Universo*

💧 *Si trova allo stato liquido nell'intervallo “giusto” di temperature: non troppo...*

... BASSE da bloccare i processi chimici fondamentali

... ALTE da spezzare legami chimici tra le molecole organiche

PERCHÉ IL CARBONIO ?

- ◆ *È tra gli elementi più abbondanti nell'Universo
(preceduto solo da: H, He, O, Ne, N)*
- ◆ *È il più versatile nella formazione di legami chimici*
- ◆ *Forma molecole grandi, con struttura articolata, adatte a svolgere funzioni complesse come quelle dei processi vitali*
- ◆ *I legami che forma si dissolvono facilmente nell'acqua*

ALTERNATIVE (?)

- *Alcuni microorganismi esplicano un certo grado di attività biologica nel ghiaccio (alghe rosa, nematodi)...*
→ *ma sembra limitata alla mera sopravvivenza*
- *Il silicio e il germanio hanno una discreta predisposizione a formare legami complessi ...*
→ *ma meno del carbonio, e sono più rari nell'Universo*
- *L'ammoniaca potrebbe fungere da solvente - a temperature molto basse - per organismi basati sul silicio...*
→ *che nessuno ha ancora trovato (troppo freddo per un'attività biologica?)*

LA CHIMICA DELLA VITA



<i>TIPO DI COMPOSTO</i>	<i>FUNZIONI SVOLTE</i>	<i>Meteorite Murchison</i>
<i>acqua</i>	<i>solvente</i>	<i>sì</i>
<i>lipidi</i> (idrocarburi, acidi)	<i>membrane, riserve di energia</i>	<i>sì</i>
<i>zuccheri</i> (monosaccaridi)	<i>supporto, riserve di energia</i>	<i>sì</i>
<i>polisaccaridi</i> (zuccheri polimerizzati)	” ” ”	<i>no</i>
<i>amminoacidi</i>	<i>supporto, enzimi catalizzatori</i>	<i>sì</i>
<i>proteine</i> (amminoacidi polimerizzati)	” ” ”	<i>no</i>
<i>fosfati</i>	<i>informazione genetica</i>	<i>sì</i>
<i>basi azotate</i>	” ”	<i>sì</i>
<i>acidi nucleici</i> (zuccheri polimerizzati, fosfati, basi azotate)	” ”	<i>no</i>

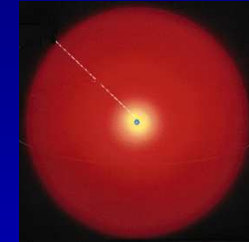
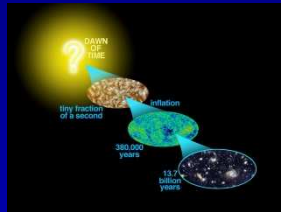
I MAGNIFICI 10

gli elementi più abbondanti (totale = 100 000 atomi)

Universo	Terra	Crosta terrestre	Oceani	Corpo umano
<i>H</i> (92714)	<i>O</i> (48880)	<i>O</i> (60425)	<i>H</i> (66200)	<i>H</i> (60563)
<i>He</i> (7185)	<i>Fe</i> (18870)	<i>Si</i> (20475)	<i>O</i> (33100)	<i>O</i> (25670)
<i>O</i> (50)	<i>Si</i> (14000)	<i>Al</i> (6251)	<i>Cl</i> (340)	<i>C</i> (10680)
<i>Ne</i> (20)	<i>Mg</i> (12500)	<i>H</i> (2882)	<i>Na</i> (290)	<i>N</i> (2440)
<i>N</i> (15)	<i>S</i> (11400)	<i>Na</i> (2155)	<i>Mg</i> (34)	<i>Ca</i> (230)
<i>C</i> (8)	<i>Ni</i> (1400)	<i>Ca</i> (1878)	<i>S</i> (17)	<i>P</i> (130)
<i>Si</i> (2,3)	<i>Al</i> (1300)	<i>Fe</i> (1858)	<i>Ca</i> (6)	<i>S</i> (130)
<i>Mg</i> (2,1)	<i>Na</i> (640)	<i>Mg</i> (1784)	<i>K</i> (6)	<i>Na</i> (75)
<i>Fe</i> (1,4)	<i>Ca</i> (460)	<i>K</i> (1374)	<i>C</i> (1,4)	<i>K</i> (37)
<i>S</i> (0,9)	<i>P</i> (140)	<i>Ti</i> (191)	<i>Si</i> -	<i>Cl</i> (33)

PERCHÉ QUESTA DISTRIBUZIONE DI ELEMENTI?

PER L'UNIVERSO:

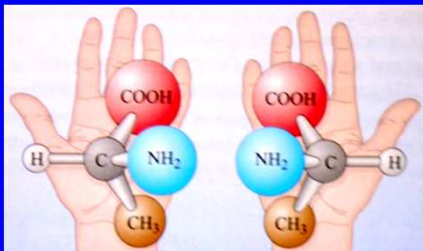


H, He COSMOLOGICI - per tutti gli altri, **l'EVOLUZIONE STELLARE**

PER LA TERRA: meccanismi di formazione del sistema solare



PER GLI OCEANI TERRESTRI: acqua + sali minerali disciolti



PER IL CORPO UMANO:
evoluzione da organismi acquatici
+ chimica basata sul carbonio



DOVE HA AVUTO ORIGINE LA VITA?

La risposta si trova da qualche parte fra due estremi ...

➤ ***SOLO sulla Terra***

➤ ***Nello spazio interstellare, ed è diffusa
OVUNQUE***



MATERIA ORGANICA INTERSTELLARE

Spettro infrarosso
(parziale) di
assorbimento per
un involucro
circumstellare (a),
confrontato con:

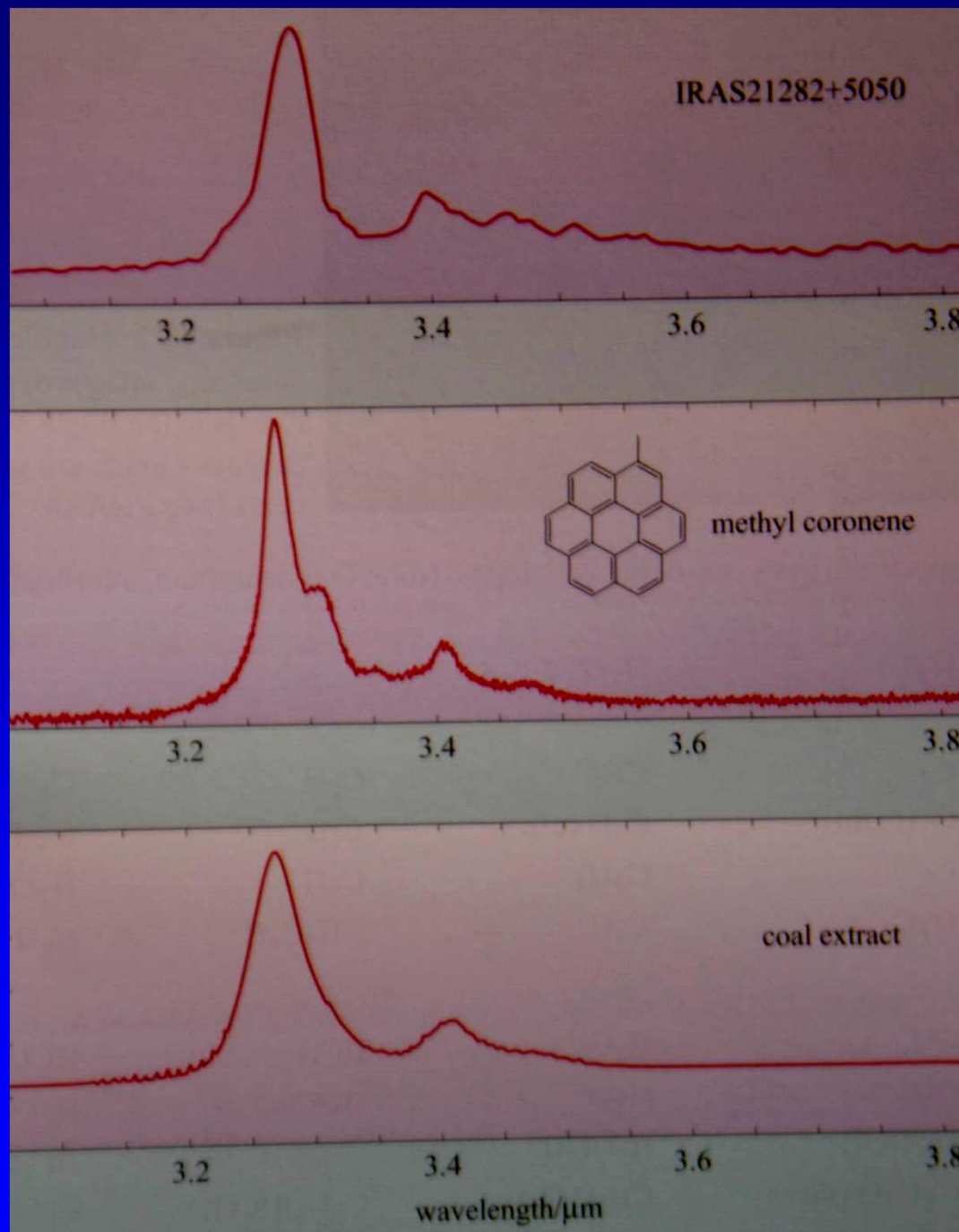
(b) un idrocarburo
aromatico

(c) un miscuglio di
composti organici

(a)

(b)

(c)



MOLECOLE ORGANICHE nello spazio interstellare

*Sono assai comuni soprattutto nelle **NUBI MOLECOLARI GIGANTI**, dove si formano stelle e pianeti
La più alta concentrazione di composti organici della Galassia (Terra inclusa) si trova proprio all'interno di queste nubi.*

Le molecole rilevate sono di estremo interesse per la vita: acqua, vari acidi e composti organici complessi.

*La molecola più grande è l'**HC₁₁N***



*Regione centrale
di M42 (nebulosa
di Orione) con le
stelle del Trapezio
in primo piano*

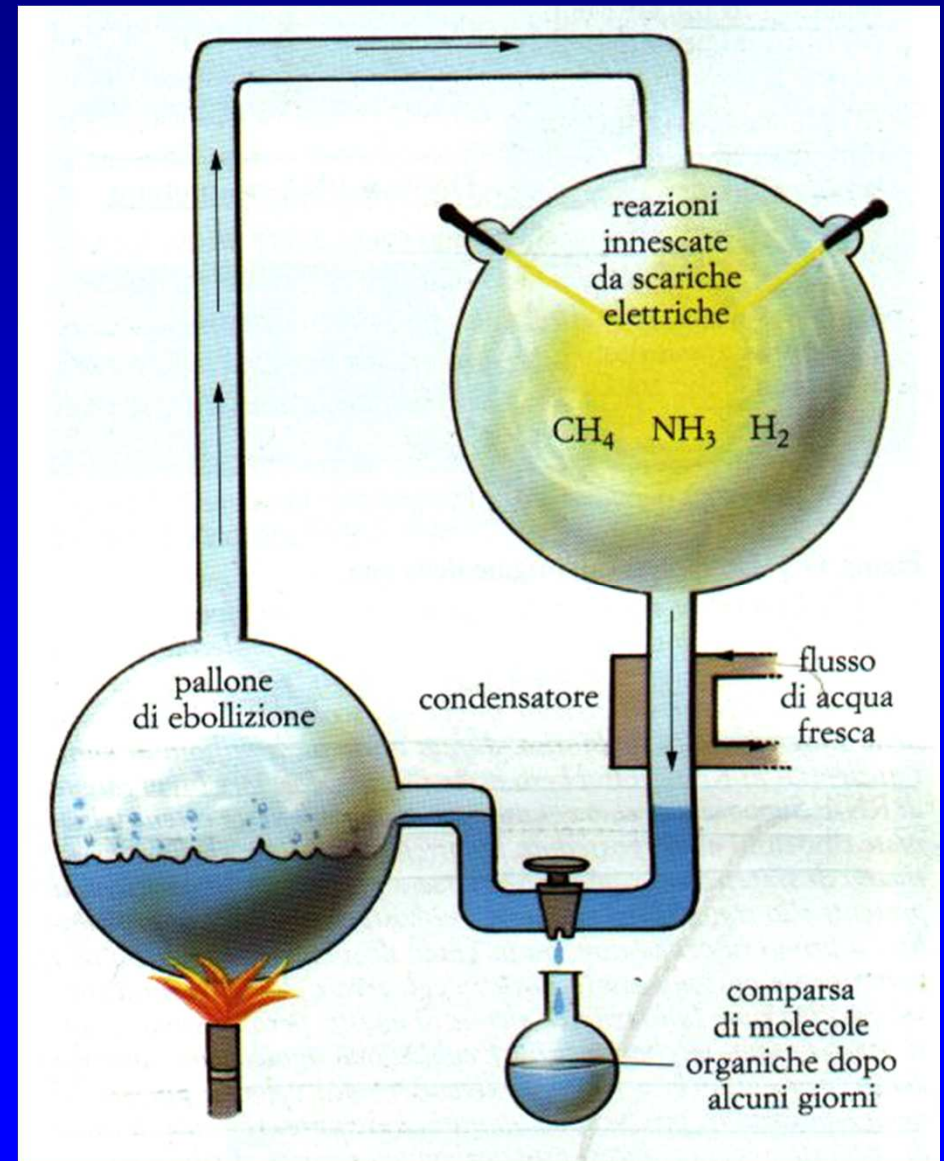
L'ESPERIMENTO DI UREY-MILLER

(1953)

*Se la vita ha avuto origine sulla
Terra . . .*

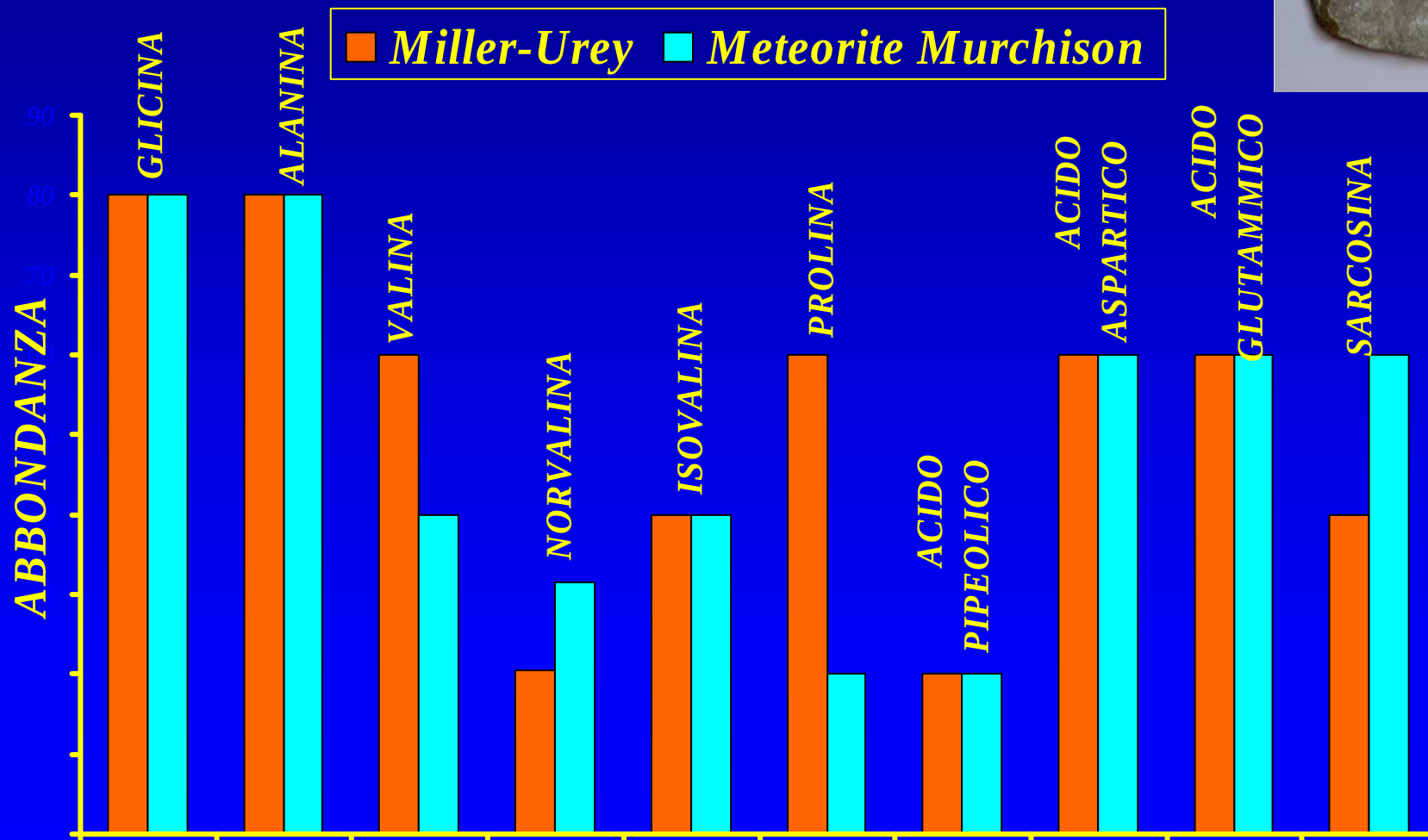
*. . . l'ambiente più adatto sembra
essere l'acqua*

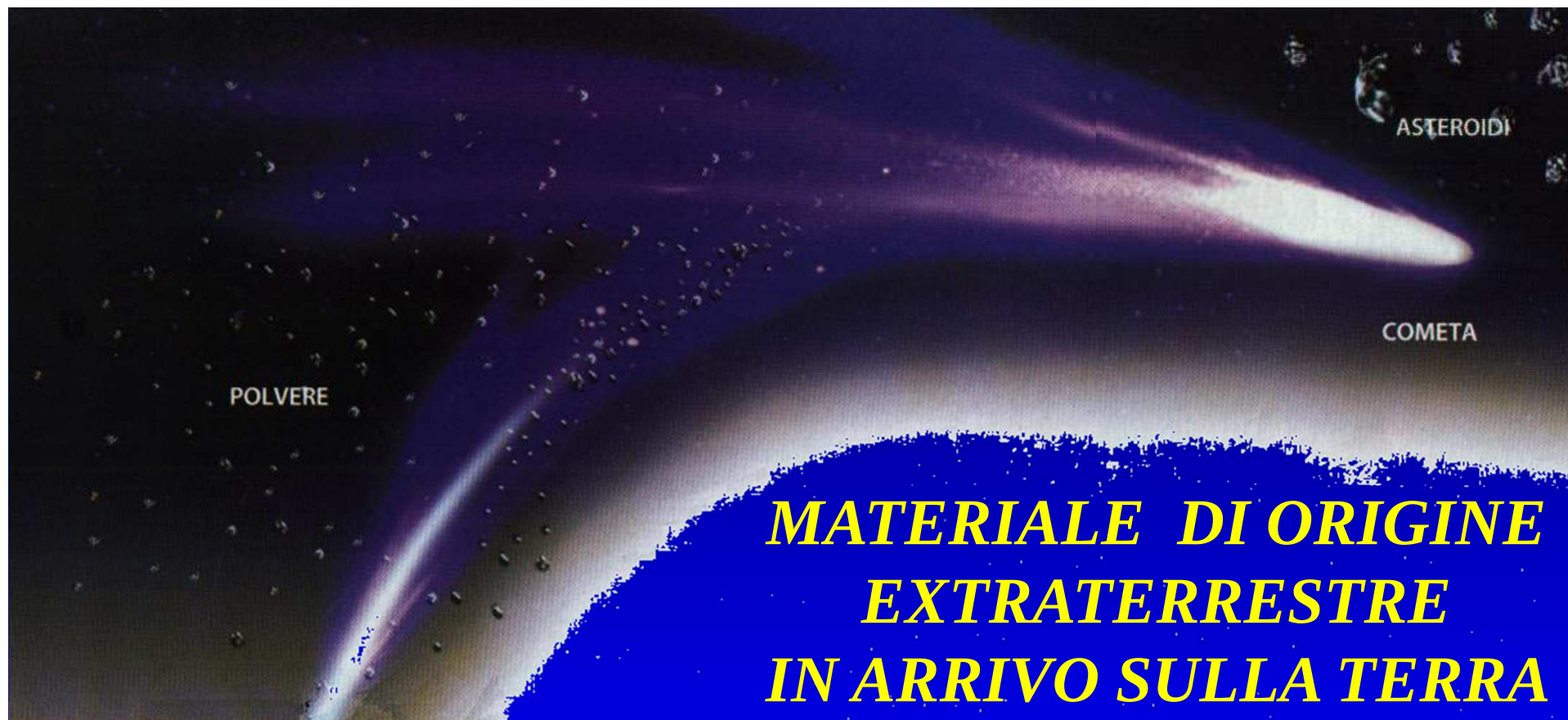
*In un'atmosfera
riducente si formano
abbastanza facilmente
diversi aminoacidi*



MILLER-UREY E LA METEORITE MURCHISON

un confronto tra le abbondanze di amminoacidi





MATERIALE DI ORIGINE EXTRATERRESTRE IN ARRIVO SULLA TERRA

<i>TIPOLOGIA</i>	<i>Masse tipiche (kg)</i>	<i>Tasso annuale di accrescimento (kg)</i>	<i>Percentuale in Carbonio</i>
<i>detriti cometari</i>	$10^{-17} - 10^{-1}$	16 000 000	10%
<i>meteore</i>	$10^{-2} - 10^5$	58 000	1,3%
<i>meteoriti e asteroidi</i>	$10^5 - 10^{15}$	62 000 000	4,2%

L'AMBIENTE DELLA TERRA PRIMITIVA

Formazione della Terra e del Sistema Solare: (4,56±0,05) miliardi di anni fa.

Le evidenze più antiche sono costituite da ROCCE, vecchie di 4,2 miliardi di anni.

Il loro studio mostra che già 4 miliardi di anni fa ESISTEVANO ...

... distese di acqua (veri oceani, forse) e alcuni scudi continentali

... temperature tra 0 °C e 100 °C (almeno nei luoghi di formazione delle rocce esaminate)

*... differenziazioni nella struttura del pianeta
(nucleo - mantello - crosta)*

*... processi di erosione e sedimentazione molto
simili a quelli odierni*

... un'attività vulcanica e tettonica (placche)

*... e **POCHISSIMO** ossigeno nell'atmosfera!*



Isua, Groenlandia (3,8 miliardi di anni)

ALCUNI PROBLEMI

1) Il Sole “appena” nato era del 25-30% meno luminoso rispetto a oggi, e la temperatura superficiale della Terra avrebbe dovuto essere sotto zero



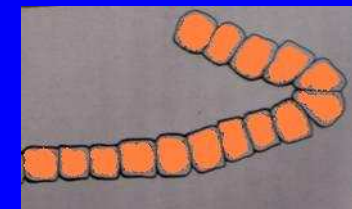
2) La Terra è nata con la sua acqua o questa è arrivata dall'esterno?



3) Qual era la composizione dell'atmosfera primitiva e come si è arricchita di ossigeno al passare del tempo?



4) Quando (e come) si sono formati i primi organismi viventi?



“RISPOSTE” AI PROBLEMI - 1

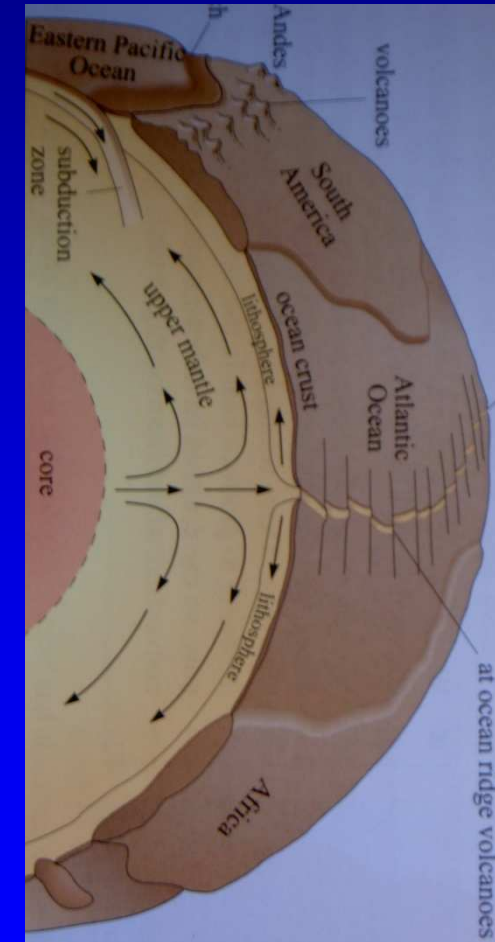
(le migliori che abbiamo al momento ...)

L'EFFETTO SERRA (CO_2 atmosferica) può aver mantenuto la Terra a temperature abbastanza alte da preservare l'acqua allo stato liquido.

I vulcani pompano CO_2 nell'atmosfera, ma per non accumularne troppa servono meccanismi di riassorbimento ...

... che oggi sono a) formazione di rocce carbonatiche nel fondo marino e b) riciclaggio della crosta attraverso la tettonica a placche

Tutti questi processi dovevano essere anche più attivi rispetto a oggi ...



... anche se qualche INTOPPO nel meccanismo si è verificato

“INTOPPI” CLIMATICI: LE ANTICHE GLACIAZIONI

Molto recentemente si sono scoperte tracce di depositi glaciali risalenti a quattro diversi periodi dell'era Proterozoica, tra 2300 e 580 milioni di anni fa

*Tali depositi si trovavano al livello del mare e alla latitudine dell'equatore
—→ calotte di ghiaccio estese su tutto il pianeta*

*I depositi contengono anche rocce ricche di ossidi di ferro
—→ c'era già ossigeno in atmosfera oltre 2 miliardi di anni fa*

*Subito sopra questi strati si trovano rocce carbonatiche
—→ il ghiaccio si è sciolto in tempi molto rapidi, sostituito dall'oceano*

Emerge quindi un quadro inaspettato di brusche variazioni climatiche, governate da oscillazioni molto marcate del livello atmosferico di CO₂

nelle rocce

*scarso effetto
serra,
abbassamento
delle temperature*

*crescita del
ghiaccio, minore
assorbimento di
CO₂ nelle rocce del
fondo marino*

*più CO₂ in
atmosfera*

*più CO₂
nelle rocce*

*maggiore
assorbimento di
CO₂ nelle rocce del
fondo marino*

CO₂

in atmosfera

**IL
MECCANISMO
DI FEEDBACK
DELLA CO₂
TERRESTRE**

*effetto serra
marcato, crescita
delle temperature*

“RISPOSTE” AI PROBLEMI - 2

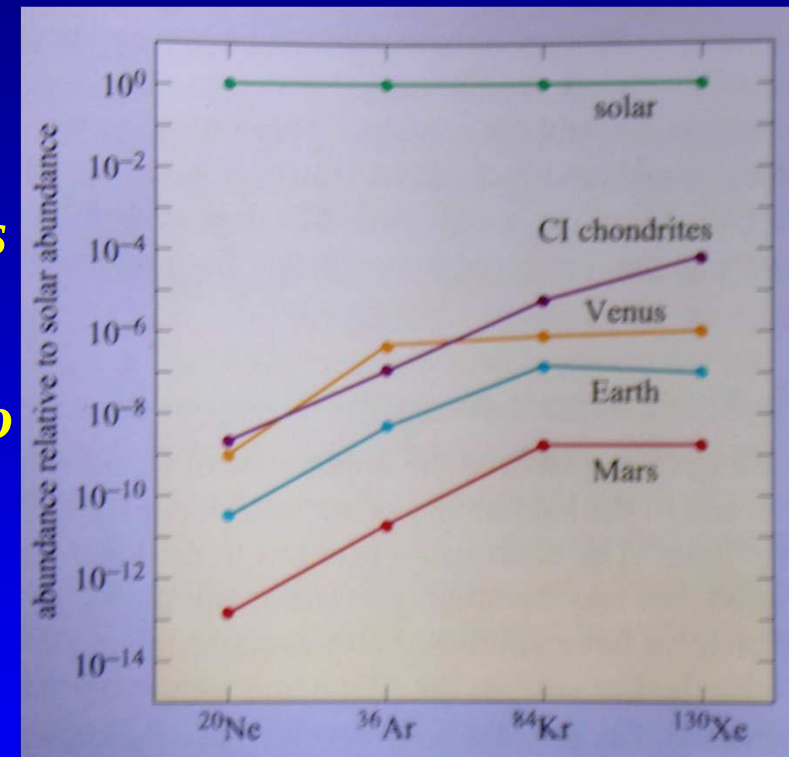
(le migliori che abbiamo al momento ...)

La distribuzione dell'acqua nel Sistema Solare primitivo è legata in generale a quella dei **VOLATILI**: H_2O , N_2 , CO_2 e i gas nobili Ne, Ar, Kr, Xe.

Le abbondanze terrestri di volatili mostrano che c'era **poca acqua** nella zona di formazione del nostro pianeta.

Due le ipotesi plausibili:

- minerali ad alta idratazione furono incorporati nella proto-Terra in formazione
- numerosi impatti di comete hanno arricchito la Terra di acqua (e composti organici)



LA PROVENIENZA DELL'ACQUA

Non si può ancora scegliere tra le ipotesi a) e b), ma una risposta passa per lo studio dei nuclei cometari (Hyakutake e Halley) raggiunti dalle nostre sonde.

Una “firma” importante: il deuterio, D (nucleo di idrogeno arricchito di un neutrone) contenuto nell’acqua.

Il rapporto delle concentrazioni deuterio/idrogeno [D/H] è un buon indice della provenienza dell’acqua.

Oggetto	Rapporto D/H
Terra	$1,5 \cdot 10^{-4}$
C. Halley	$3,16 \cdot 10^{-4}$
C. Hyakutake	$2,82 \cdot 10^{-4}$



—→ le comete NON sembrano essere la fonte principale dell’acqua terrestre

“RISPOSTE” AI PROBLEMI - 3

(le migliori che abbiamo al momento ...)

La proto-Terra non poteva trattenere i gas più leggeri (H_2 , He). La prima atmosfera “durevole” viene dall'interno del pianeta (degassamento):

H_2O (vapore), N_2 , CO_2 , SO_2 , CH_4

Ossigeno scarso (dissociazione ultravioletta dell' H_2O): nelle rocce più antiche mancano ossidi di ferro (FeO , Fe_2O_3) e c'è invece FeS .

Numerosi impatti (anche catastrofici) disperdono l'atmosfera nello spazio, che però torna sempre a ricostituirsi; circa 3,8 miliardi di anni fa il bombardamento cessa quasi del tutto.

Mancanza di ossigeno —→ ASSENZA dello strato di ozono contro i raggi UV del Sole —→ le prime molecole viventi devono nascere in ambienti protetti (fondo marino, sedimenti rocciosi).

LA DIFFUSIONE DELL'OSSIGENO

L'atmosfera si arricchisce progressivamente di ossigeno grazie al processo di fotosintesi operato da organismi come i cianobatteri (alghe azzurre) o dei loro precursori durante l'era Archeana (3,8 - 2,5 miliardi di anni fa).

*Un indizio: le BIF (**Banded Iron Formations**), formazioni rocciose ricche di ossidi di ferro che compaiono a partire da 3,8 miliardi di anni fa ed includono enormi quantità di ossigeno.*

Occorre però spiegare il meccanismo di formazione delle BIF e il ruolo dei (presunti) organismi viventi nel processo



BIF in una miniera delle Hamersley Ranges (Australia Occidentale)

I PRIMI ORGANISMI VIVENTI

Le STROMATOLITI sono sedimenti di origine organica.

Ancora oggi alghe verdi-azzurre e cianobatteri fissano N_2 e producono O_2 , formando sedimenti dello stesso tipo.



Stromatoliti odierne (Australia Occidentale)



Sezione di una stromatolite (Australia Occ. - 3,46 miliardi di anni)

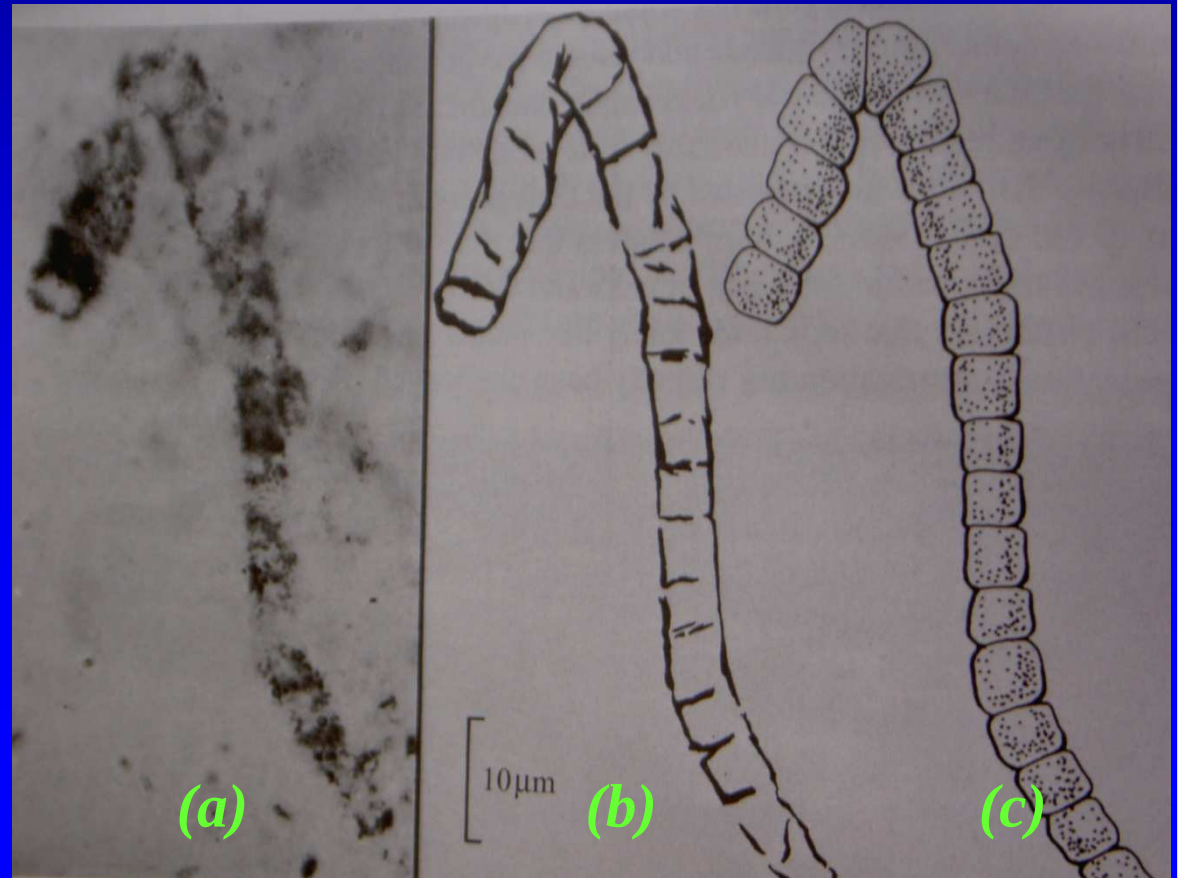
Le più antiche rocce simili alle stromatoliti risalgono a 3,46 miliardi di anni fa.

È probabile, ma non ancora sicuro, che le abbiano formate organismi simili ai cianobatteri, rilasciando grandi quantità di ossigeno nell'oceano - e da lì in atmosfera.

Sezioni di queste antiche “stromatoliti” contengono delle strutture filamentose molto simili ai cianobatteri (in figura, da destra a sinistra: (a) microfotografia, (b) disegno, (c) ricostruzione)

Di recente (Brasier, 2002) si è ipotizzato che le strutture non siano di origine biologica, ma si siano formate per deposizione di carbonio (sintesi catalitica) operata da fluidi a temperatura molto alta, filtrati attraverso i sedimenti.

I filamenti sono molto più grandi dei cianobatteri odierni e avrebbero anche dovuto sopportare valori di temperatura compresi tra 250°C e 350 °C



IL RAPPORTO ISOTOPICO ^{13}C / ^{12}C : IMPLICAZIONI PER LA VITA

Un ISÒTOPO di un elemento è un atomo che ha lo stesso numero di protoni, ma un differente numero di neutroni.

Le proprietà chimiche dell'elemento restano le stesse, ma cambiano alcune proprietà fisiche (per esempio, la massa e la stabilità).

Il carbonio-12 (^{12}C) ha un nucleo composto da 6 protoni e 6 neutroni; il carbonio-13 (^{13}C) ha 6 protoni e 7 neutroni; il carbonio-14 (^{14}C) ha 6 protoni e 8 neutroni: è un nucleo instabile, soggetto ad emissione radioattiva.

Sulla Terra il rapporto ^{13}C / ^{12}C è 1/9 (cioè il carbonio-12 è nove volte più abbondante del carbonio-13)...

... MA nelle reazioni chimiche che formano o distruggono legami di carbonio C—C si consuma meno energia usando carbonio-12.

*Per questo motivo gli organismi viventi hanno
UN RAPPORTO ^{13}C / ^{12}C PIÙ BASSO*

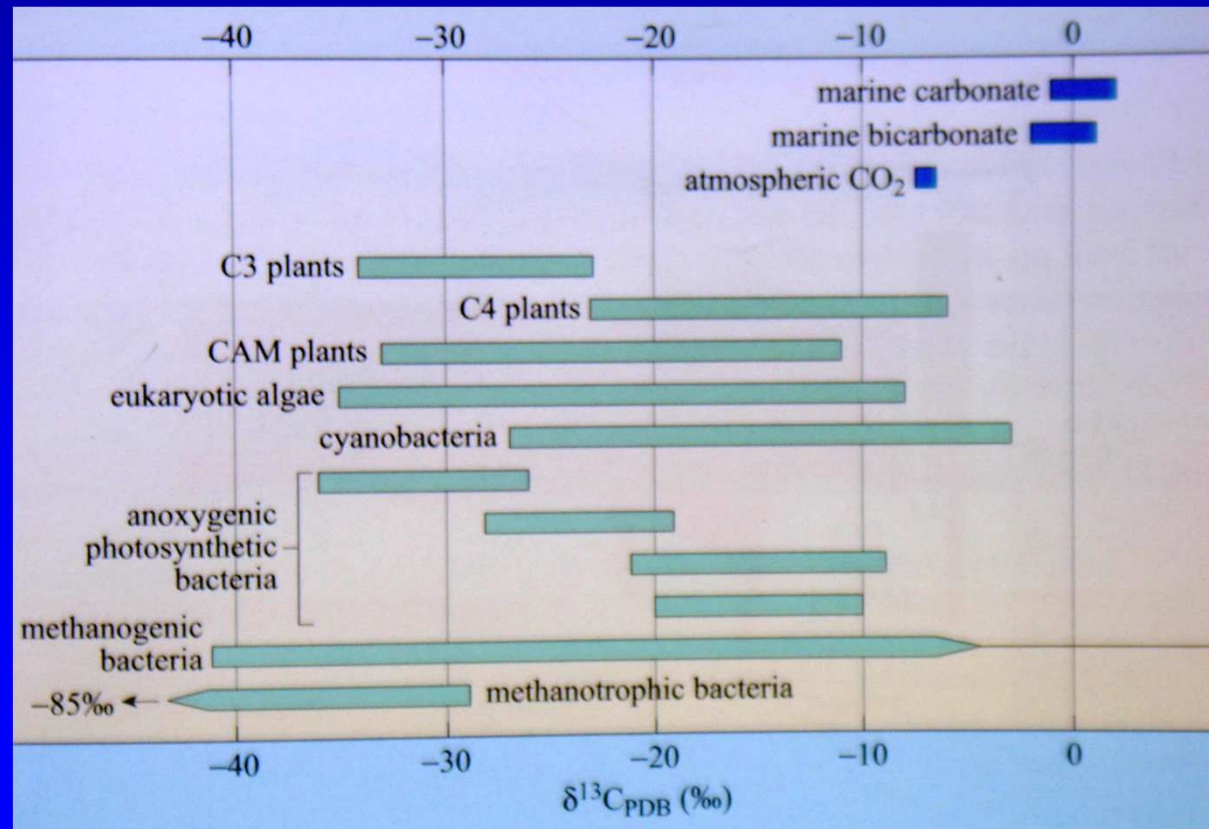
La figura riporta le variazioni del rapporto isotopico $^{12}\text{C} / ^{13}\text{C}$ rispetto al valore standard terrestre di 1/9, misurate in alcuni organismi viventi (autotrofi) che metabolizzano il carbonio e lo trasformano.

Variazioni di questo stesso rapporto sono state rilevate anche nelle rocce di Isua (Groenlandia Occ.), vecchie di circa 3,8 miliardi di anni.

*NON È l'unica possibile interpretazione ...
però molti studiosi ritengono che organismi fissatori di carbonio fossero già presenti 3,8 miliardi di anni fa.*

*La vita terrestre allora
RISALIREBBE a circa 4 miliardi di anni fa ...*

e sarebbe AUTOTROFA



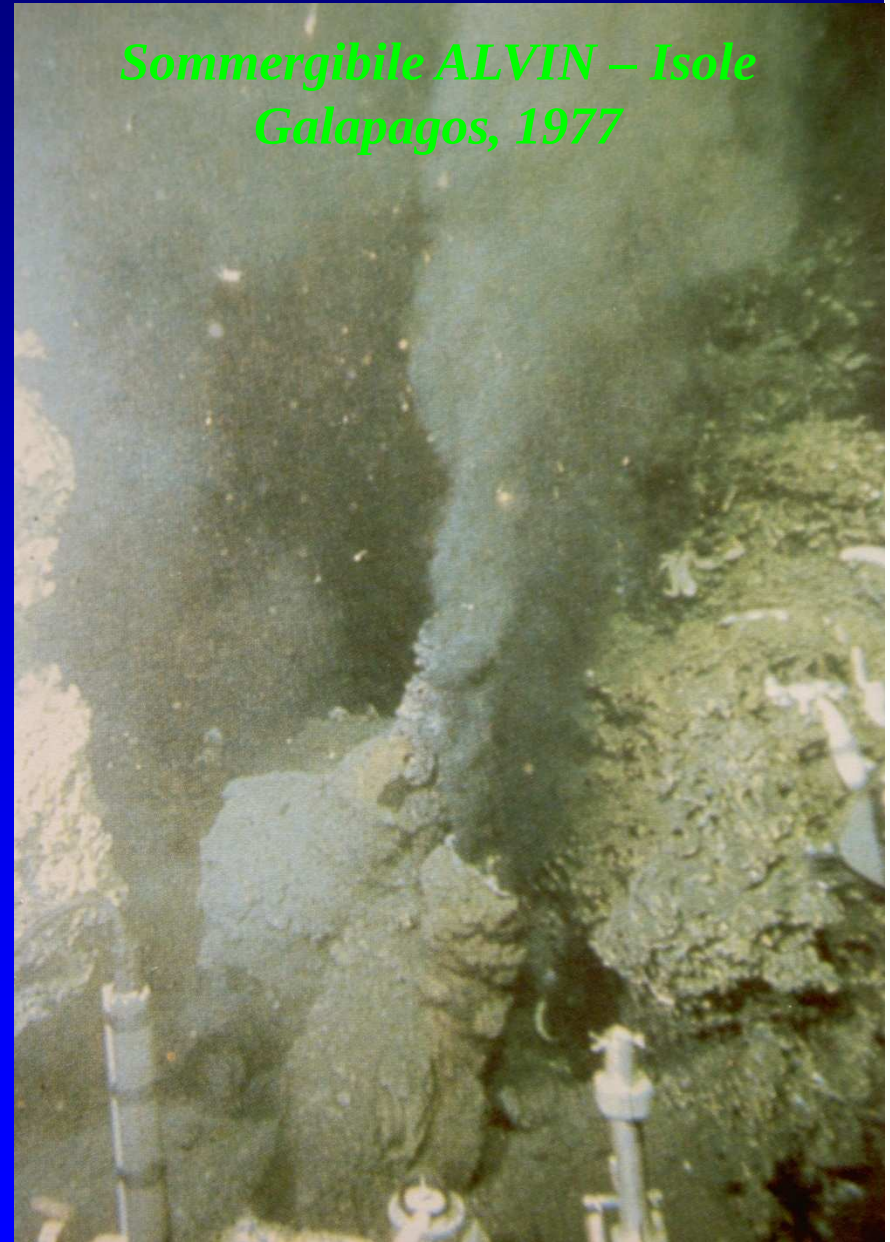
***MA COME È POSSIBILE CHE I
PRIMI ORGANISMI SI
PRODUCESSERO DA SOLI IL
PROPRIO CIBO (AUTOTROFI) ?***

***DOVE POTEVANO PRENDERE
L'ENERGIA NECESSARIA PER
FABBRICARLO?***

I CAMINI SOTTOMARINI

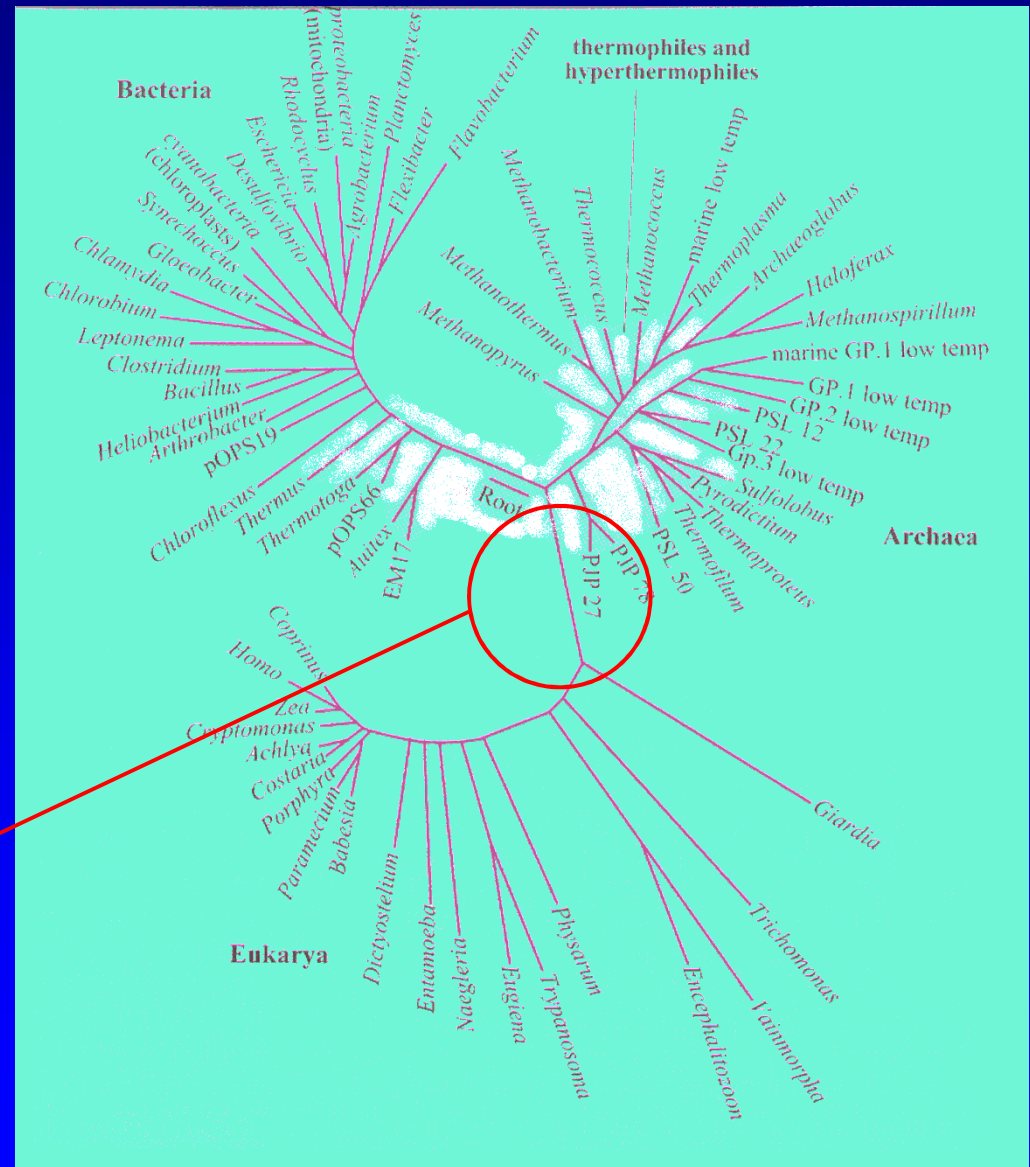
- *Scoperti negli ultimi decenni in corrispondenza di dorsali medio-oceaniche*
- *Oasi di vita in ambiente ostile*
- *Calore geotermico (fino a 400°C)*
- *Più di 50 specie di batteri e altri organismi classificati*
- *Il **Pyrolobus fumarii** prospera sulle pareti dei camini a temperature di **oltre 100°C***
- *Altri batteri producono zolfo e/o metano*

Sommergibile ALVIN – Isole Galapagos, 1977



L'ALBERO DELLA VITA

- ✓ Basato sull'RNA dei ribosomi
- ✓ La lunghezza dei tratti che separano due specie è proporzionale alla loro diversità genetica
- ✓ TRE domini principali (Batteri, Archeobatteri, Eucarioti)
- ✓ Alla radice (bianco) solo batteri termofili e ipertermofili (possibile spiegazione: primi organismi nati in ambienti simili ai camini sottomarini)
- ✓ NOTARE il lungo ramo degli organismi più complessi (Eucarioti)



UNA RICOSTRUZIONE PLAUSIBILE

... ma non sicura!

L'ambiente della Terra primitiva, benché privo di ossigeno, conteneva i mattoni essenziali della vita (vari composti a base di carbonio)

C'erano anche acqua liquida, sorgenti di energia e un ciclo del carbonio già attivo (rocce $\leftrightarrow$ CO₂ $\leftrightarrow$ atmosfera)

L'energia del Sole non fu utilizzata subito (richiede organismi altamente evoluti ed era forte la componente nociva UV)

La prima fonte energetica fu geotermica: nei camini sottomarini ad alta temperatura (> 100 °C), poteva avvenire la sintesi di carboidrati basata sulla chimica dello zolfo: $n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{S} \longrightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n + n\text{H}_2\text{O} + n\text{S}$

I primi organismi furono quindi batteri autotrofi (iper)termofili in grado di ricavare composti organici ed energia per CHEMIOSINTESI

*L'ipotesi dell'origine della vita terrestre presso i camini sottomarini spiega perché **tutti** gli organismi alla radice dell'”albero della vita” siano termofili o ipertermofili.*

L'ipotesi di glaciazioni globali nel Proterozoico spiega invece la lunghezza del ramo degli organismi più evoluti (Eucarioti): le avverse condizioni climatiche avrebbero “potato” altri rami, oggi estinti.



Tribrachidium, fauna di Ediacara (Australia, 670 milioni di anni)

I cicli glaciazione/riscaldamento potrebbero anche spiegare come mai l'evoluzione della vita sia stata molto lenta fino al termine del Proterozoico (580 milioni di anni fa).



Cyclomedusa, fauna di Ediacara (Australia, 670 milioni di anni)



Inkrylovia, fauna di Ediacara (Australia, 670 milioni di anni)

ERA	PERIODO	ETÀ (milioni di anni)	EVOLUZIONE DELLA VITA
ARCHEANA		3600	Filamenti, possibili cianobatteri
PROTEROZOICA		2500 1600 900 670	Cianobatteri - aumenta l'ossigeno in atmosfera primi Eucarioti, alghe multicellulari alghe verdi, impronte di animali fossili Fauna di Ediacara
PALEOZOICA (primaria)	Cambriano Ordoviciano Siluriano Devoniano Carbonifero Permiano	543 490 439 409 354 290	Organismi a simmetria bilaterale, artropodi acquatici Primi pesci, prime piante terrestri Primi anfibi Foreste di felci ed equiseti Primi insetti Primi rettili
MESOZOICA (secondaria)	Triassico Giurassico Cretaceo	251 206 144	Primi dinosauri, primi mammiferi Primi uccelli Gimnosperme - prime piante con fiori (Angiosperme)
CENOZOICA (terziaria)	Eocene Oligocene Miocene Pliocene	65 45 25 10	Estinzione dei dinosauri ed esplosione dei mammiferi Primati più antichi Varie specie Australopithecus
QUATERNARIA	Pleistocene Olocene	1,8 ...	Varie specie HOMO ...

L'ESPLOSIONE CAMBRIANA

Circa 550 milioni di anni fa la vita conobbe uno sviluppo mai visto in precedenza, diversificandosi in un numero incredibile di specie.

Col tempo alcuni organismi uscirono dall'acqua, colonizzando la terraferma e sviluppando forme animali (anfibi, rettili) e vegetali (fotosintesi clorofilliana). Gli insetti furono i primi inventori del volo.

Crebbero progressivamente anche le dimensioni degli organismi viventi, fino ai maggiori dinosauri e agli odierni mammiferi.

Nonostante oscillazioni climatiche ed estinzioni di massa, dovute a possibili impatti di asteroidi (date ipotizzate: 439, 367, 251, 206 e 65 milioni di anni fa) la vita ha prosperato sul nostro pianeta, trasformandolo con la sua attività.



BIBLIOGRAFIA

An introduction to astrobiology – I. Gilmour e M. A. Sephton, ed. – Cambridge University Press (2004)

An introduction to cosmochemistry - C. R. Cowley - Cambridge University Press (1995)

FINE

