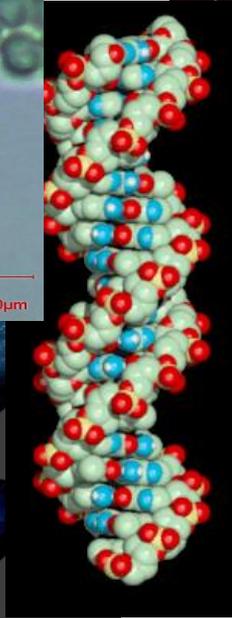
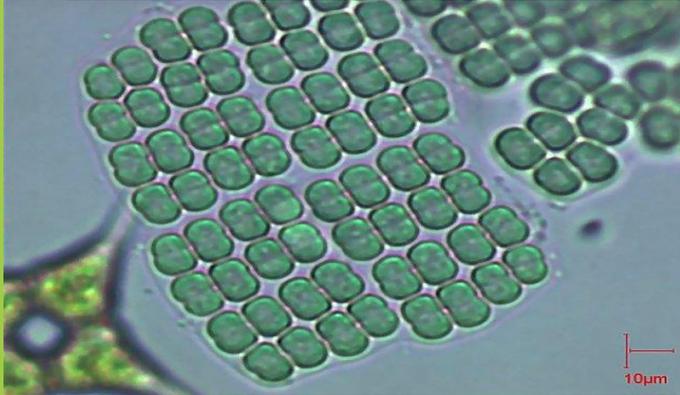
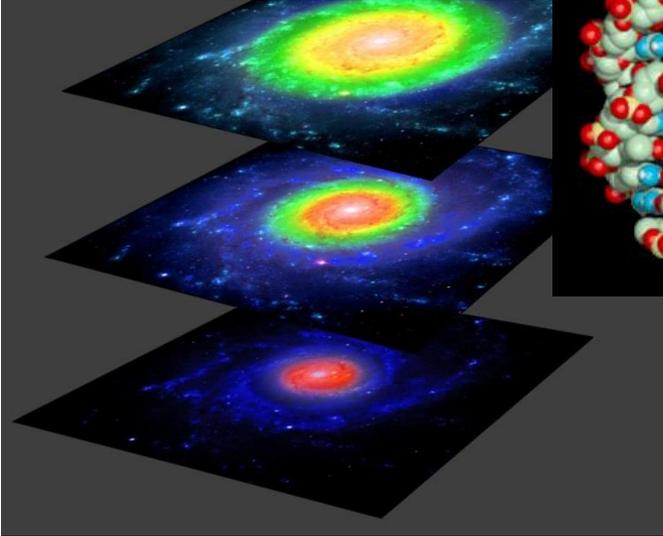


Astrobiologia

La ricerca della vita
nell'Universo



Un viaggio
nel tempo
e nello spazio



Scienza che studia la vita nel cosmo
...compresa la Terra!

Giuseppe Murante

I.N.A.F., Osservatorio di Trieste

Campus 2024

Cos'è l'Astrobiologia??

- ▶ Lo studio della vita nell'Universo
- ▶ ...compresa la Terra
- ▶ La Prima Domanda è': *la ricerca della Vita nell'Universo*
- ▶ La Vera Domanda è':
quanto è comune la vita nell'Universo?
- ▶ ..e la domanda finale è': **siamo soli?**
(parlerò poco di questo però)



Una scienza multidisciplinare

L'Astrobiologia è fortemente multidisciplinare

Chimica, Biologia, Astronomia, Geologia, Climatologia...

⊙ Difficoltà dell'approccio multidisciplinare

- > Necessità di far interagire esperti di aree scientifiche molto diverse, spesso non comunicanti

⊙ Vantaggi dell'approccio multidisciplinare

- > Spesso le grandi scoperte scientifiche sono state fatte mettendo in comunicazione risultati scientifici provenienti da diverse aree



Un viaggio in tre capitoli

- Questioni generali.
 - > Definizione di Vita.
 - > La vita come noi la conosciamo.
 - > Origine ed evoluzione della vita sulla terra
- Esplorando il sistema solare
 - > Marte
 - > Europa
 - > Titano
 - > Encelado
- Pianeti abitabili fuori dal sistema solare
 - > Come cercare vita così lontano?
 - > L'importanza del clima
 - > Una Galassia abitabile?

Per molte immagini e slides si ringrazia Giovanni Vladilo. Alcune sono tratte dal suo corso universitario di Astobiologia, presso l'Università di Trieste.

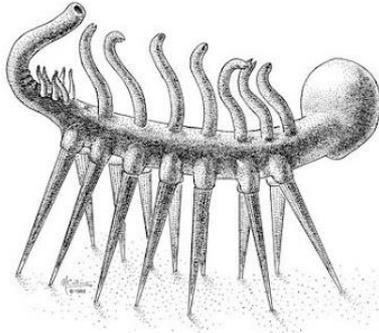
Capitolo uno

Le “grandi” questioni generali



Difficile definire la vita

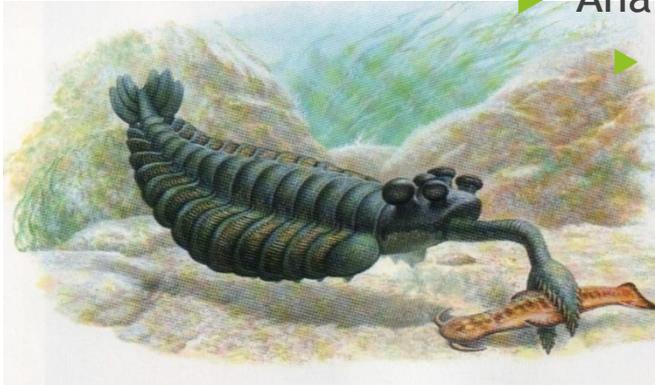
- ▶ Il concetto di vita è difficile da definire
 - ▶ Difficile pertanto delimitare in maniera chiara gli studi astrobiologia
 - ▶ Questo problema presta il fianco a critiche di principio
 - ▶ Che senso ha cercare nell'Universo qualcosa che non sappiamo neppure ben definire sulla Terra ?



La nostra difficoltà di definire la vita probabilmente riflette la mancanza, al momento attuale, di una teoria scientifica adeguata a descriverla

▶ Analogia:

- ▶ quando non esisteva una teoria adeguata per descrivere atomi e molecole era impossibile definire l'acqua in maniera semplice (H_2O)
- ▶ Bisognava fare una lista delle proprietà conosciute dell'acqua, del ghiaccio, del vapore acqueo...



Definizioni attuali della vita

Fondamentali in astrobiologia

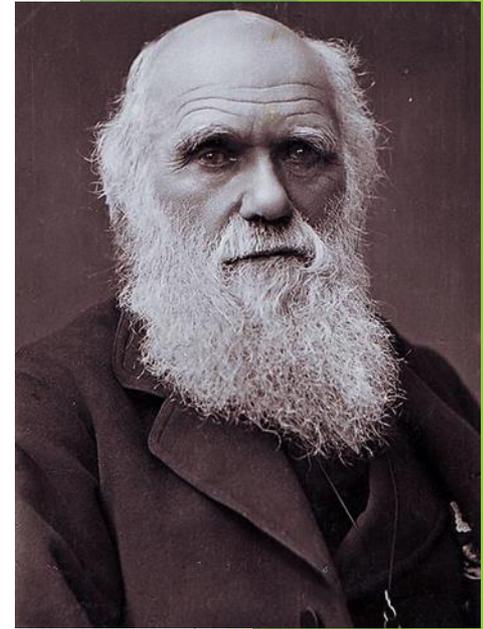
- ▶ Dobbiamo caratterizzare il tipo di vita che speriamo di poter trovare in modo da poter progettare in maniera ottimale esperimenti e osservazioni per il suo rilevamento
- ▶ Lunga serie di tentativi di definizione della vita
- ▶ Un approccio conservativo è quello di usare la vita di tipo terrestre come paradigma per la ricerca di vita nell'Universo
 - ▶ **“Life as we know it”**



La mia definizione preferita

“Descendant with modification”:
e' vita tutto quello che si riproduce fedelmente, ma che puo' comunque cambiare e sottostare all'*evoluzione darwiniana*

...come ogni definizione di vita ha i suoi difetti (ad esempio, in questo modo i virus informatici polimorfi sono vivi!)



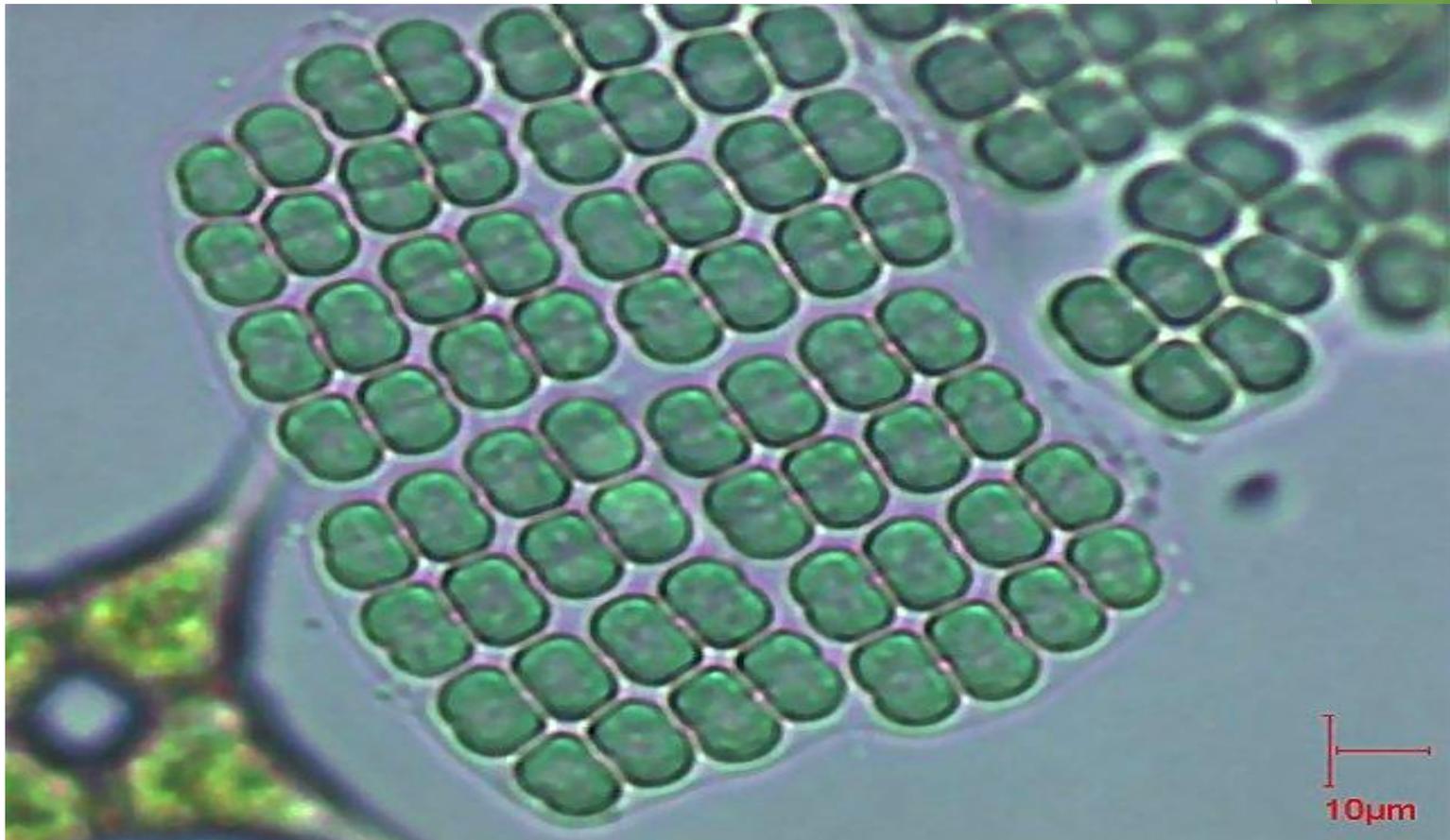
Linee di ricerca in Astrobiologia

- ▶ **Equazione di Drake**

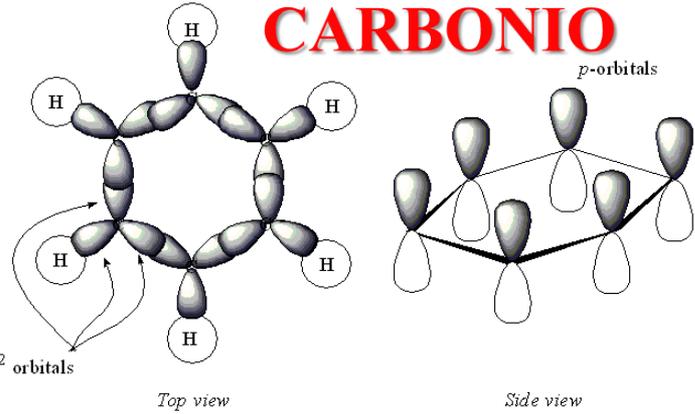
$$N = f_* f_p n_e f_l f_i f_c T$$

- ▶ **Paradosso di Fermi:** “dove sono tutti?” (T piccolo rispetto ad un tempo di Hubble)
- ▶ **Origine della vita,** caratteristiche biochimiche ed evoluzione della vita terrestre, habitat estremi
- ▶ **Influenza dell’ambiente astronomico** sulla vita sulla Terra (e quindi su altri pianeti)
- ▶ **Ricerca di ambienti non terrestri** atti ad ospitare la vita: sistema solare, exopianeti, zone abitabili..
- ▶ **Ricerca della vita** in tali ambienti

..il viaggio nel tempo...
...la vita come la conosciamo



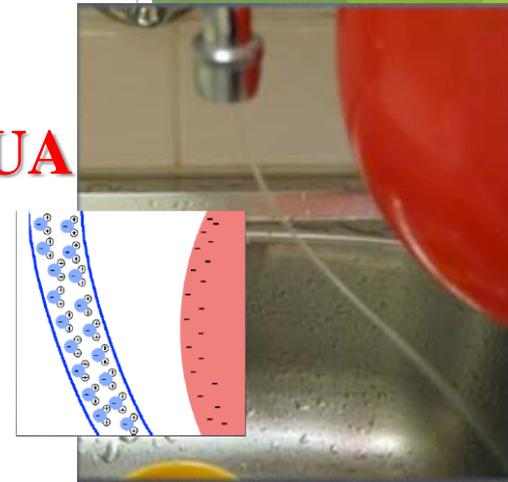
CARBONIO



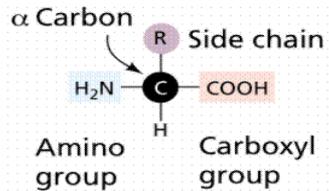
ENERGIA



ACQUA

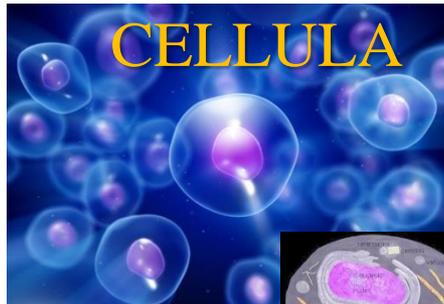


Conventional depiction

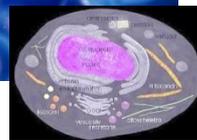


PROTEINE

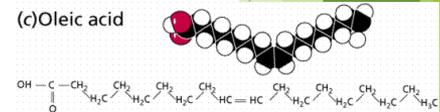
(Aminoacidi)



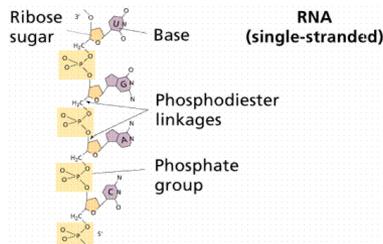
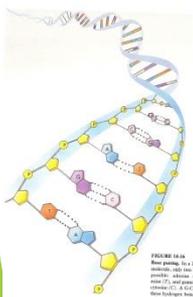
CELLULA



LIPIDI



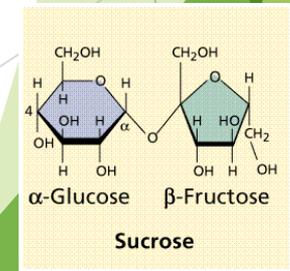
DNA/RNA



(Acidi nucleici)

CARBOIDRATI

(Zuccheri)



Gli elementi chimici della vita

H, C, N, O

S, P

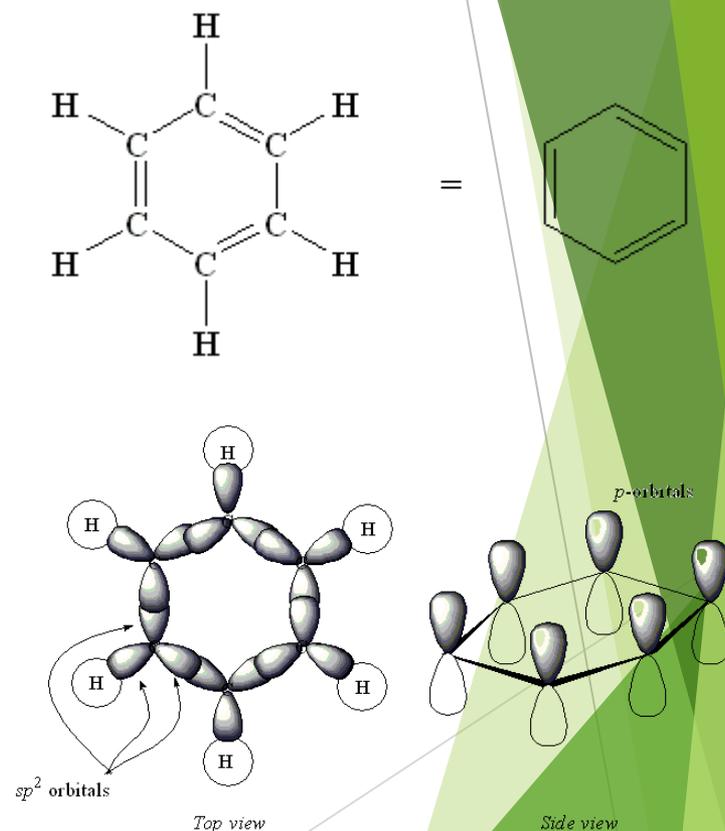
Ca, K, Na, Cl, Mg, Fe, ...

Distribution of elements in the human body (by weight)

Element	Atomic number	Percentage	Role
oxygen	8	65.0	cellular respiration, component of water
carbon	6	18.5	basis of organic molecules
hydrogen	1	9.5	component of water and most organic molecules, electron carrier
nitrogen	7	3.3	component of all proteins and nucleic acids
calcium	20	1.5	component of bones and teeth, triggers muscle contraction
phosphorus	15	1.0	component of nucleic acids, important in energy transfer
potassium	19	0.4	min positive ion inside cells, important in nerve function
sulfur	16	0.3	component of most proteins
sodium	11	0.2	main positive ion outside cells, important in nerve function
chlorine	17	0.2	main negative ion outside cells
magnesium	12	0.1	essential component of many energy-transferring enzymes
iron	26	trace	essential component of hemoglobin in the blood
copper	29	trace	component of many enzymes
molybdenum	42	trace	component of many enzymes
zinc	30	trace	component of some enzymes
iodine	53	trace	component of thyroid hormone

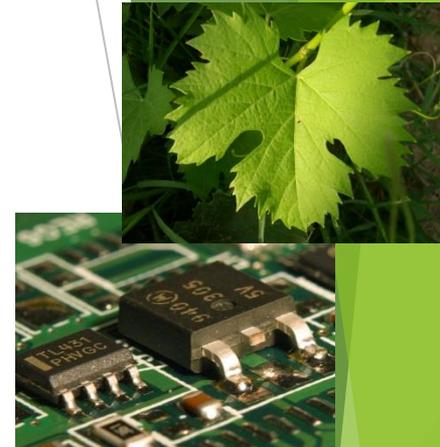
Il carbonio come base della chimica organica

- ▶ Il carbonio ha una notevole capacità di costruire molecole stabili complesse, anche con una struttura tridimensionale estesa, unendosi con se stesso e con altri elementi, in particolare H, O e N
- ▶ È l'unico atomo che forma anelli aromatici
- ▶ Questa flessibilità del carbonio permette l'esistenza di milioni di diversi composti nella chimica organica



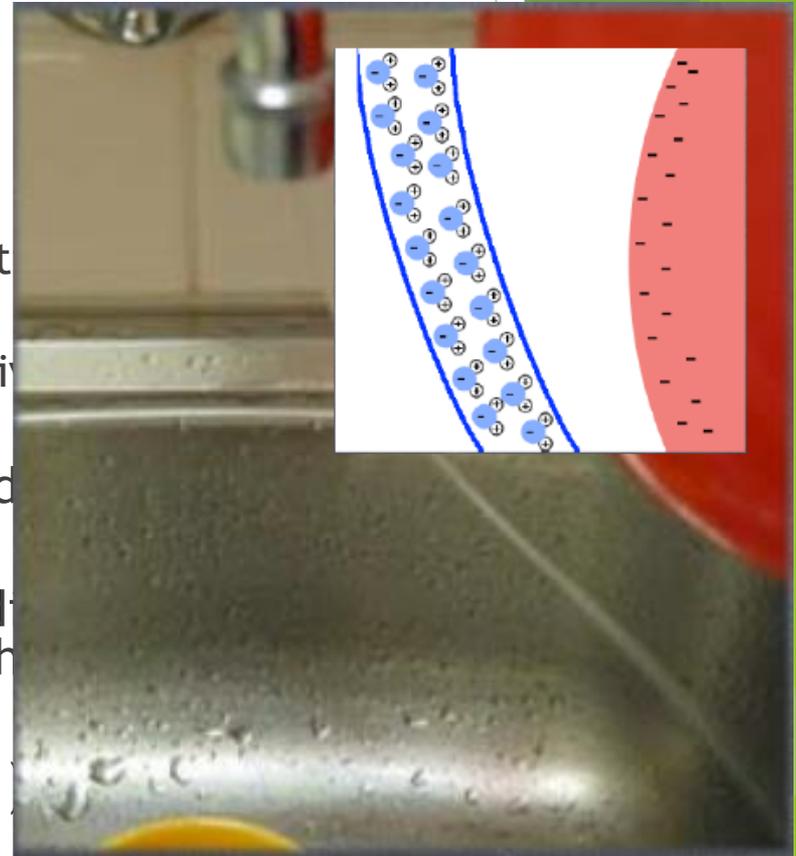
Confronto carbonio e silicio

- ▶ Il Si sta nella stessa colonna del C nella tavola periodica degli elementi
 - ▶ Viene talvolta suggerito come possibile alternativa per la costruzione di molecole biologiche in ambienti non terrestri
- ▶ Il Si non riesce però a formare legami doppi con la stessa facilità del C
 - ▶ Il suo maggior volume riduce la regione di sovrapposizione degli orbitali p
 - ▶ La chimica basata sul Si è molto meno versatile di quella basata sul C
- ✦ La maggior versatilità del C è provata dal gran numero di molecole organiche complesse trovate nel mezzo interstellare e nei meteoriti
 - ◆ Molecole di grande complessità basate sul Si non sono state trovate

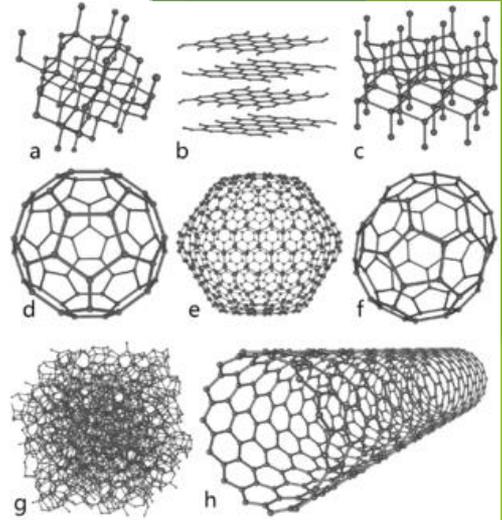


L'acqua e la vita

- ▶ La vita che conosciamo richiede un mezzo in cui le molecole possano dissolversi e le reazioni chimiche del metabolismo possano avere luogo
- ▶ L'acqua è un solvente ideale
 - ▶ *Struttura polare*
 - ▶ Eccesso di carica elettrica negativa corrispondenza dell'atomo di O
 - ▶ Eccesso di carica elettrica positiva corrispondenza degli atomi di H
 - ▶ Capacità di formare legami di idrogeno con i soluti polari
 - ▶ Liquida in un ampio intervallo di temperature. Altre caratteristiche notevoli
- ▶ ...altri solventi? (..ammoniaca..)



La fisica della vita

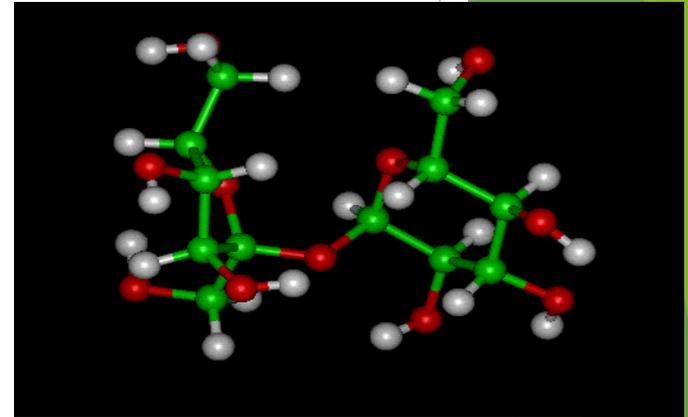
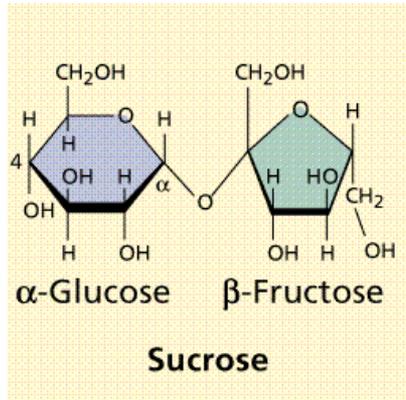


- ▶ Molecole complesse: **CARBONIO**
- ▶ Elementi ossidanti che producono energia:
FLUORO (ma esplose)
CLORO (ma forma candeggina)
OSSIGENO (terzo elemento più comune dell'Universo)
- ▶ Solvente, possibilmente polare, che permetta il metabolismo: **ACQUA**
AMMONIACA (ma è liquida a temperature troppo basse?)

...la vita come la conosciamo sembra avere poche possibili alternative chimiche e fisiche

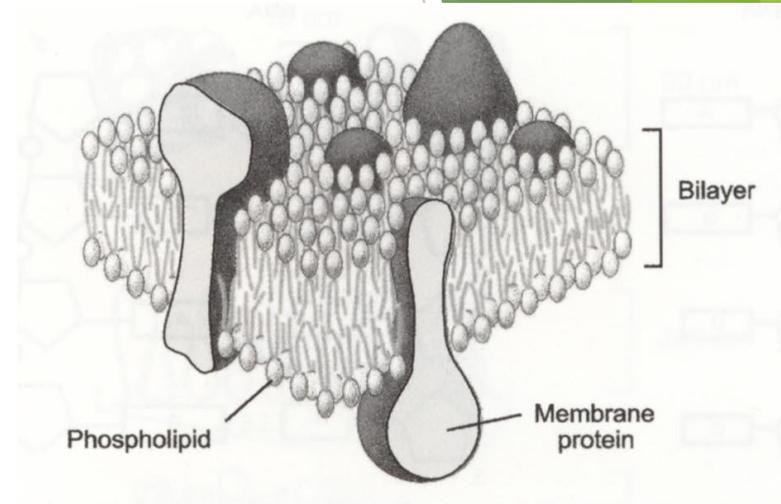
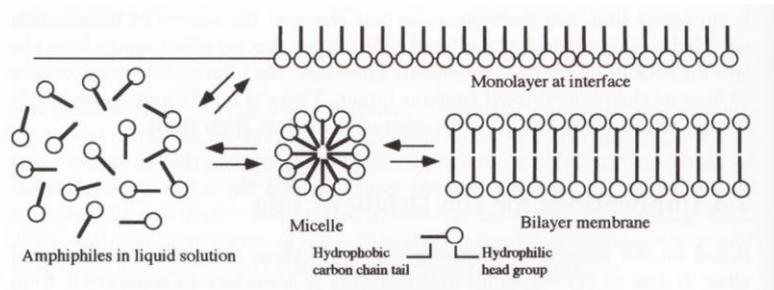
Le macromolecole della vita

1. Carboidrati



- ▶ Molecole biologiche più abbondanti
 - ▶ Sorgente primaria di energia chimica per molti organismi
 - ▶ Componenti essenziali degli acidi nucleici
- ▶ Formula generale: $C_x(H_2O)_y$
 - ▶ Monosaccaridi
 - ▶ Disaccaridi : Da 2 a 10 unità di monosaccaridi
 - ▶ Polisaccaridi: Contengono un numero maggiore di 10 monosaccaridi

Fosfolipidi e membrane cellulari



...origine della cellula?

► Hanno un' **estremità idrofila** e **una idrofobica**

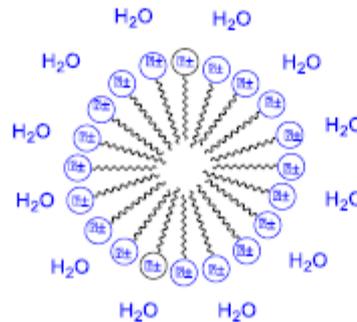
► Nelle membrane formano un doppio strato ("bilayer") con le estremità idrofobiche verso l'interno e quelle idrofile verso l'esterno

► Molecole *anfifiliche*

► In un liquido acquoso tendono a formare spontaneamente un doppio strato

Idrocarburi! (Titano)

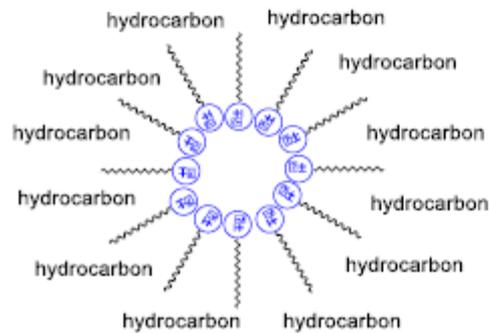
+ Typical micelle (in water)



Facchin, Perosa, Riello (2015)

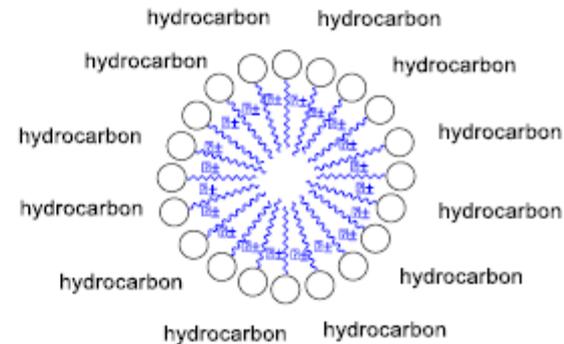
+ Typical surfactant: polar head, lipophilic tail

Inverse aggregate (e.g. micelle in hydrocarbon)



+ Typical surfactant: polar head, lipophilic tail

Typical aggregate (e.g. micelle in hydrocarbon)



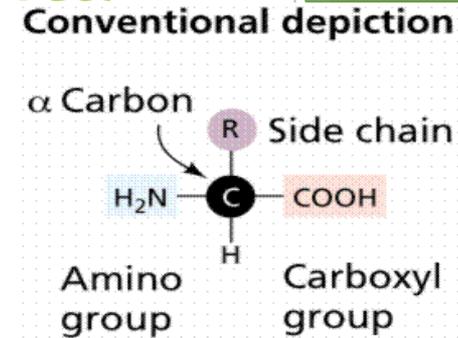
• Reverse surfactant: lipophilic head, polar tail

La macromolecole della vita

3. Amminoacidi

Table 7.2 *The Twenty Amino Acids Found in Living Organisms*

Amino Acid*	Chemical Formula	Number of Atoms
L-Alanine	C ₃ H ₇ O ₂ N	13
L-Arginine	C ₆ H ₁₅ O ₂ N ₄	27
L-Asparagine	C ₄ H ₈ O ₃ N ₂	17
L-Aspartic Acid	C ₄ H ₆ O ₄ N	15
L-Cysteine	C ₃ H ₇ O ₂ NS	14
L-Glutamic Acid	C ₅ H ₈ O ₄ N	18
L-Glutamine	C ₅ H ₁₀ O ₃ N ₂	20
Glycine	C ₂ H ₅ O ₂ N	10
L-Histidine	C ₆ H ₉ O ₂ N ₃	20
L-Isoleucine	C ₆ H ₁₃ O ₂ N	22
L-Leucine	C ₆ H ₁₃ O ₂ N	22
L-Lysine	C ₆ H ₁₅ O ₂ N ₂	25
L-Methionine	C ₅ H ₁₁ O ₂ NS	20
L-Phenylalanine	C ₉ H ₁₁ O ₂ N	23
L-Proline	C ₅ H ₉ O ₂ N	17
L-Serine	C ₃ H ₇ O ₃ N	14
L-Threonine	C ₄ H ₉ O ₃ N	17
L-Tryptophan	C ₁₁ H ₁₂ O ₂ N ₂	27
L-Tyrosine	C ₉ H ₁₁ O ₃ N	24
L-Valine	C ₅ H ₁₁ O ₂ N	19



- ✦ Solo 20 sono codificati dal DNA per assemblare proteine
 - ✦ La chimica organica ne permetterebbe l'esistenza di migliaia
 - Nei sistemi biologici ne sono stati identificati più di 170
- ✦ La vita ha scelto una lista ristretta di amminoacidi

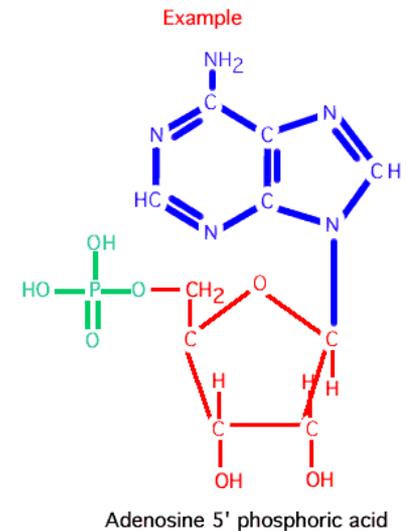
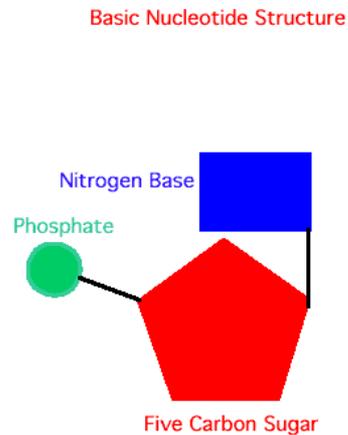
Le macromolecole della vita

4. Acidi nucleici

Racchiudono e replicano l'informazione genetica
Sono polimeri molto lunghi di sub-unità chiamate nucleotidi

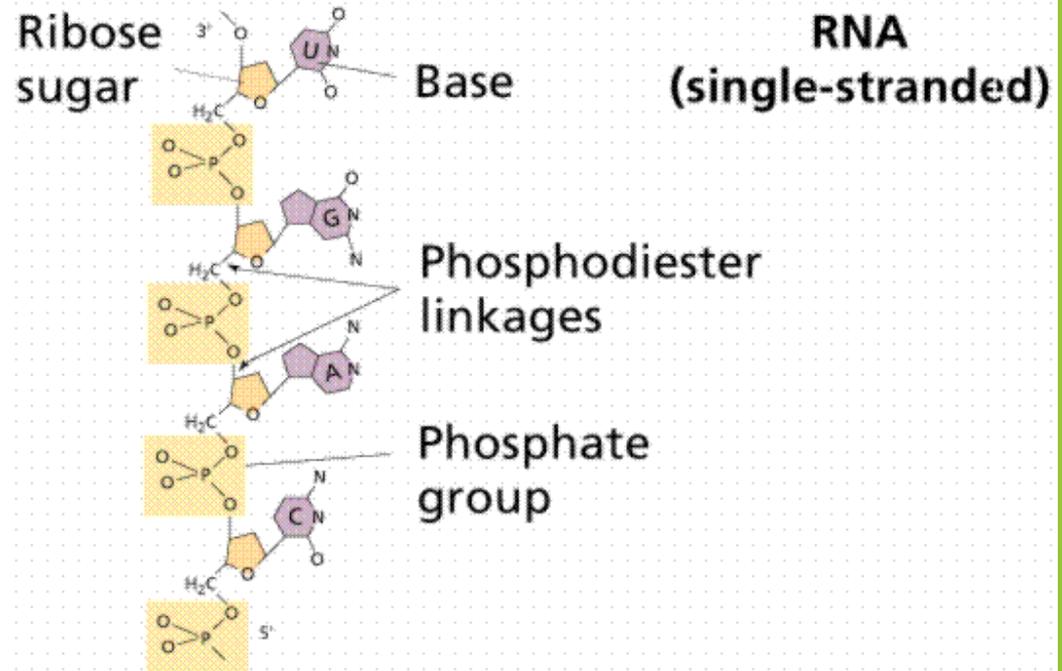
Un nucleotide è costituito da

- ▶ Una base organica azotata
- ▶ Uno zucchero a 5 atomi di C
- ▶ Un gruppo fosfato



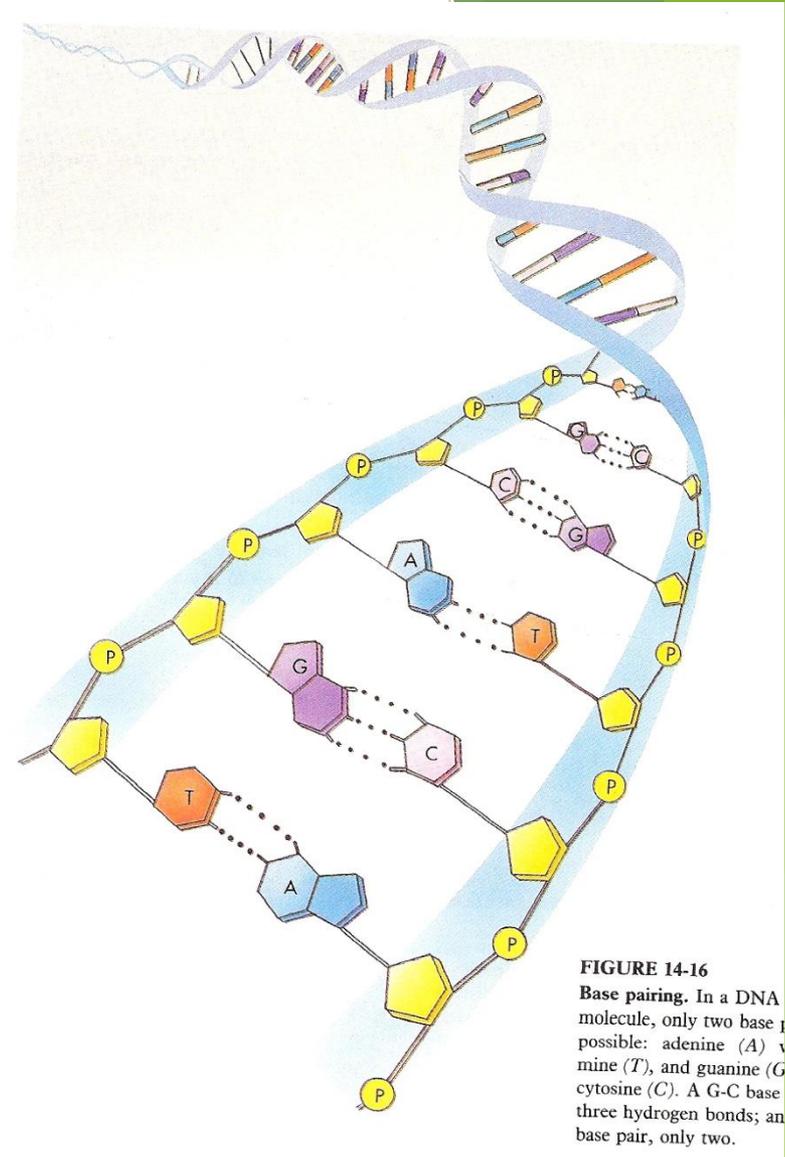
RNA

- ▶ Singolo filamento
- ▶ Ha 4 basi
 - ▶ Puriniche
 - ▶ Adenina, Guanina
 - ▶ Pirimidiniche
 - ▶ Citosina, Uracile
- ▶ Dirige la sintesi delle proteine
 - ▶ L'ordine delle basi determina l'ordine in cui gli amminoacidi sono assemblati



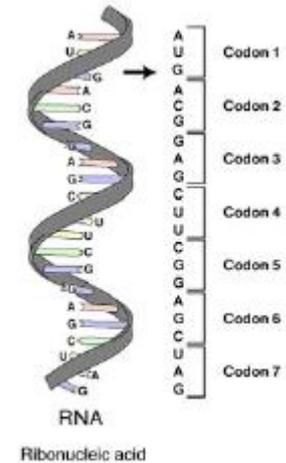
DNA

- ▶ Ha due filamenti avvolti in una struttura a doppia elica
- ▶ I gruppi fosfato e deossiribosio costituiscono la struttura portante di ciascun filamento
- ▶ Ha 4 tipi di basi
 - ▶ 2 puriniche
 - ▶ Adenina e Guanina
 - ▶ 2 pirimidiniche
 - ▶ Citosina e Timina
 - ▶ La Timina sostituisce l'Uracile usata nel RNA
- ▶ Nell'accoppiamento tra i due filamenti è fondamentale la complementarità delle basi puriniche e pirimidiniche



DNA e genetica

Codoni: gruppi di tre delle quattro basi nucleiche. $4^3=64$ combinazioni possibili



Correspondence between RNA codons and amino acids

A=Adenine
G=Guanine
C=Cytosine
U=Uracyl

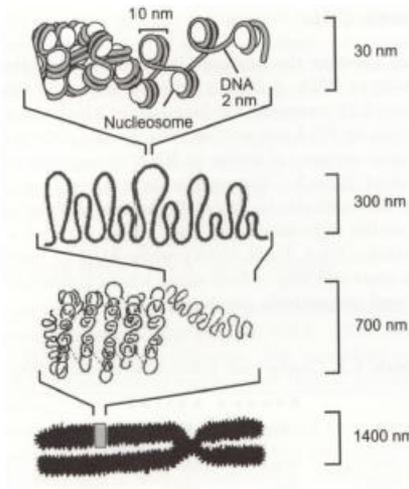
First letter	Second letter				Third letter
	U	C	A	G	
U	UUU } Phe UUC } UUA } UUG } Leu	UCU } UCC } Ser UCA } UCG }	UAU } Tyr UAC } UAA } Stop UAG } Stop	UGU } Cys UGC } UGA } Stop UGG } Trp	U C A G
C	CUU } CUC } CUA } CUG } Leu	CCU } CCC } CCA } CCG } Pro	CAU } His CAC } CAA } Gln CAG }	CGU } CGC } CGA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

Ogni codone identifica un aminoacido. Alcuni sono usati come segnale di «stop»

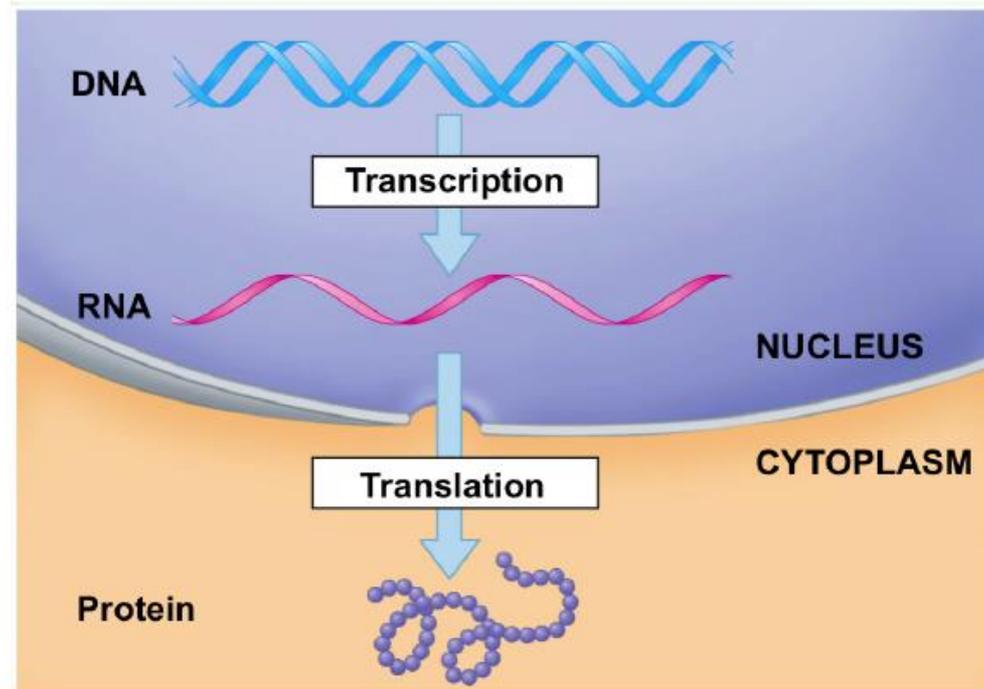
Telomeri: frammenti terminali del DNA. Si accorciano ad ogni replicazione. Morte cellulare?

Geni e trascrizione

Gene



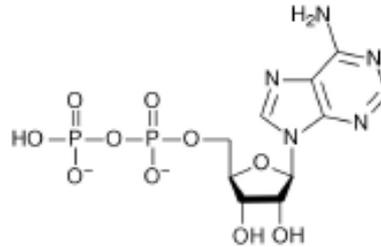
Sequenza di basi nucleiche
Descrive una funzione specifica
Ne esiste un numero molto grande



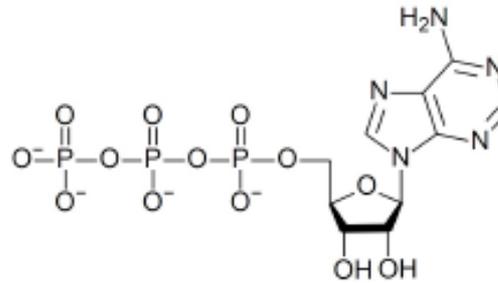
ADP & ATP

Energy exchange molecules

ADP
Adenosine diphosphate



ATP
Adenosine triphosphate



Terrestrial life features 4 types of macromolecules:
carbohydrates, lipids, proteins and nucleic acids

energetic

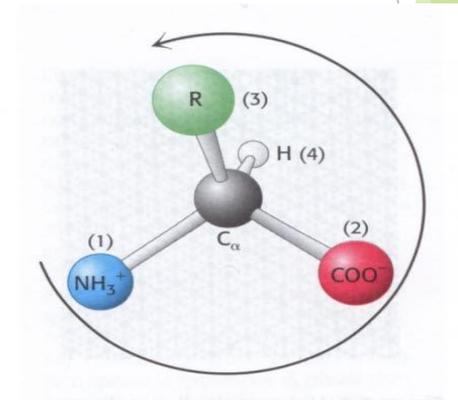
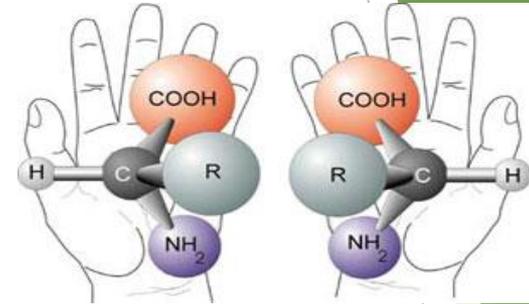
compartmentalization

metabolic

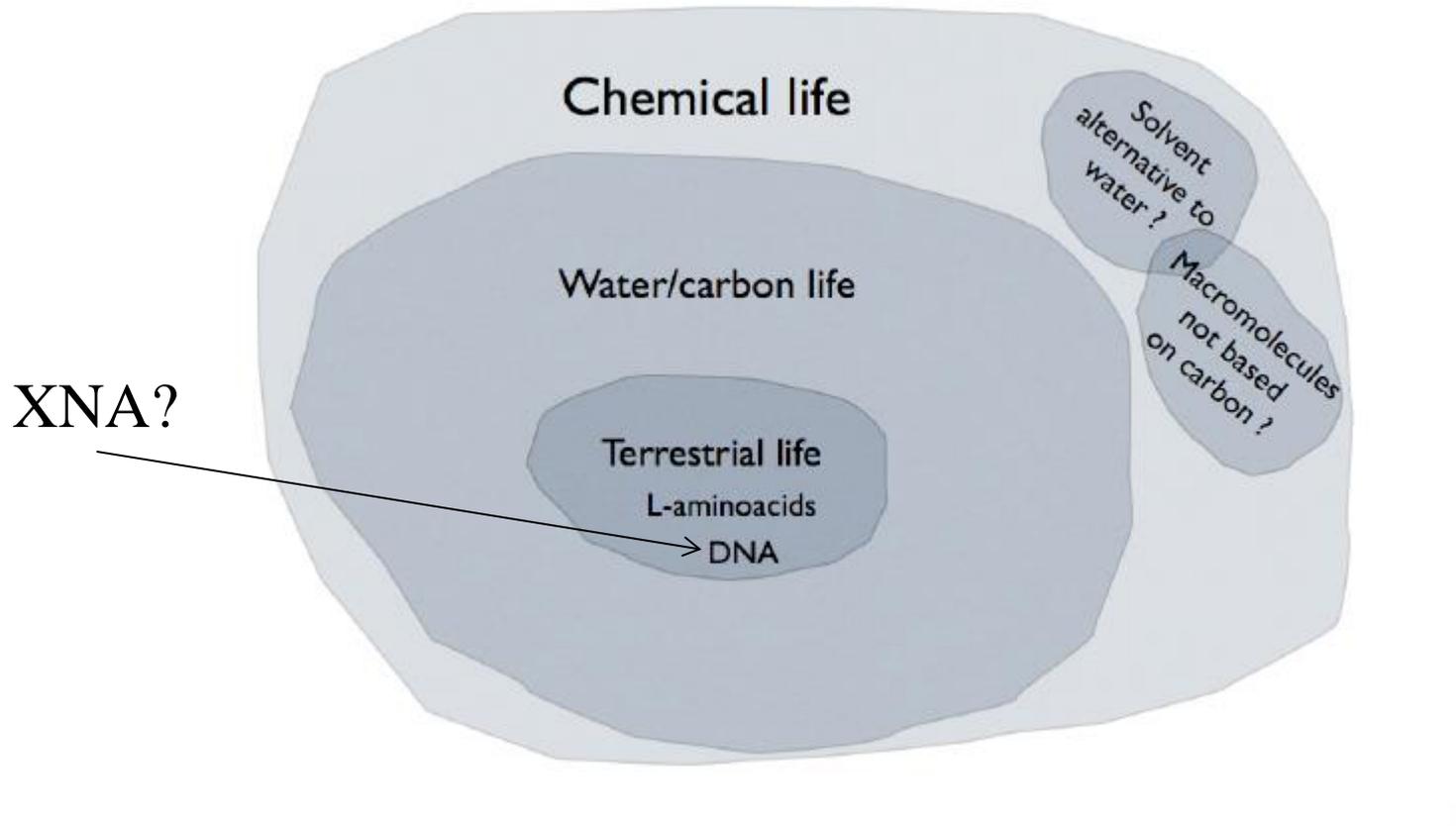
genetic

Omochiralità delle macromolecole biologiche

- ▶ Molecole non sovrapponibili alla propria immagine speculare sono dette chirali
- ▶ Gli amminoacidi e gli zuccheri biologici sono omochirali
- ▶ In natura le molecole organiche sono *racemiche* (mischiate!)
- ▶ Le molecole biotiche sono non racemiche: zuccheri destrorsi, proteine sinistrorse
- ▶ Uno dei problemi aperti: l'*origine* della chiralità' (...cosmica?)

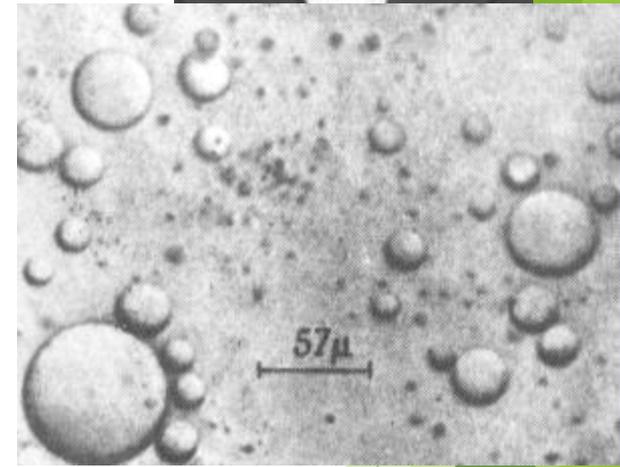


Possibili tipi di vita nell'Universo



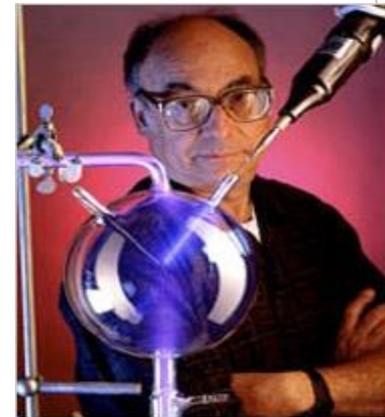
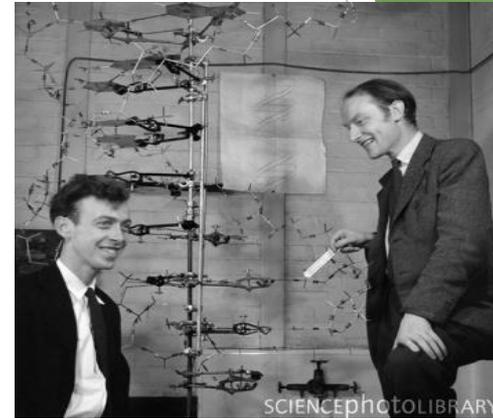
Primi lavori scientifici sull'origine della vita

- ▶ Anni 20 del novecento
 - ▶ Approccio laico e meccanicistico in opposizione al creazionismo biblico
 - ▶ **La vita come fenomeno chimico-fisico**
- ▶ Primi lavori fondamentali sull'origine della vita
 - ▶ Aleksander I. Oparin (1894-1980)
 - ▶ Articolo del 1924, Libro del 1936
 - ▶ John B.S. Haldane (1892-1964)
 - ▶ Articolo del 1929
- ▶ L'ipotesi dei “coacervati” (Oparin)
 - ▶ Macromolecole in soluzione acquosa
 - ▶ Goccioline con pellicola esterna capaci di suddividersi
 - ▶ Similitudine con “protocellule”



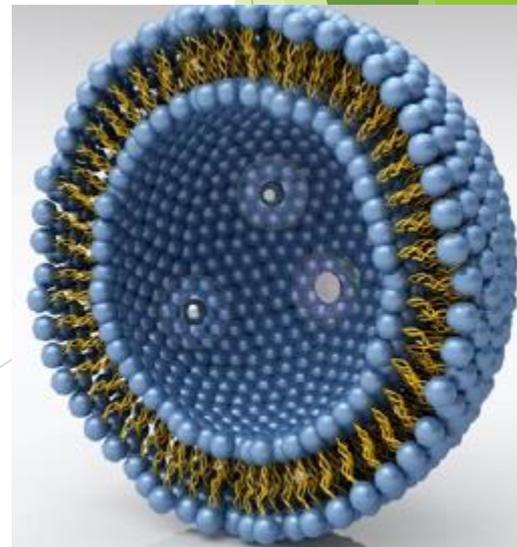
1953: “Annus Mirabilis” della biologia

- ▶ Scoperta della struttura del DNA
 - ▶ Watson & Crick
 - ▶ Fortissimo impulso agli studi di biologia molecolare e genetica
- ▶ Esperimento di Stanley Miller
 - ▶ Produzione di amminoacidi mediante dispositivo sperimentale che simulava le condizioni fisiche dell'atmosfera della Terra primitiva
 - ▶ Atmosfera riducente: NH_3 CH_4 H_2O H_2
 - ▶ Punto di partenza sperimentale per gli studi sull'origine della vita terrestre
 - ▶ Negli anni sessanta si susseguono esperimenti di atmosfere terrestri simulate più realistiche

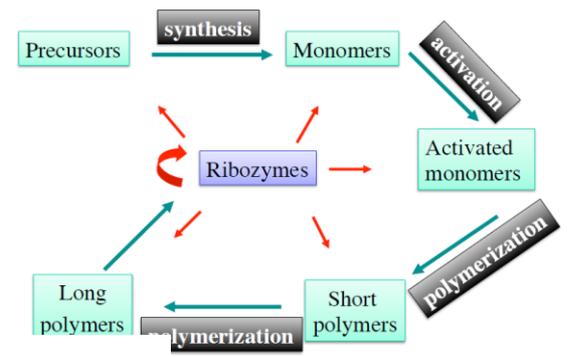


Origine della vita

- ▶ Dalle molecole prebiotiche alla vita
- ▶ **Pre-evoluzione darwiniana?**
- ▶ Organismi estremofili, fosse oceaniche idrotermiche, montmorilloniti..
- ▶ RNAworld, LIPIDworld, PROTEINworld
- ▶ Metabolism-first?
- ▶ Ribozimi, micelle e vescicole
- ▶ *Esperimenti di laboratorio!!*
- ▶ Ipotesi *panspermia*
- ▶ *Influenza della meccanica quantistica?*
- ▶ In ogni caso, potremo solo fare ipotesi sulla nascita della vita sulla Terra...



Dall'RNA world ai batteri



[FROM RNA WORLD TO BACTERIA]

Journey to the Modern Cell

After life got started, competition among life-forms fueled the drive toward ever more complex organisms. We may never know the exact details of early evolution, but here is a plausible sequence of some of the major events that led from the first protocell to DNA-based cells such as bacteria.

1 EVOLUTION STARTS ▲

The first protocell is just a sac of water and RNA and requires an external stimulus (such as cycles of heat and cold) to reproduce. But it will soon acquire new traits.

2 RNA CATALYSTS ▼

Ribozymes—folded RNA molecules analogous to protein-based enzymes—arise and take on such jobs as speeding up reproduction and strengthening the protocell's membrane. Consequently, protocells begin to reproduce on their own.

3 METABOLISM BEGINS ▲

Other ribozymes catalyze metabolism—chains of chemical reactions that enable protocells to tap into nutrients from the environment.

Ricardo & Szostak (2009)

4 PROTEINS APPEAR ▲

Complex systems of RNA catalysts begin to translate strings of RNA letters (genes) into chains of amino acids (proteins). Proteins later prove to be more efficient catalysts and able to carry out a variety of tasks.

5 PROTEINS TAKE OVER ▼

Proteins take on a wide range of tasks within the cell. Protein-based catalysts, or enzymes, gradually replace most ribozymes.

6 THE BIRTH OF DNA ▲

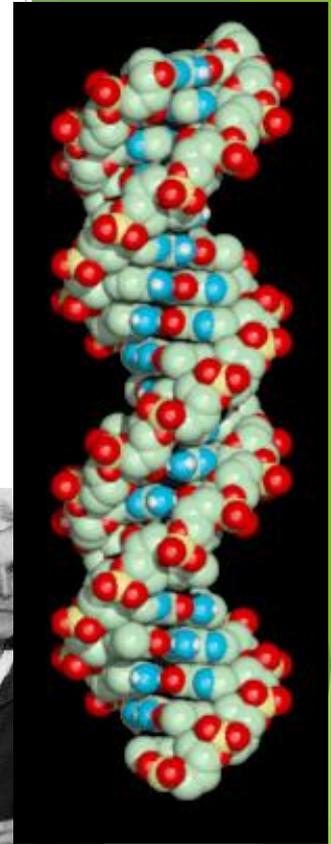
Other enzymes begin to make DNA. Thanks to its superior stability, DNA takes on the role of primary genetic molecule. RNA's main role is now to act as a bridge between DNA and proteins.

7 BACTERIAL WORLD ▲

Organisms resembling modern bacteria adapt to living virtually everywhere on earth and rule unopposed for billions of years, until some of them begin to evolve into more complex organisms.

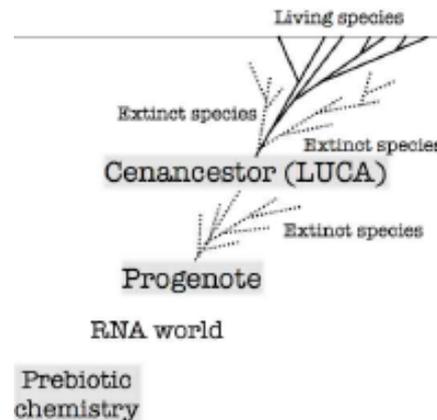
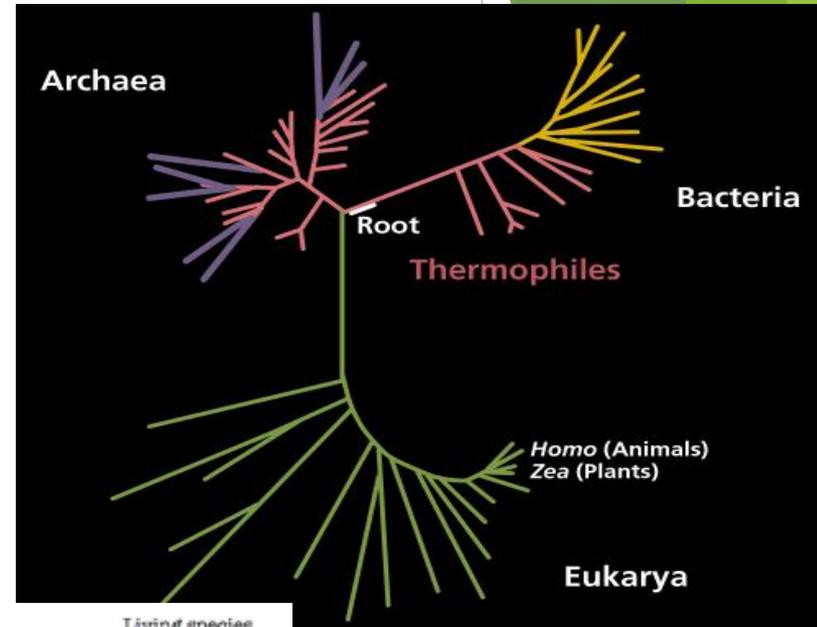
Confronto tra sequenze di geni in diverse specie viventi

- ▶ La biologia molecolare ci permette di studiare l'evoluzione delle specie viventi dal confronto del loro codice genetico
- ▶ Carl Woese si è concentrato su di una sequenza particolare del codice genetico, l'RNA ribosomiale 16s, che è presente nel genoma di tutti gli esseri viventi
- ▶ Da questo tipo di studi è stato possibile ricostruire un albero filogenetico molecolare della vita



L'albero filogenetico

- ▶ Rappresenta il grado di parentela delle attuali speci viventi
 - ▶ La distanza tra due speci è proporzionale alle differenze tra gli RNA mitocondriali
- ▶ Si è scoperto in tal modo un nuovo dominio della vita, l'Archea
- ▶ I 3 domini della vita
 - ▶ Procarioti
 - ▶ Archea
 - ▶ Batteri
 - ▶ Eucarioti



Processi energetici negli organismi terrestri

► Fonti di energia

► L'esistenza di fonti di energia è una condizione necessaria per la vita

► I sistemi viventi hanno bisogno di un flusso di energia

- Per auto-organizzarsi, mantenendo un basso livello di entropia
- Per svolgere lavoro

► Distinzione degli organismi terrestri sulla base della fonte di energia

► Autotrofi

- Ricavano energia autonomamente a partire dalla luce solare o da reazioni di ossido-riduzione di composti abiotici

► Eterotrofi

- Usano molecole organiche ad alto contenuto di energia prodotte da forme di vita autotrofe

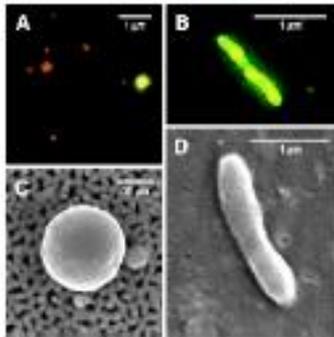
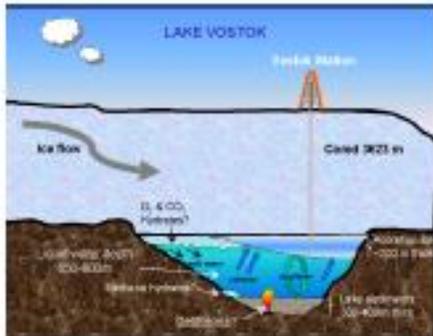


Organismi estremofili

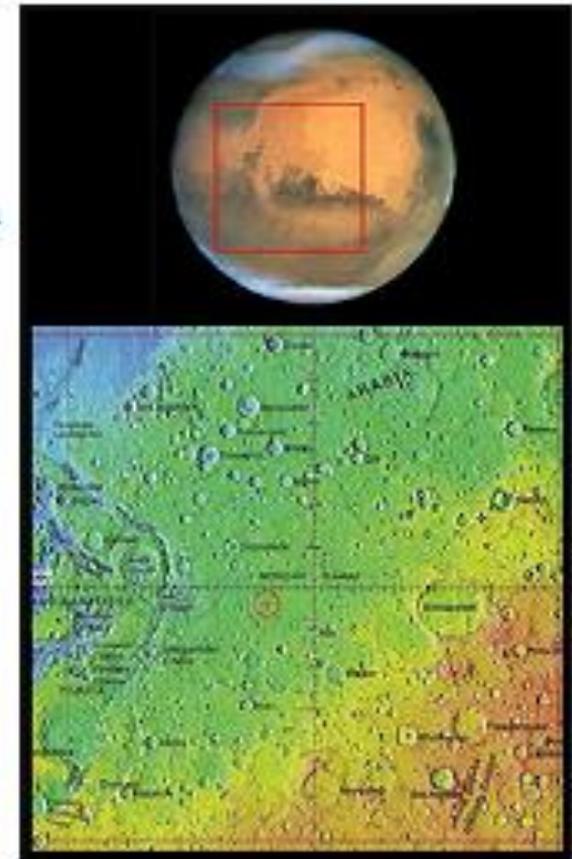
- ▶ Vengono classificati a secondo della loro capacità di adattamento a una particolare caratteristica fisica o chimica
 - ▶ microrganismi adattati a valori estremi di:
 - Temperatura
 - Termofili & ipertermofili
 - Psicrofili
 - pH
 - Acidofili, alcalofili
 - Pressione
 - Barofili
 - Salinità
 - Alofili
 - Umidità
 - Xerofili
 - Radiazioni ionizzanti
 - Radioresistenti



Estremofili ed Astrobiologia



Vita sotto i ghiacci
Psicrofili
Satelliti di Giove
e Saturno!



Antichi
laghi
salini
su Marte. Halofili

Estremofili multicellulari



Tardigradi

- Acari
- 0.5 mm
- Possono sospendere il loro metabolismo e riprenderlo
- Espellono l'acqua dalle cellule!

La Terra come esopianeta

- ▶ The pale blue dot
- ▶ Studio della vita su un pianeta che lo ospita
- ▶ Ma saremmo in grado di accorgerci che c'e', da Sirio?



- ▶ LIFE! Artechs!

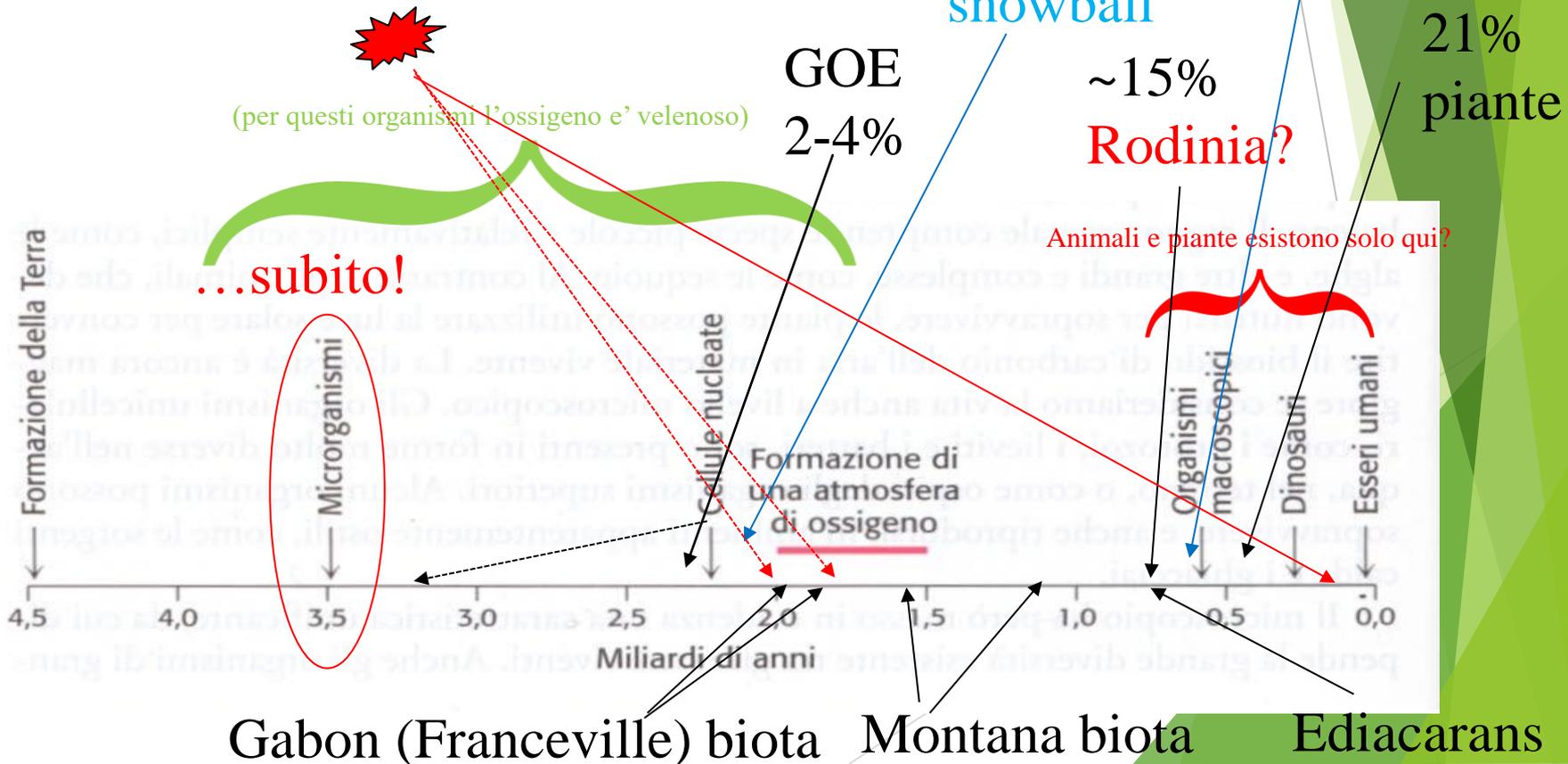
Evoluzione della vita sulla Terra

- Nei primi 3 miliardi di anni solo microrganismi? (ma: gabon, montana)
 - Tracce fossili dell'evoluzione necessariamente molto scarse
- Da circa 650 (??) milioni di anni anche organismi complessi
 - Abbondanza di reperti fossili da 540 milioni di anni

Caso? Necessita'? Quanto la Terra e' *tipica*?

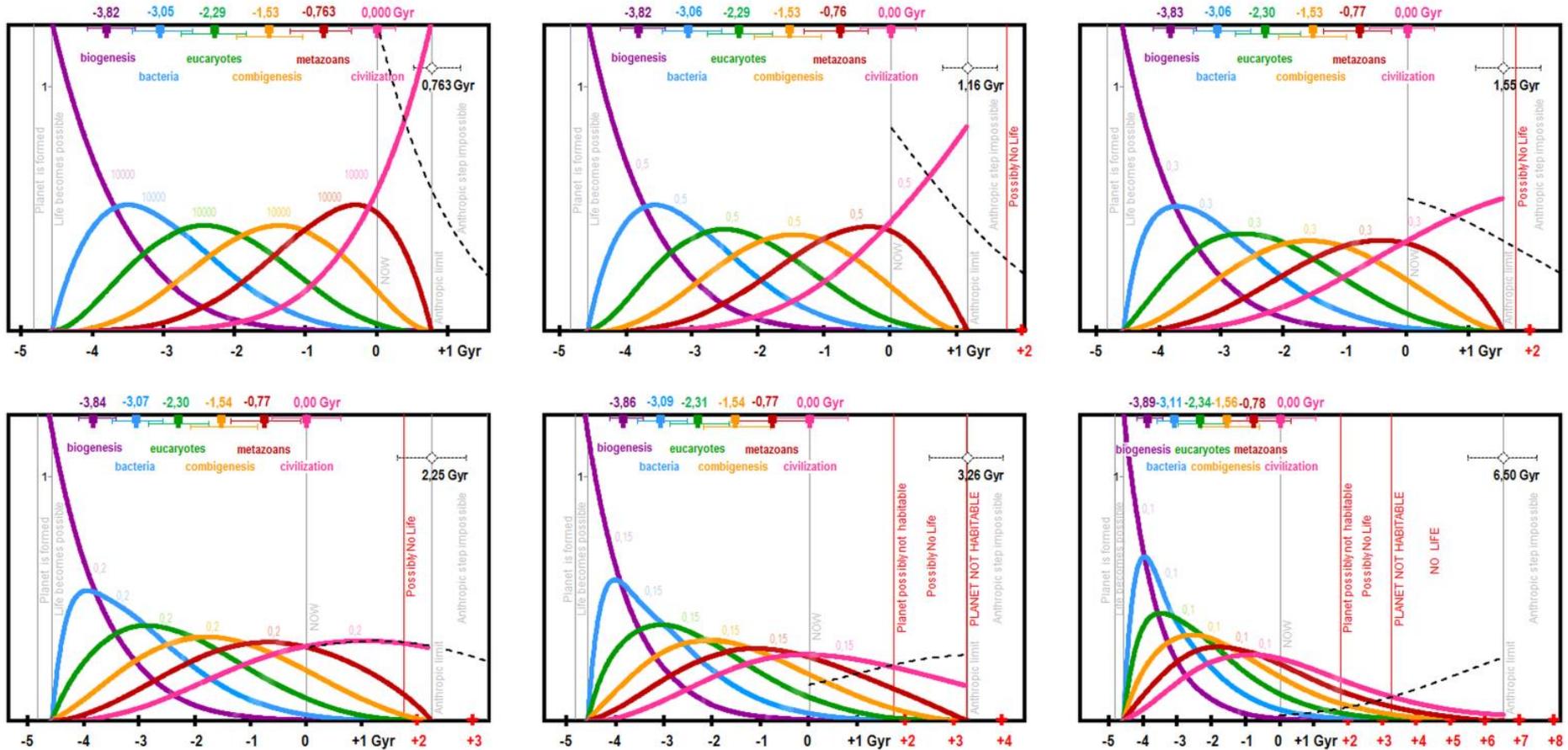
Huronian snowball

Sturtian & Marinoan snowballs

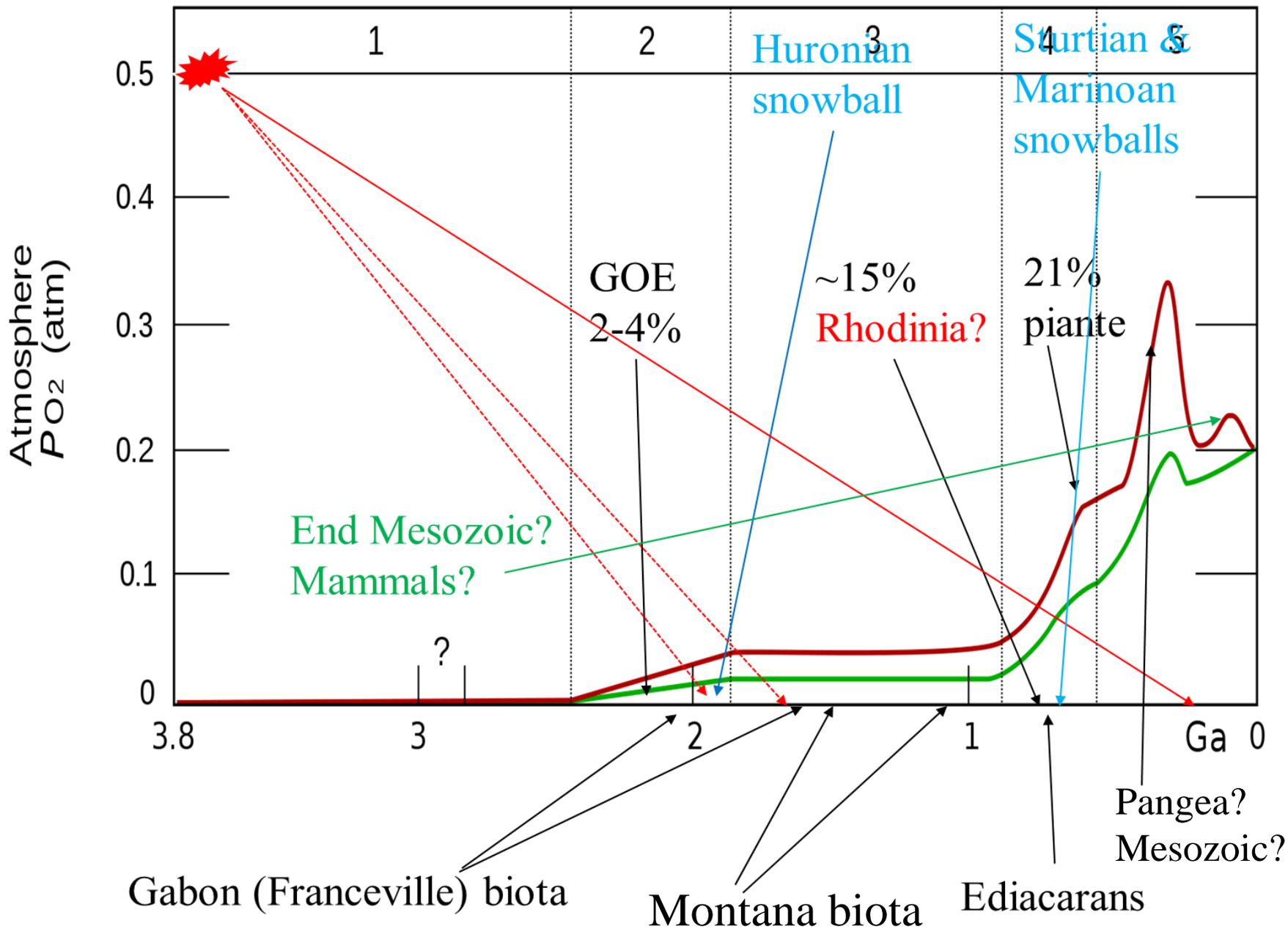


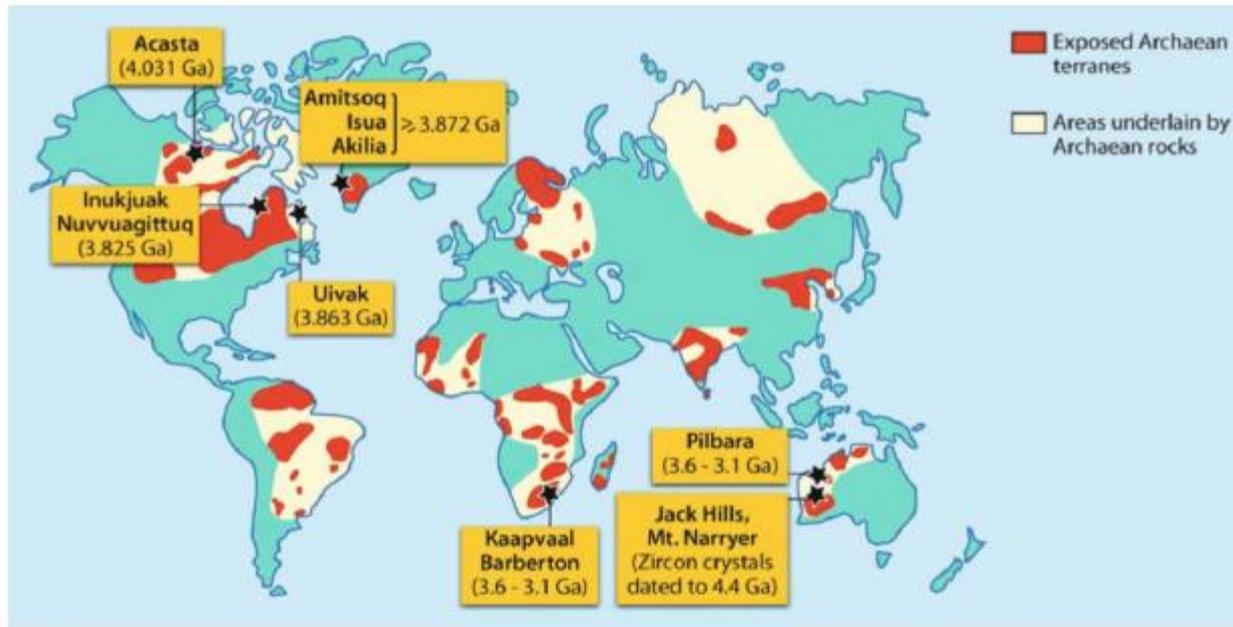
DIFFICILE vs. FACILE

Ferluga & Bisesi (2023, under submission)



Stages





Le rocce piu' antiche trovate sulla Terra

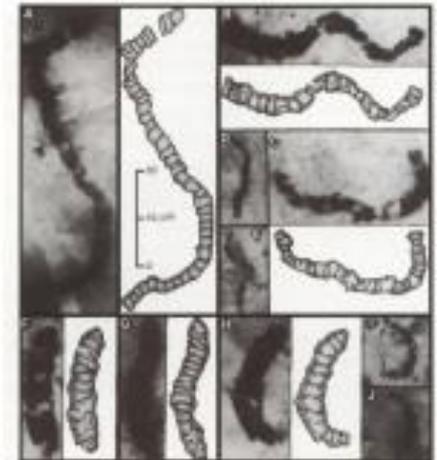
Cristallo di Zirconio datato 4.4 Ga

Lo Zirconio si forma in acqua e contiene Uranio



Oldest evidence for life on Earth

- The oldest, tentative, evidence are dated at about 3.8 Ga
 - Example: sedimentary rocks in the south-east of Greenland (Isua, Akilia)
 - Based on the isotopic ratio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$
- The oldest, more convincing, evidence are dated at about 3.2 - 3.5 Ga
 - Example: “Greenstone belts” in Australia (Pilbara) and South-Africa (Barbeton)
 - Isotopic ratios
 - Microfossils
 - Sedimentary layers suggesting the presence of diffuse life in shallow water, close to the litoral



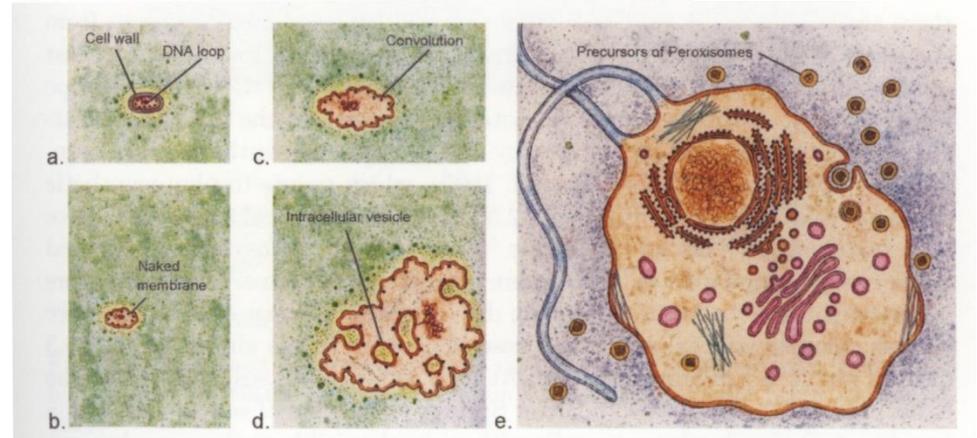
L'evoluzione della vita sulla Terra

I primi 3 miliardi di anni

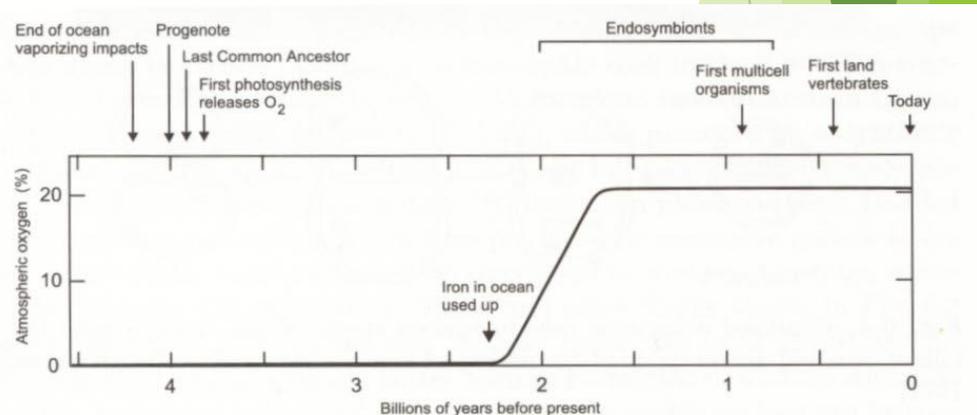
► Dai Procarioti agli Eucarioti

Circa 2,2 miliardi di anni fa

- Endosimbiosi
- Separazione del DNA nel nucleo
- Evoluzione dello scambio genetico
 - Meiosi (riproduzione sessuale)



Formazione di un'atmosfera di ossigeno di origine biologica (...il primo caso di inquinamento su scala planetaria...)



Dagli organismi multicellulari alle forme di vita più complesse

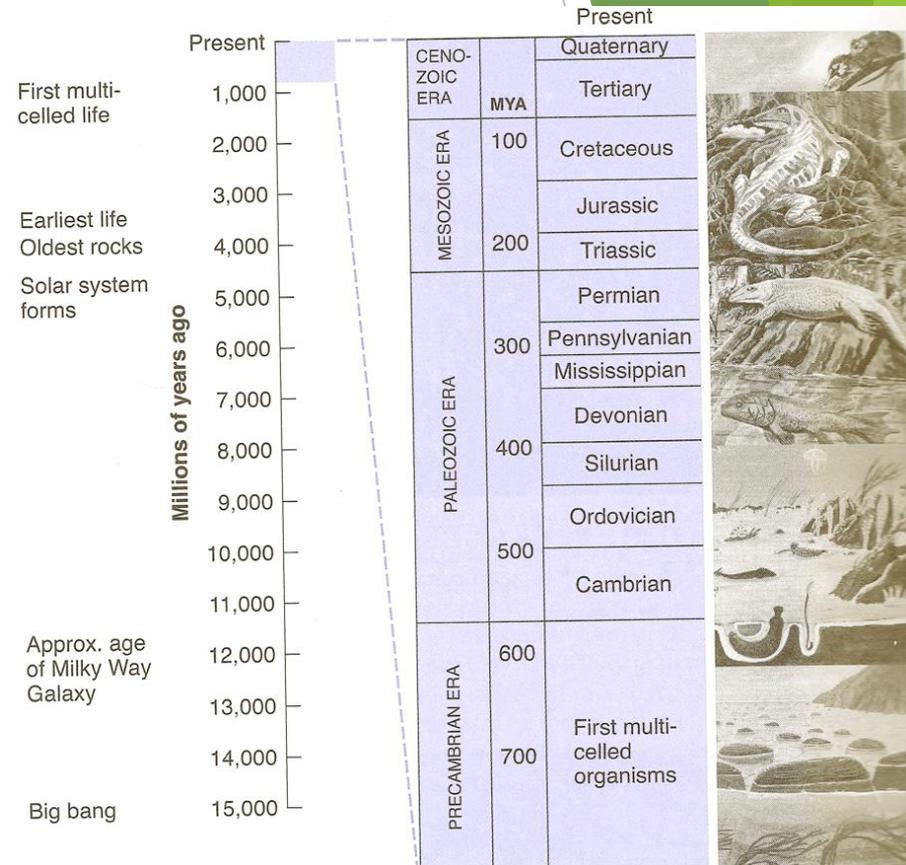
- ▶ Circa 700 milioni di anni fa compaiono i primi organismi pluricellulari

(ediacarani)



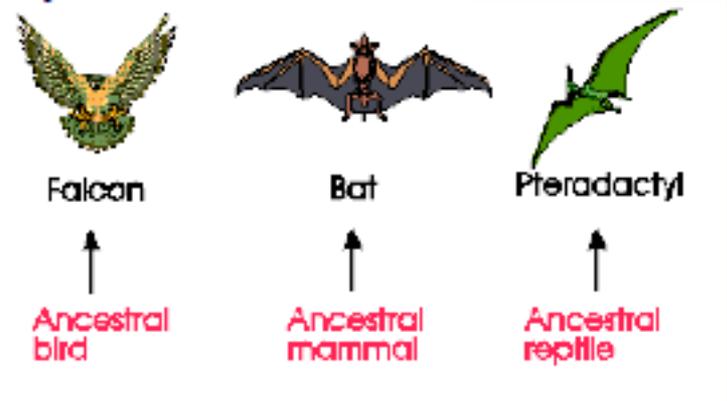
- ▶ La loro formazione na quindi richiesto all'incirca 3 miliardi di anni a partire dall'apparizione delle prime forme di vita

- ▶ Nel **periodo Cambriano** si sviluppano molto rapidamente **tutte le speci attuali**
- ▶ Gli organismi autocoscienti compaiono pochi milioni di anni fa (?)
 - ▶ Circa 3 miliardi e mezzo di anni dopo i primi organismi unicellulari



L'evoluzione Darwiniana

- ▶ Mutazione e selezione naturale
- ▶ Lateral Gene Transfer
- ▶ Genetic drift
- ▶ Pre-adattamento
- ▶ Convergenza evolutiva
- ▶ Caso, Necessita', Contingenza



Fatti fondamentali sull'evoluzione

▶ L'evoluzione non e' una teoria: e' un dato

▶ L'evoluzione e' osservata

- ▶ Le teorie riguardano la comprensione dei suoi meccanismi non il fatto che ci sia

▶ L'evoluzione agisce sugli individui

- ▶ Una specie non evolve. Lo fanno gli individui. Molti individui con le stesse mutazioni originano una nuova specie

▶ L'evoluzione non ha un fine, o un verso

▶ *Non siamo il fine ultimo dell'evoluzione*

- ▶ Non siamo in punto piu' «avanzato» dell'evoluzione

▶ *Non siamo il fine ultimo dell'evoluzione*

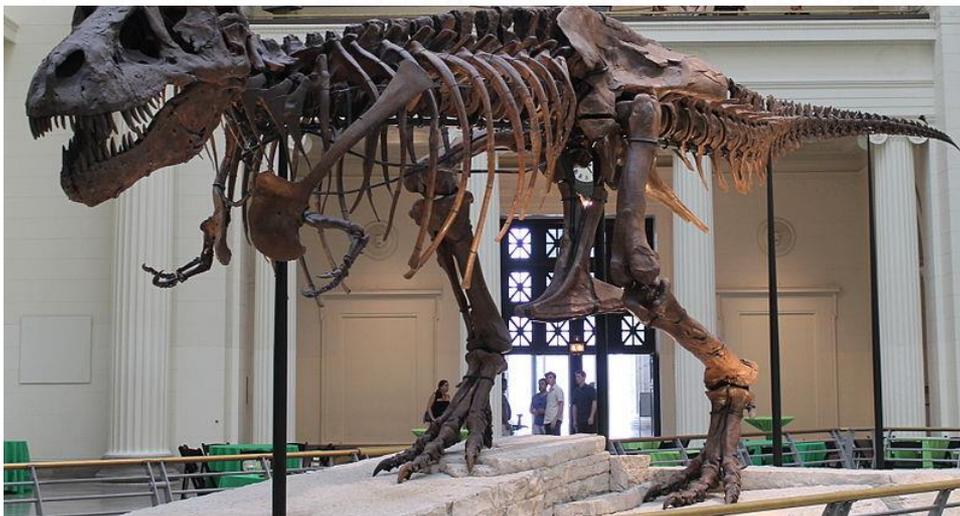
- ▶ Non necessariamente l'evoluzione va dal semplice al complesso

▶ *Non siamo il fine ultimo dell'evoluzione*

Estinzioni di massa

- ▶ Le maggiori intervallate di circa 100 - 200 milioni di anni
- ▶ ...Punctuated equilibria? (S.J.Gould)

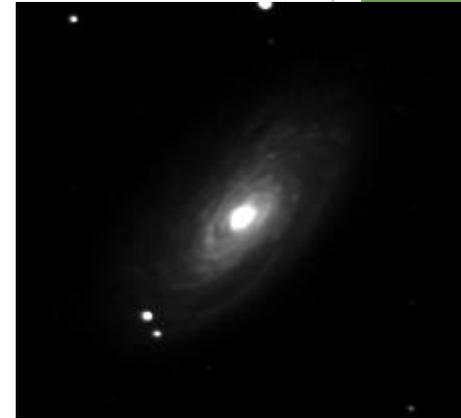
Nome estinzione	Età (Ma)	Specie estinte
Precambriano	~650	~70%
Tardo Precambriano (periodo Vendiano)	~610	incerta
Inizio del Cambriano (limite Botomiano-Toyoniano)	510-530	incerta
Tardo Cambriano	490-510	incerta
Tardo Ordoviciano (limite Ordoviciano-Siluriano: O-S)	~440	~85%
Tardo Devoniano (limite Frasniano-Frammeniano: 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 hanno influenzato l'evoluzione della vita sulla Terra

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 è chiaro se una supernova 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



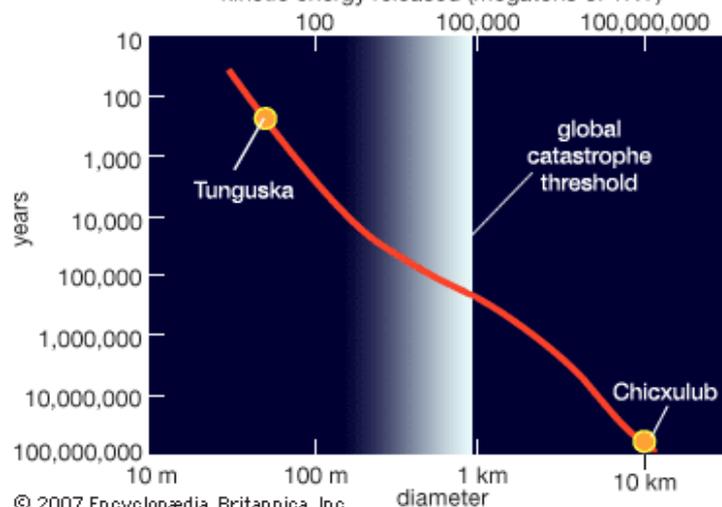
Collisioni con corpi minori del Sistema Solare

- ▶ Effetti biologici presumibili dell'impatto
 - ▶ 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 (liberazione di nicchie ecologiche)
 - ▶ Più frequenti nel passato del Sistema Solare

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

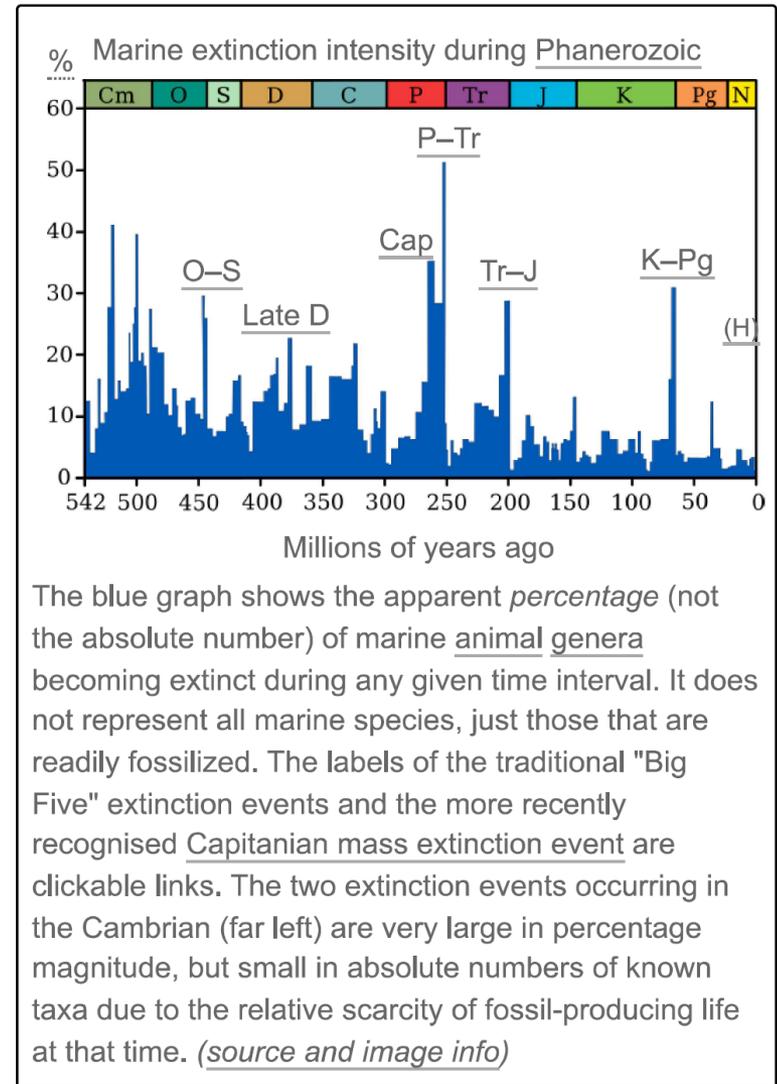
Nome cratere	Età (Ma)	Diametro (km)	Località
Chicxulub	64,98	100	Yucatan (Messico)
Manicouagan	214 ± 1	100	Quebec (Canada)
Morokweng	145 ± 3	100	Sud Africa
Popigai	35 ± 5	100	Russia
Chesapeake Bay	35,5 ± 0,6	95	Virginia (USA)
Puchezh-Katunki	220 ± 10	80	Russia
Siljan	368 ± 1,1	55	Svezia
Tookoonooka	128 ± 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)

Average interval between impacts of NEOs of different diameters
kinetic energy released (megatons of TNT)



Estinzioni di massa

- ▶ Ordoviciano-Silurano 454-444 Myr
84% delle specie
Global warming, anoxia? Ice age da consumo CO2?
- ▶ Tardo Devoniano, 372-359 Myr
Due eventi
70% delle specie
GRB? Supernova?
- ▶ Permiano-Triassico, 252 Myr
84% specie marine, 90-95% totale, insetti
Trappi siberiani. Oceanic overturn. Via libera ai dinosauri
- ▶ Triassico-Giurassico, 201 Myr
75% delle specie
Acidificazione. Bolide? Trappi?
- ▶ K/T, Cretaceo/Paleogene
75% delle specie
Estinzione dei dinosauri, via libera ai mammiferi
Asteroidi (10km)



Ad ogni estinzione segue
«rivoluzione» biologica

Snowball Earth

- ▶ Huroniana, 2,25 Gyr
- ▶ Toniana, 850 Myr
- ▶ Sturziana, 700 Myr
- ▶ Criogeniana? 675 Myr
- ▶ Marinoana, 650 Myr
- ▶ Gaskiers, 580 Myr - forse ice age, non snowball

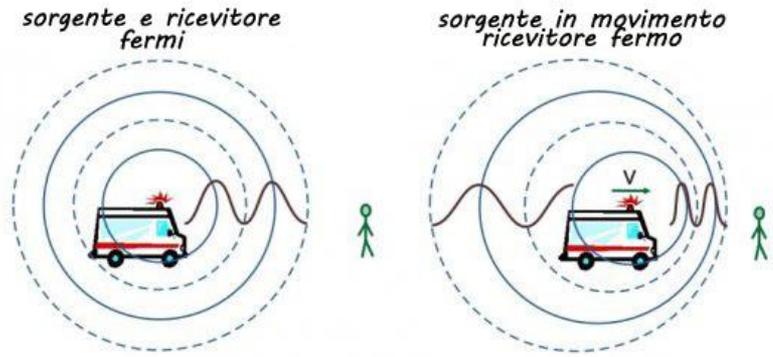
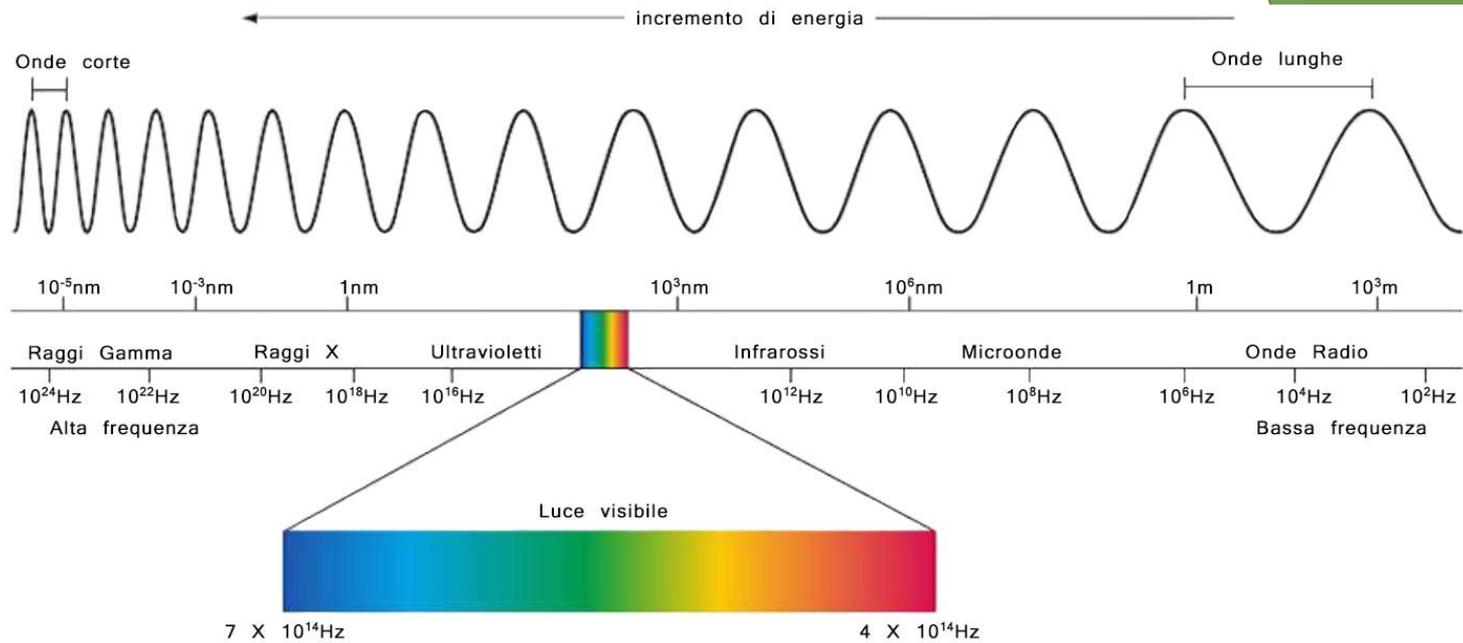
Distribuzione
tropicale/equatoriale dei
continenti

Feedback biologico?

Snowball Earth



© 2006 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

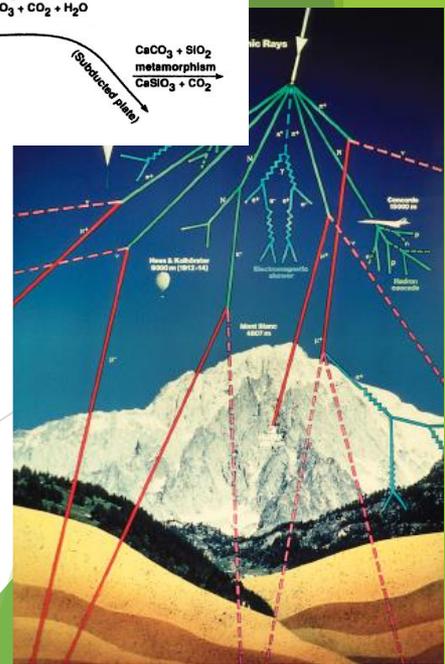
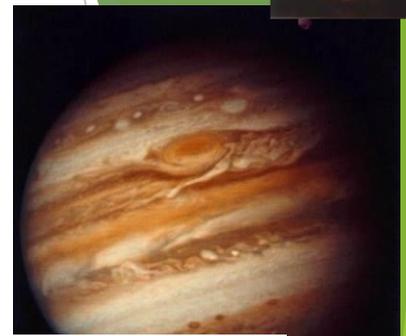
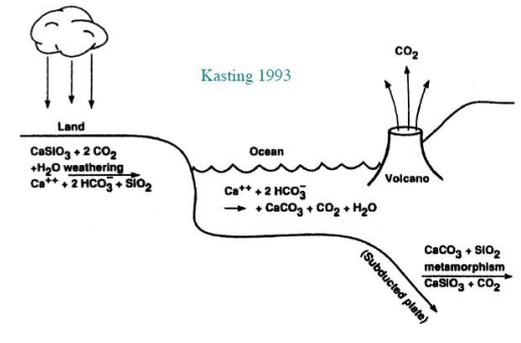


Osservazione dell'atmosfera; **biosignatures**

Ipotesi *Rare Earth*:

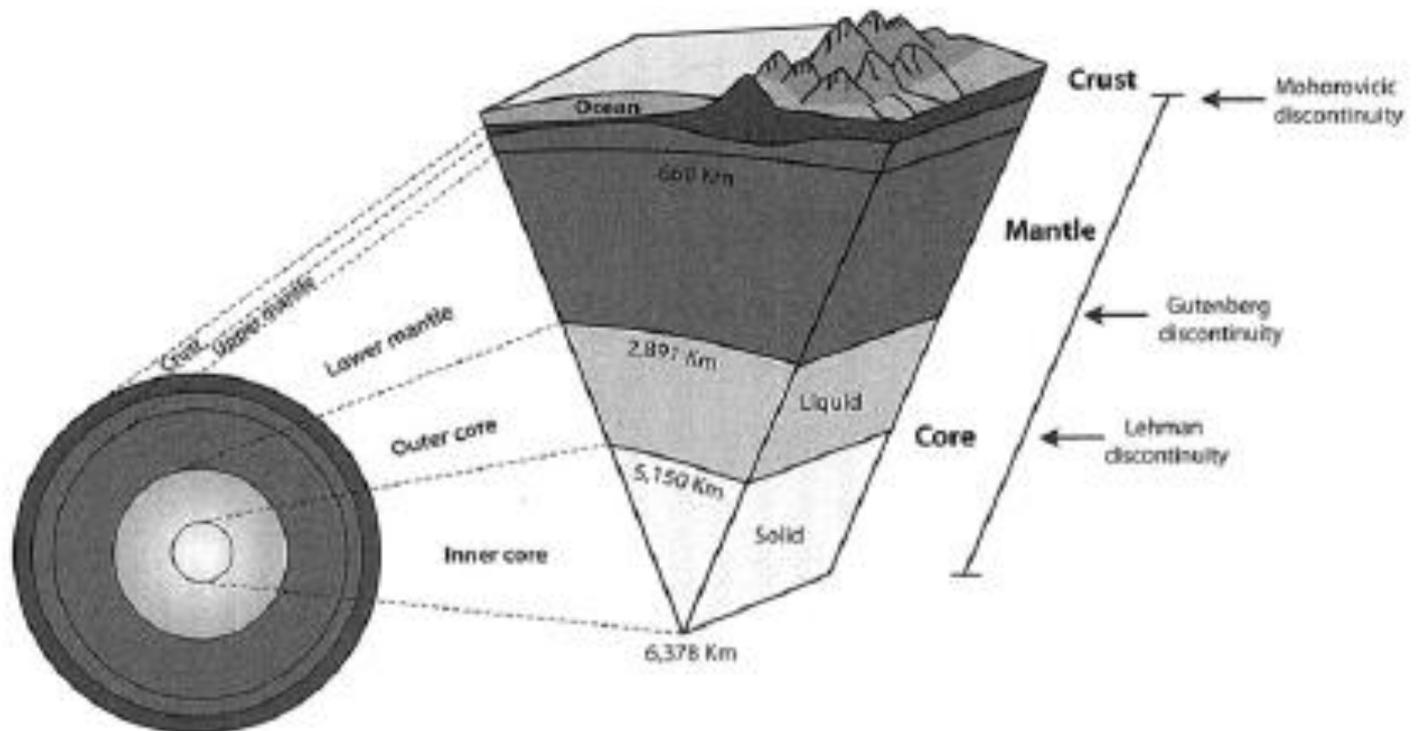
- ▶ La vita evoluta potrebbe essere *rara*...
- ▶ Ricerca di *caratteristiche astrofisiche peculiari* della Terra. ...ce ne sono? **SI!**

1. La Terra e' un pianeta *doppio*: stabilizzazione asse
2. La Terra ha tettonica a placche: stabilizzazione clima, campo magnetico
3. Oceani: non troppi ne troppo pochi
4. Giove schermo da impatti ma non perturba l'orbita
5. "wildcards": snowball earth, effetto serra globale, esplosione cambriana...



Internal structure of the Earth

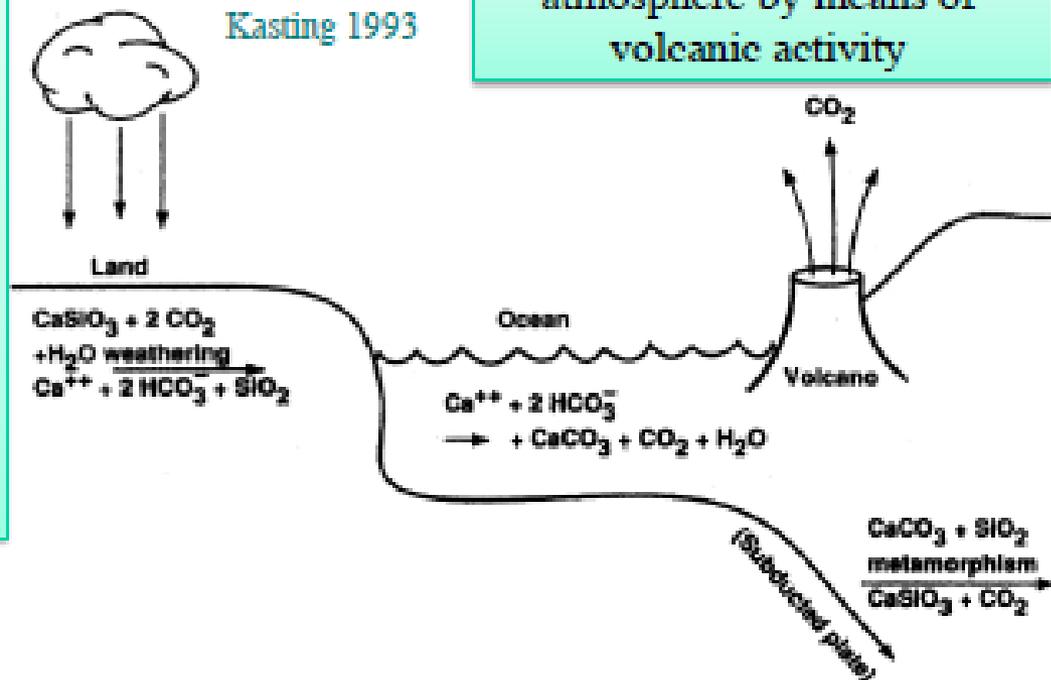
Reference for the other rocky planets



The CO₂ cycle of climate stabilization

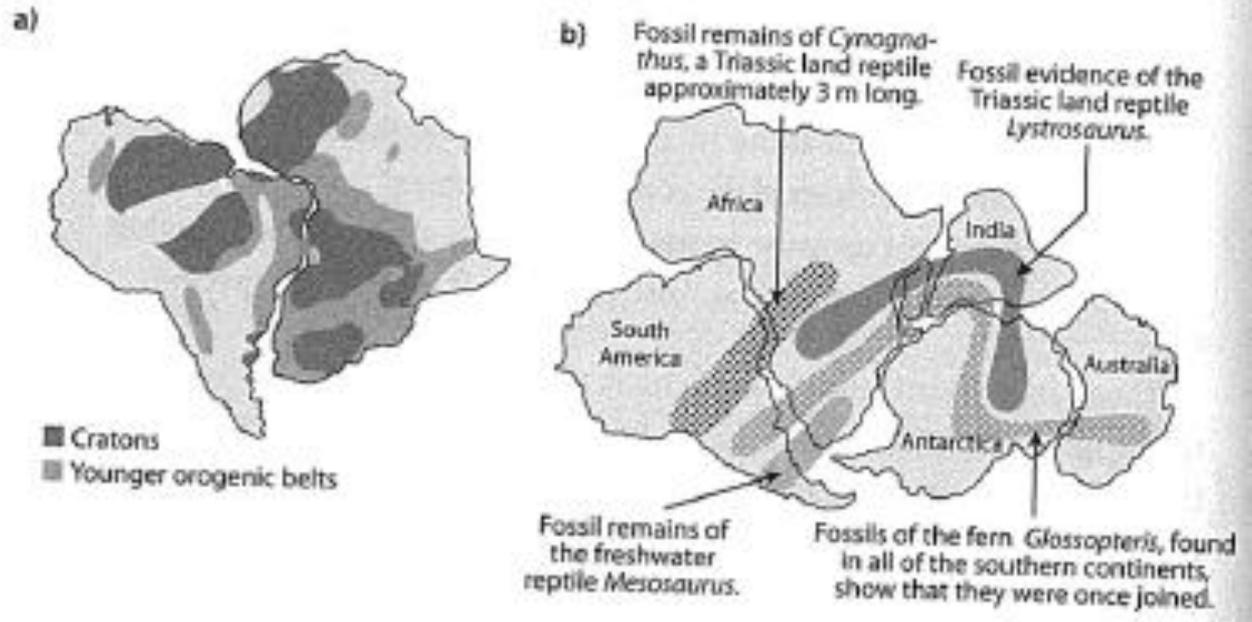
1. - Weathering processes remove CO₂ from the atmosphere

2. - The chemical products are gradually deposited to the bottom of the oceans and eventually subducted, due to tectonic activity



3. - CO₂ from the Earth's mantle is emitted to the atmosphere by means of volcanic activity

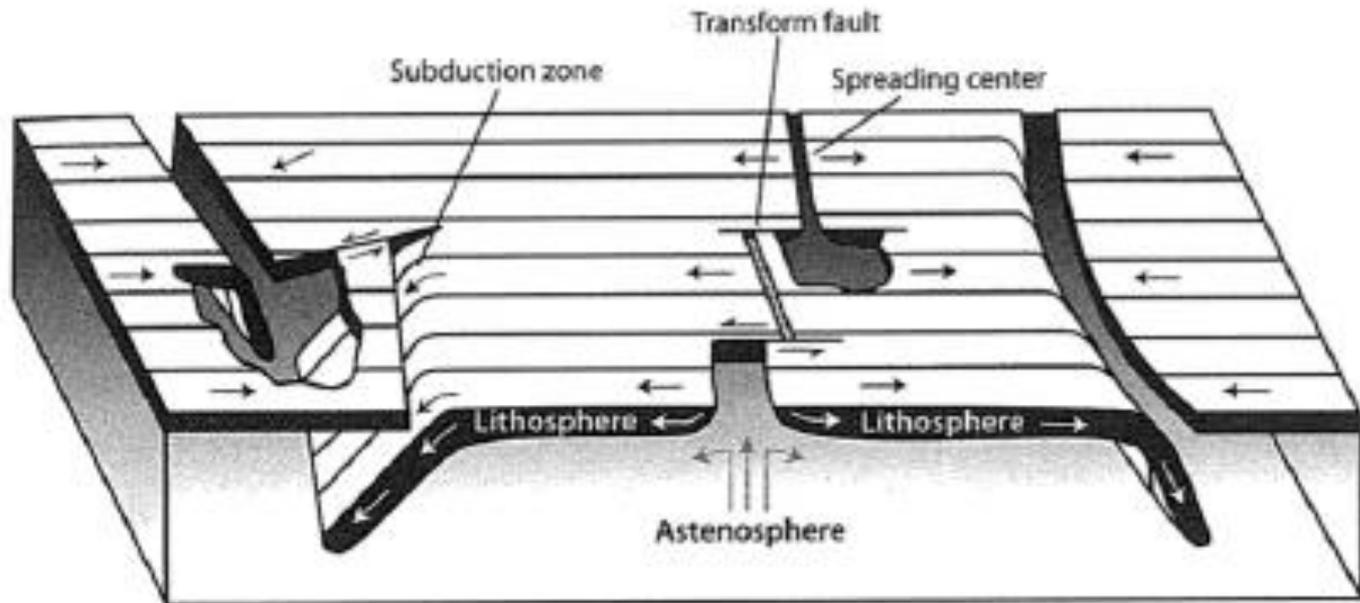
Plate tectonics: early evidence



a) fit of continents and correspondence of rock formation proposed by Wegener

b) correspondence of fossils across continents that are currently separated

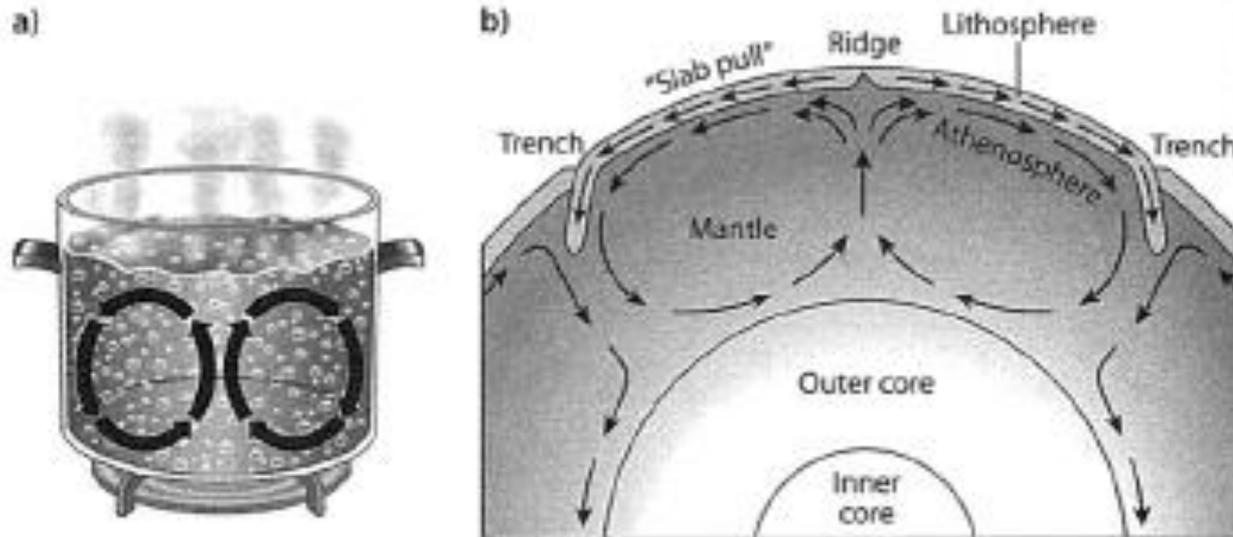
Basic concept of plate tectonics



The earth's surface consists of rigid plates, defined by a lithosphere that is sufficiently brittle that it cracks and makes earthquakes. The underlying asthenosphere flows and does not crack. The plates are created at spreading centers and consumed at trenches. They can also slide by one another at transform faults.

Adapted from Isacks, Oliver & Sykes (1968)

Convection cells



a) Simplest form of convection leads to circular convection cells

b) Schematic view of a hypothetical (and partially wrong) relationship between subducting plates being associated with the downwelling limb of a convection cell and ridges being caused by convecting upwelling

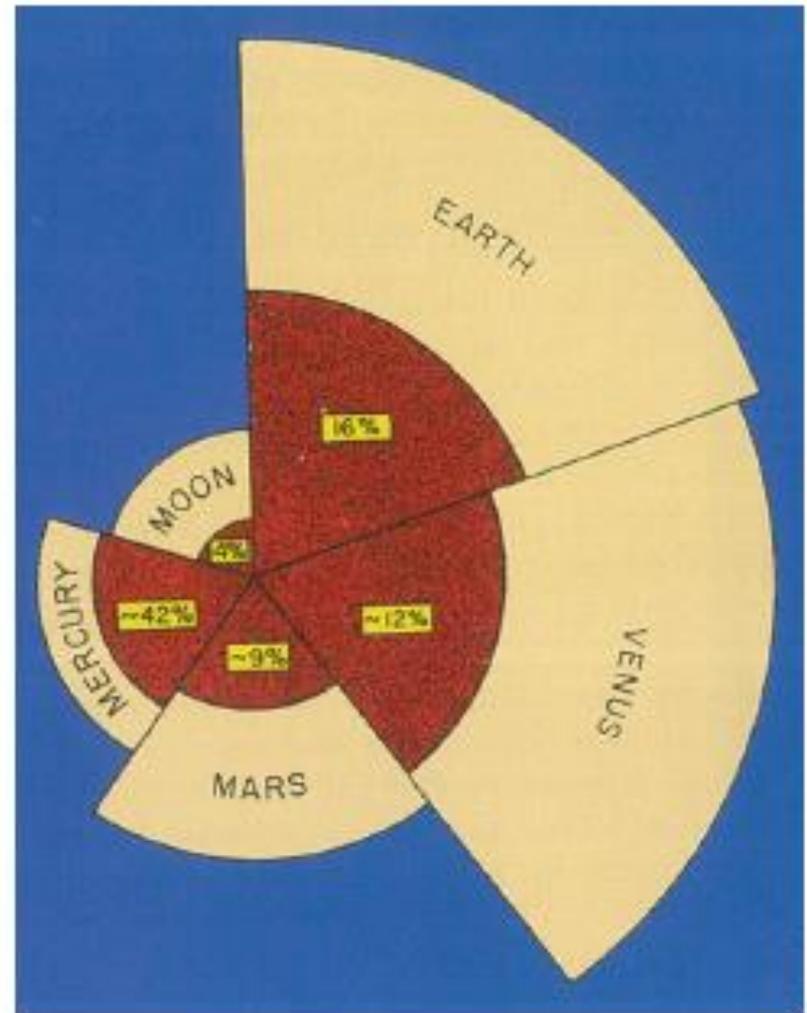
The actual situation is much more complicated

Comparison of terrestrial planet core radii

The sizes are in scale

The percent of the total planetary volume of the core is indicated (yellow boxes)

The size of the Moon's core is not known, but the maximum possible size is shown



CICLO DEL CARBONIO BREVE



🦋 **Lovelok & Margulis:** **gli organismi viventi svolgono un ruolo essenziale nella regolazione del clima sulla Terra (*ipotesi di Gaia*)**. La frazione di CO_2 che non prende parte al ciclo dei carbonati-silicati viene sottratta all'atmosfera dalle piante attraverso la **fotosintesi**.

Giorno: fotosintesi: consumo CO_2 , produzione O_2

Notte: Respirazione: il contrario

Risultato netto: O_2 , CO_2 **costanti**

In atmosfera

Sequestro del carbonio: più piante (o animali, o vegetazione morta), più carbonio tolto dall'atmosfera!



CICLI DELL'OSSIGENO E DEL CARBONIO

Guadagni

Fotosintesi (terra)	16500
Fotosintesi (oceani)	13500
Fotolisi del N_2O	1,3
Fotolisi dell' H_2O	0,03
Guadagni totali	~ 30000

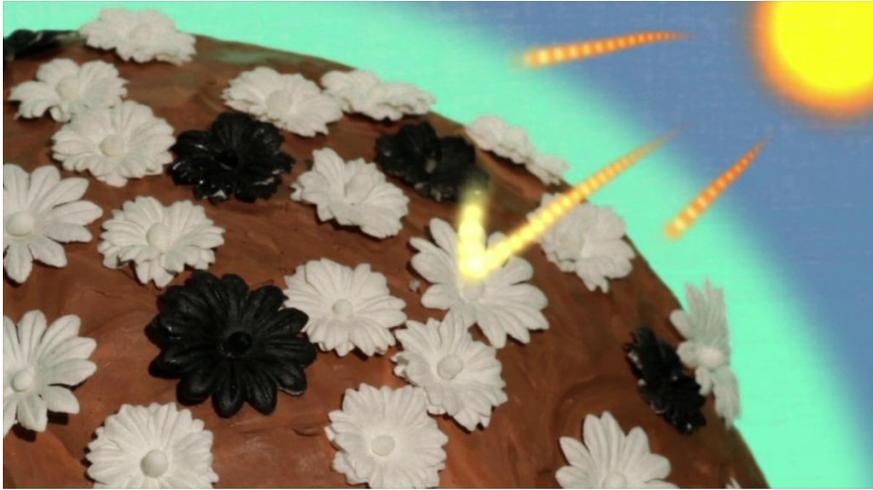
Perdite - respirazione e decomposizione

Respirazione <u>aerobica</u>	23000
Ossidazione microbica	5100
Combustione di combustibile fossile	1200
(antropogenico)	600
Ossidazione fotochimica	12
Fissazione dell' N_2 dalla luce	10
Fissazione dell' N_2 dall'industria (antropogenica)	5
Ossidazione di gas vulcanici	

Perdite - Clima

Reazioni chimiche climatiche	50
Reazione superficiale dell' O_3	12
Perdite totali	~ 30000

IPOTESI DI GAIA



Daysyworld: margherite bianche
stan bene al caldo, margherite
nere al freddo

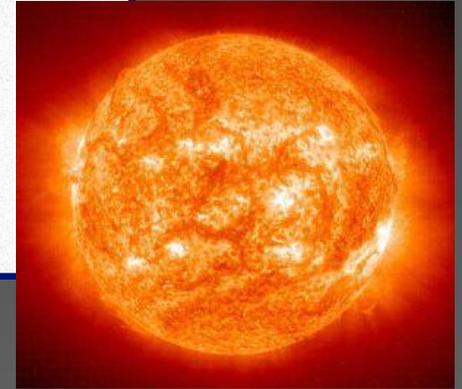
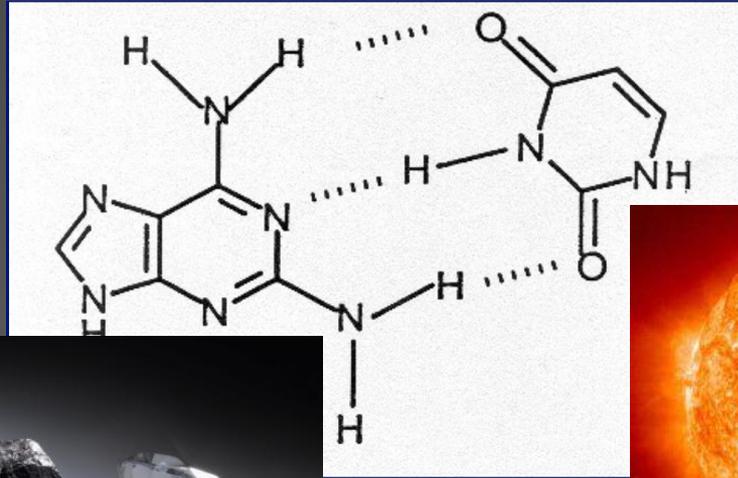
Feedback negativo!

MA:

- ❖ Kasting & al.: se gli organismi viventi non esistessero, altri effetti contribuirebbero a bilanciare le concentrazioni di carbonati e silicati. Pertanto, **ci sono buone ragioni per credere che la Terra sarebbe rimasta abitabile anche se non fosse mai stata abitata.**

Quindi alla nostra vita servono almeno :

- Precursori
- Energia
- Carbonio



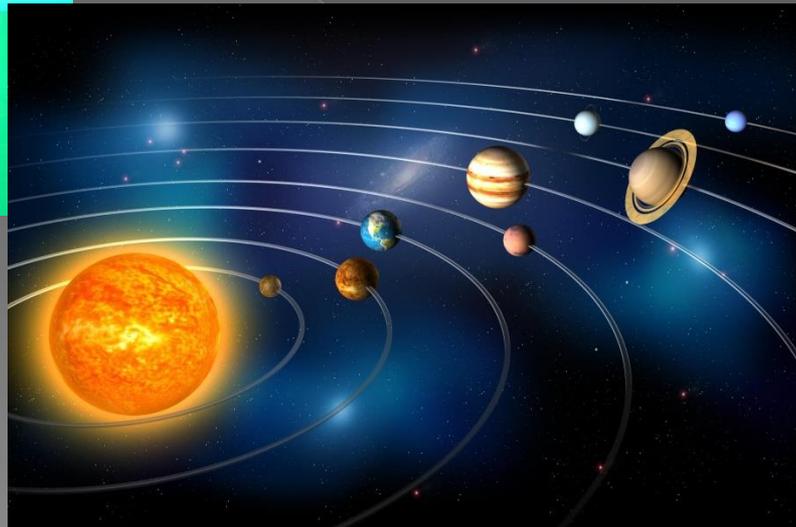
- **Acqua liquida**



Qui da noi, li abbiamo.
Ci sono da qualche altra parte nel Cosmo?

Capitolo due

Alla ricerca della vita nel sistema solare



Venus

Probes have taken a few optical images of the surface in situ, but they do not survive to the harsh temperature conditions

The surface has been mapped with radar techniques (e.g. Magellan probe)

The surface is a dry desertscape interspersed with slab-like rocks and periodically resurfaced by volcanism

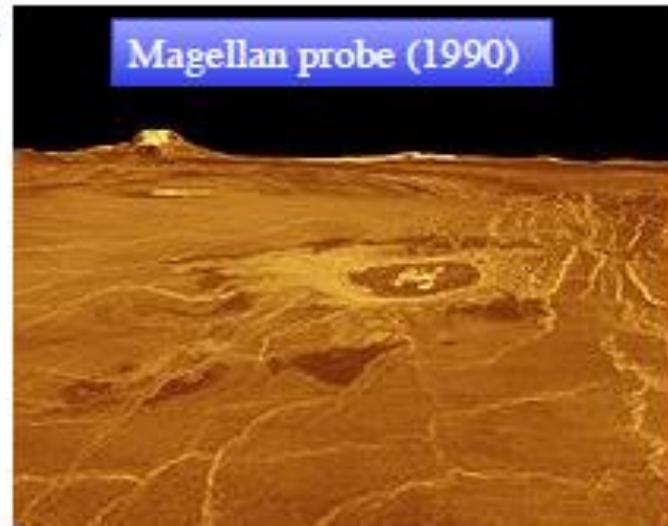
No signature of tectonic movements

Impact craters are present, but only with relatively large sizes because the thick atmosphere brakes/evaporates the smallest meteorites

Venera 9 (1975)



Magellan probe (1990)

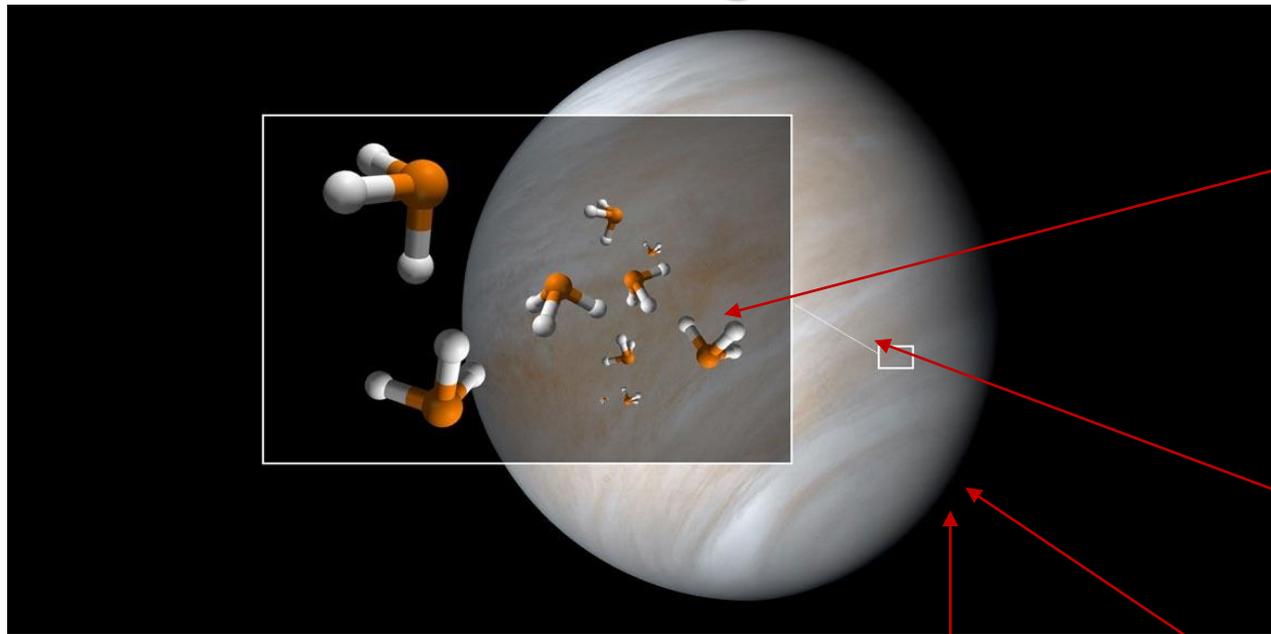


...ed ecco un esempio di teorie messe in difficoltà dalle osservazioni.

(**ma**: alternative già proposte prime delle medesime!)

Breaking news!

Come ci si puo' sbagliare sulle biosignatures



Biosignatures

Ambiente
estremo

**La fosfina nell'atmosfera
di Venere**

PH_3

Abitabilita'
non superficiale

Ciclo vitale raro

Venus

Surface conditions

$$T_s = 735 \text{ K}$$

$$p_s = 92 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Atmospheric composition dominated by CO_2 , without O_2

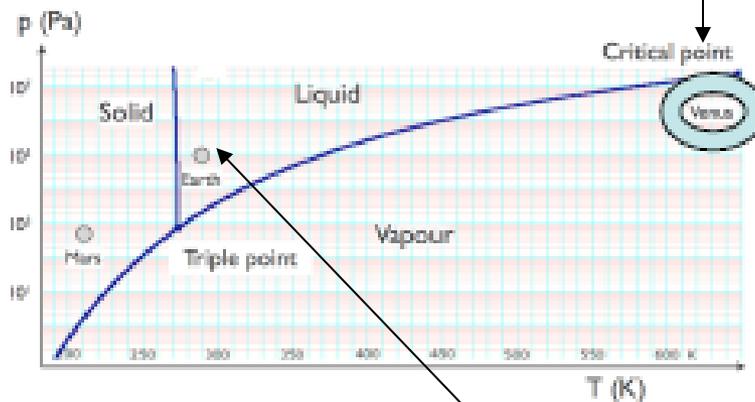
Absence of tectonics

Surface conditions do not satisfy the liquid water criterion: currently non habitable

Venus has probably undergone a "runaway greenhouse effect" in the early stages of its history

Superficie

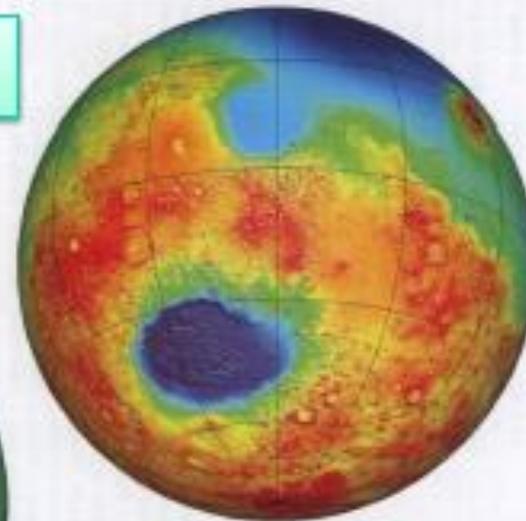
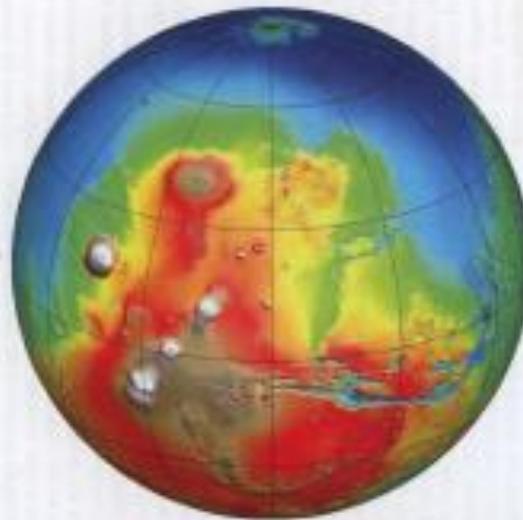
Nubi acide



Tra 40 e 60 km di altezza: acqua liquida (in droplets)

Proposta: ciclo batteri/spore basato sulla circolazione atmosferica

Mars surface morphology

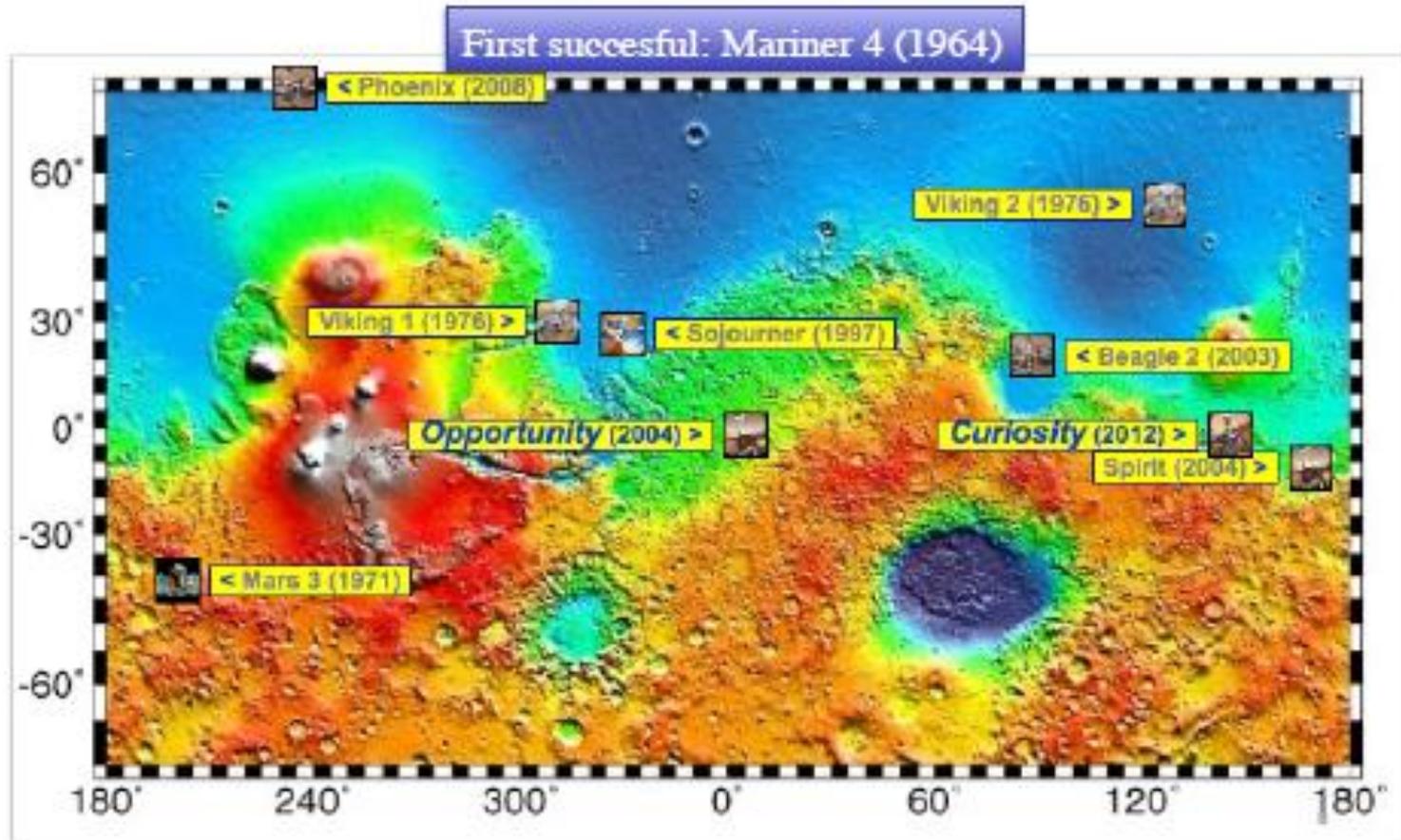


Mars Global Surveyor

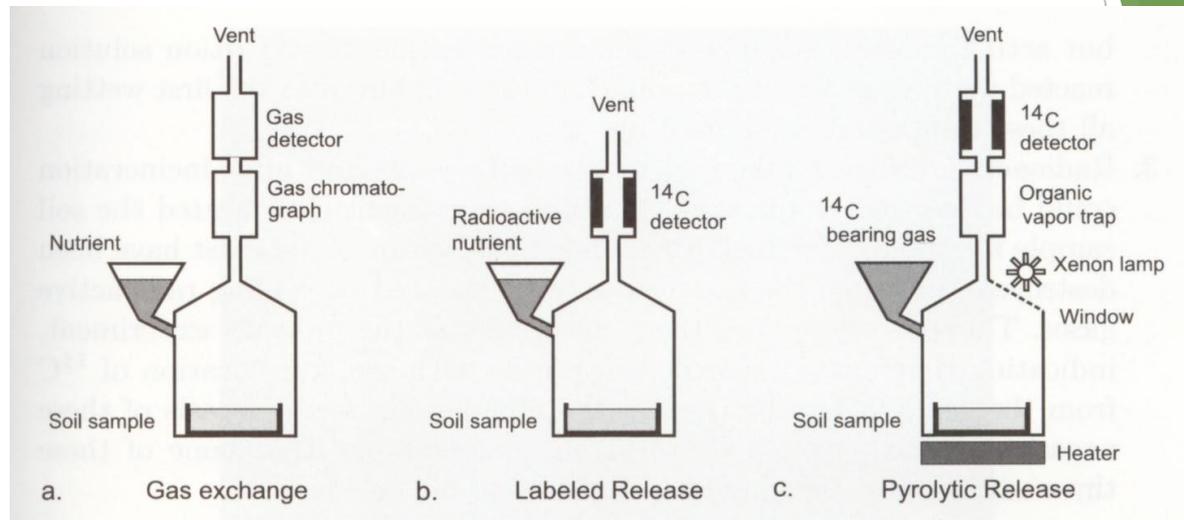
The surface is shaped by a variety of processes, featuring regions rich of impact craters (right image), regions with large volcanos (left image), and flat basaltic zones (top of both images)

Missions to Mars

Orbiters, landers, and rovers are providing a large amount of experimental data of astrobiological relevance



Missioni spaziali su Marte



- ▶ Esperimenti Viking (1976) non hanno trovato tracce di attività biologica da analisi di campioni prelevati in diversi siti (ma: discussioni: attività chimica può emulare biologia)
- ▶ Negli ultimi anni si stanno accumulando prove indirette sull'esistenza di acqua sotto la superficie
 - ▶ Mars Global Surveyor, NASA
- ▶ Tali evidenze stanno diventando abbastanza convincenti
 - ▶ Mars Express, ESA

Viking experiment

Table 3.3 Results of testing terrestrial life with the Viking biology experiments.

	Response for sample	Response for heat-sterilized control
GEX	oxygen or CO ₂ emitted	none
LR	labelled gas emitted	none
PR	carbon detected	none

If life were completely absent from Mars, as the GCMS results suggested, the expected results of the Viking biology experiments would have been as in Table 3.4.

Table 3.4 Results of testing with the Viking biology experiments if life were completely absent from Mars.

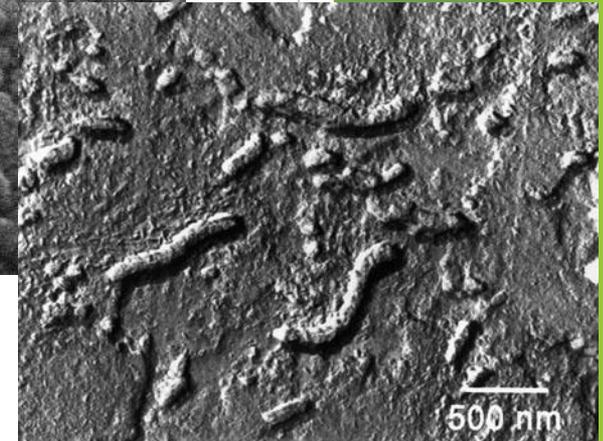
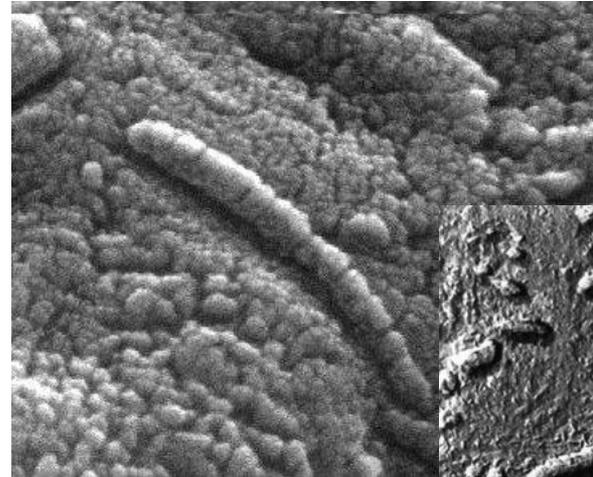
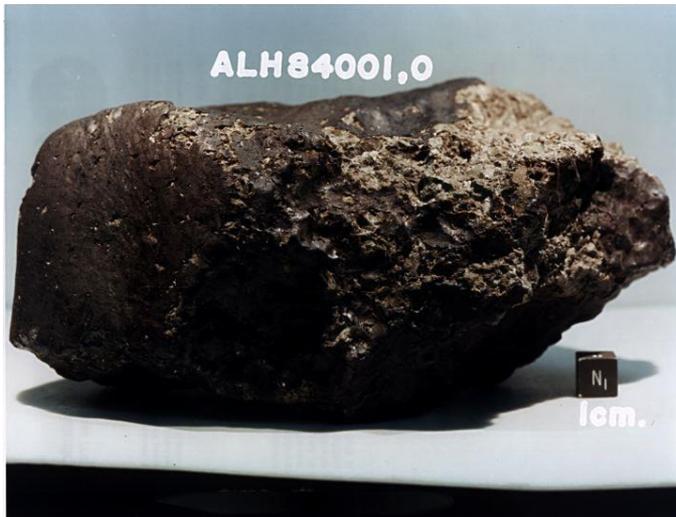
	Response for sample	Response for heat-sterilized control
GEX	none	none
LR	none	none
PR	none	none

The actual results from Mars, in a highly simplified form, are given in Table 3.5.

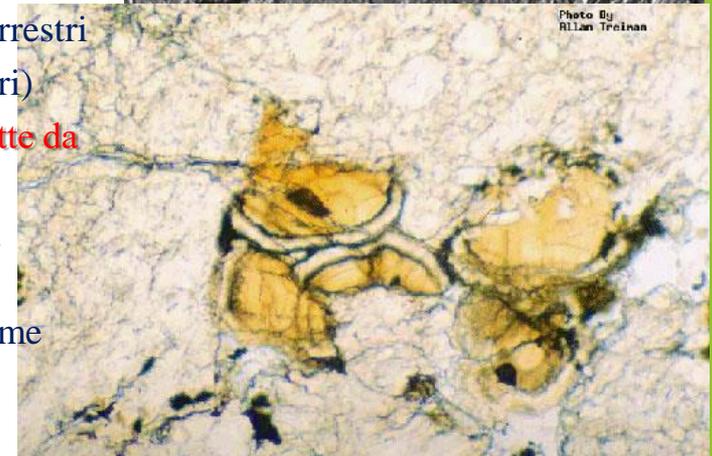
Table 3.5 Actual results of tests on Mars with the Viking biology experiments.

	Response for sample	Response for heat-sterilized control
GEX	oxygen emitted	oxygen emitted
LR	labelled gas emitted	none
PR	carbon detected	carbon detected

Il meteorite ALH84001



- Trovato in Antartide nel 1984
- Antico di circa 4,5 miliardi di anni
- Proveniente da Marte
- 7 Agosto 1996, David McKay, evidenze di vita microscopica:
 1. Globuli di carbonati simili a quelli prodotti da batteri terrestri
 2. Sembrano cellule (ma 10 volte piu' piccole delle terrestri)
 3. **All'interno particelle di magnetite simili a quelle prodotte da batteri terrestri**
 4. Carbonati, ossidi di ferro e solfati di ferro non sono mai presenti insieme in condizioni di equilibrio
 5. Composti organici presenti nel meteorite interpretati come biogenici

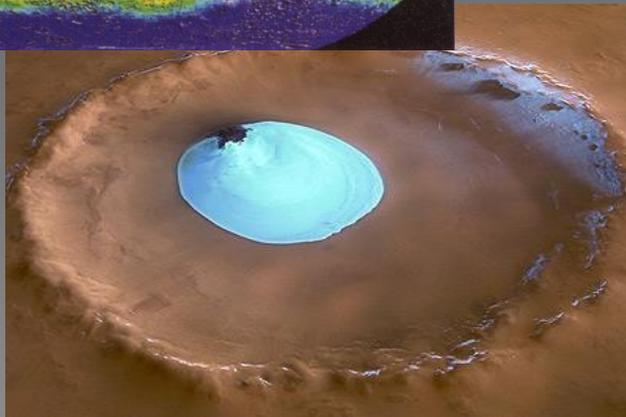
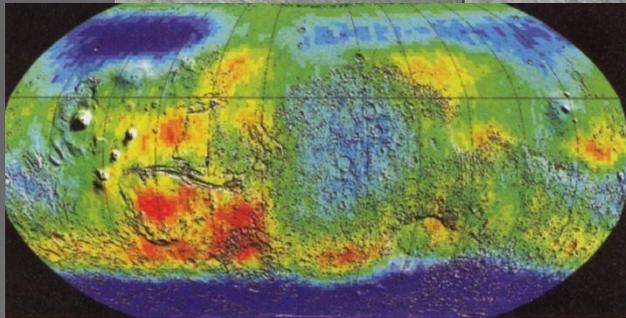
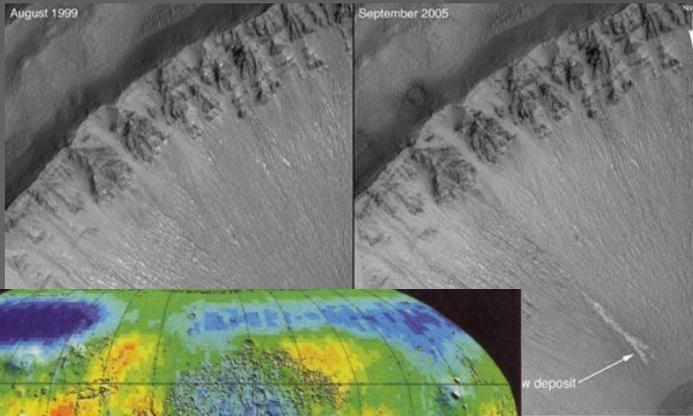
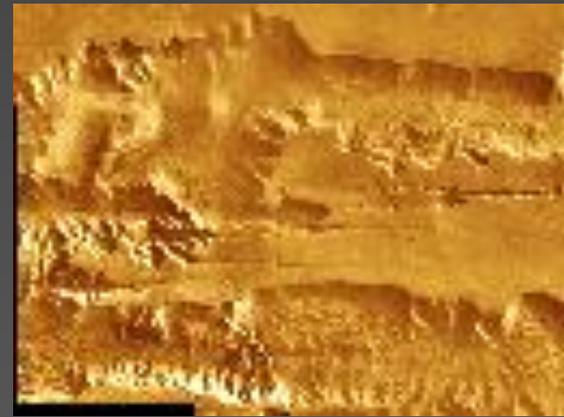


Solo la 3. e' ancora controversa



Marte

Prove indirette di esistenza di acqua

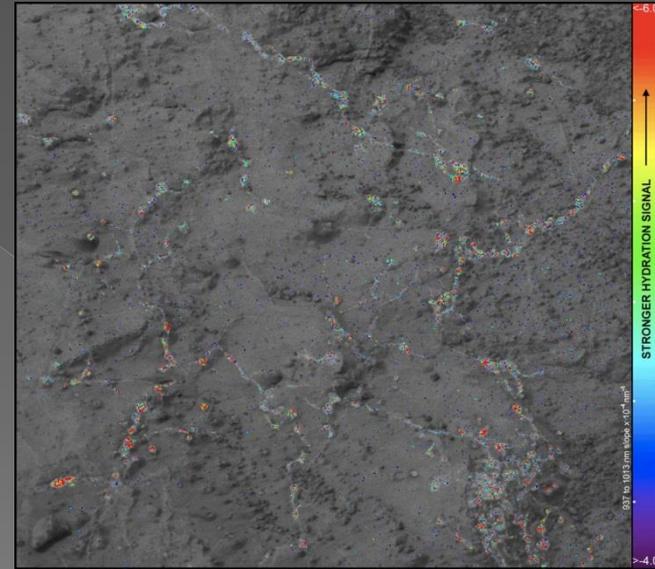
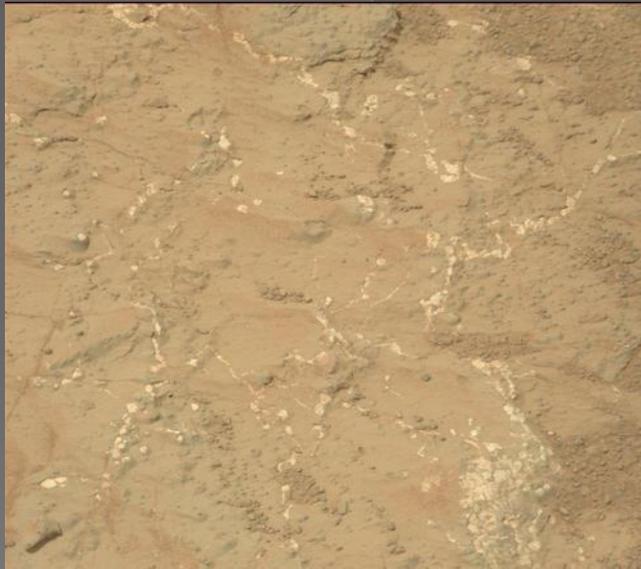


- Distribuzione dell'idrogeno nel suolo
 - > Dati raccolti da Mars Odyssey
 - Zone blu: massima concentrazione
 - Probabilmente ghiaccio in uno strato di un metro di profondità
 - Molto probabile che il pianeta avesse un oceano.. 3,5 miliardi di anni fa

Ora e' secco e quasi senza atmosfera.



Segnale di idratazione



25 cm

“The sedimentary rocks at Yellowknife Bay likely formed when original basaltic rocks were broken into fragments, transported, re-deposited as sedimentary particles, and mineralogically altered by exposure to water.” (M. Schmidt, Curiosity Science team member)

Search for water in Mars

Evidence of water in present-day Mars

The bulk of the polar caps is constituted by CO_2 ice, but the North polar cap must also contain H_2O

this would explain why such polar cap is able to persist, to some extent, during the Mars summer, when CO_2 sublimates into the atmosphere



Planetary protection

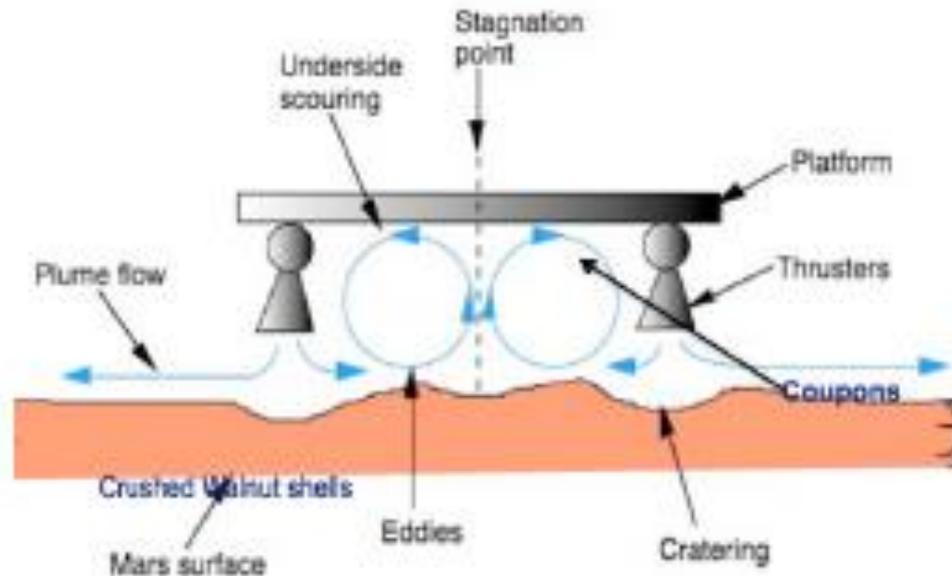
Planetary protection is a guiding principle in the design of an interplanetary mission, aiming to prevent biological contamination of both the target celestial body and the Earth

Reflects both the unknown nature of the space environment and the desire to preserve the pristine nature of celestial bodies until they can be studied in detail



A Viking lander being prepared for dry heat sterilization

Mars contamination



Different planetary protection cleanliness levels for different parts of a spacecraft do not necessarily prevent soil contamination because these cleaning strategies evolved without consideration of the effects of the descent engine plumes.

Astrobiological relevance of giant planets

Jupiter

Sagan & Salpeter (1976) investigated the potential habitability of Jupiter's atmospheric layers

Some of the external atmospheric layers have pressure and temperature in the intervals

$10^5 \text{ Pa} < p < 10^7 \text{ Pa}$ and $300 < T < 500 \text{ K}$

In principle, these ranges of pressure and temperature allow water to be present in liquid phase in such atmospheric layers

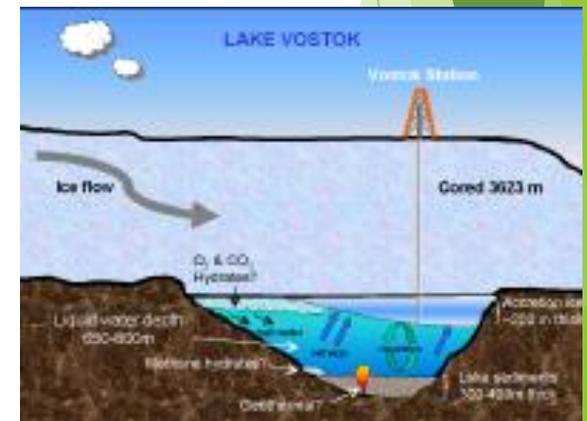
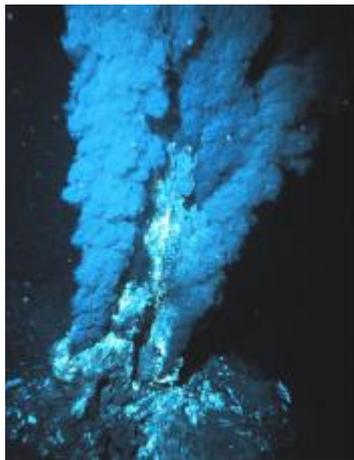
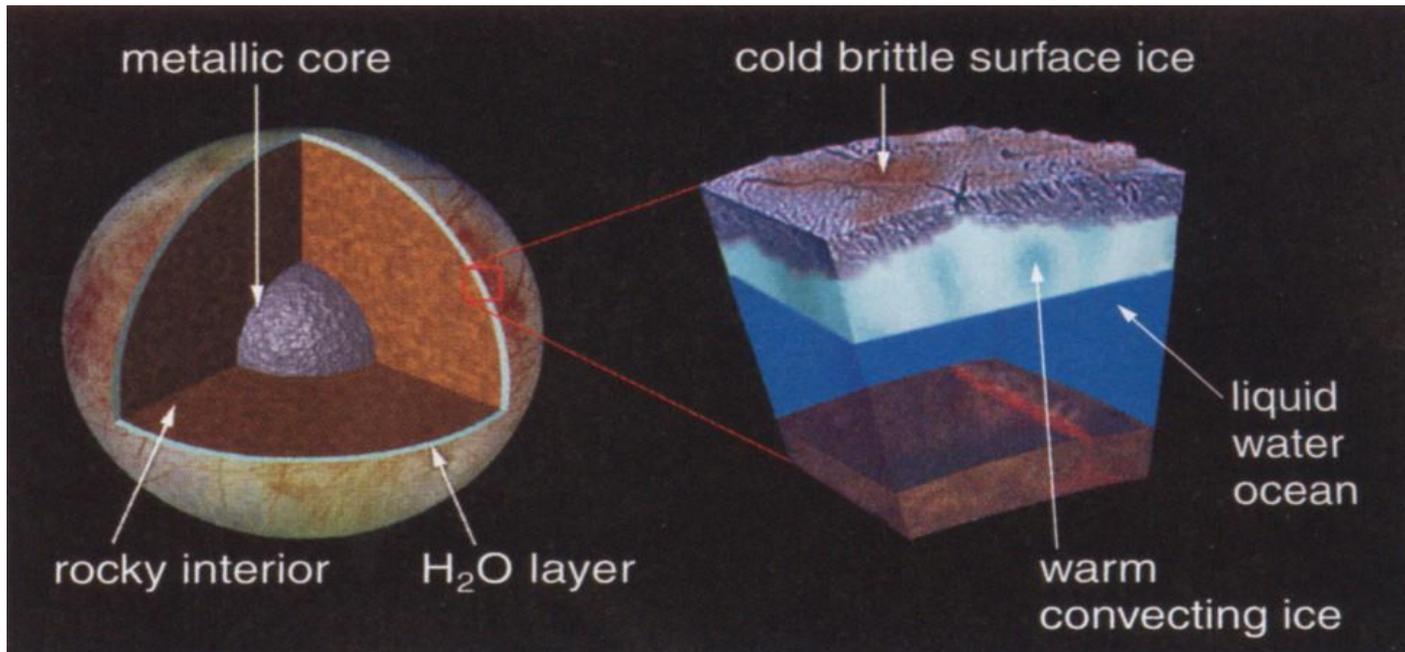
Hypothetical forms of life should stay suspended in those layers and resist to harsh conditions

It is very unlikely that any type of material may stay suspended in the "habitable" layers given the presence of strong winds and convection

Giant planets are not considered to be habitable

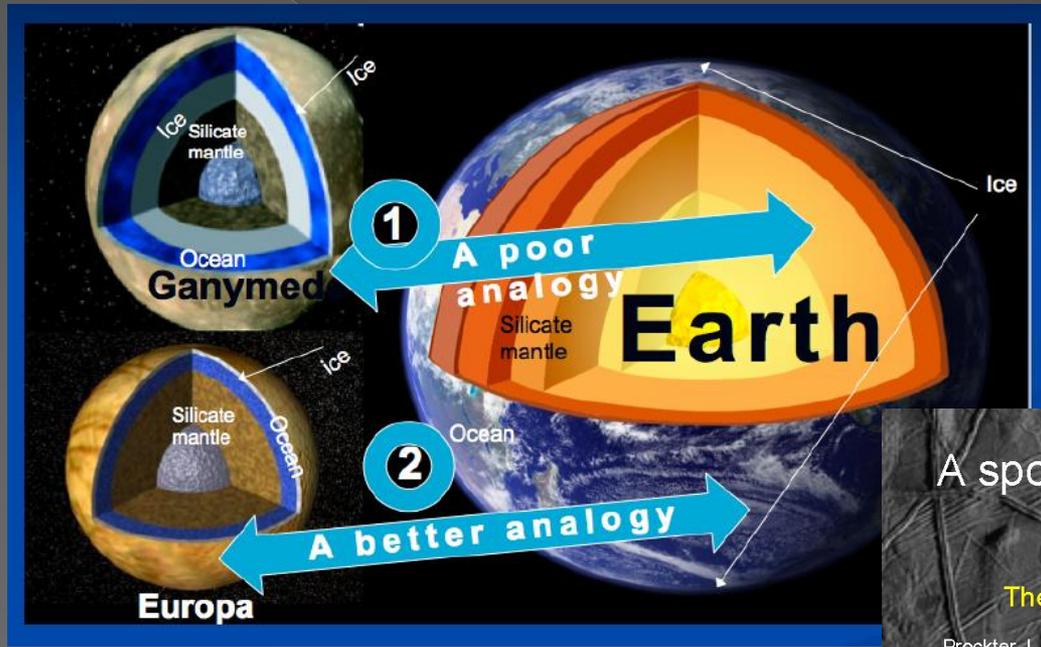


Europa



(Fosse oceaniche:Galapagos 1977)

Il posto piu' promettente?

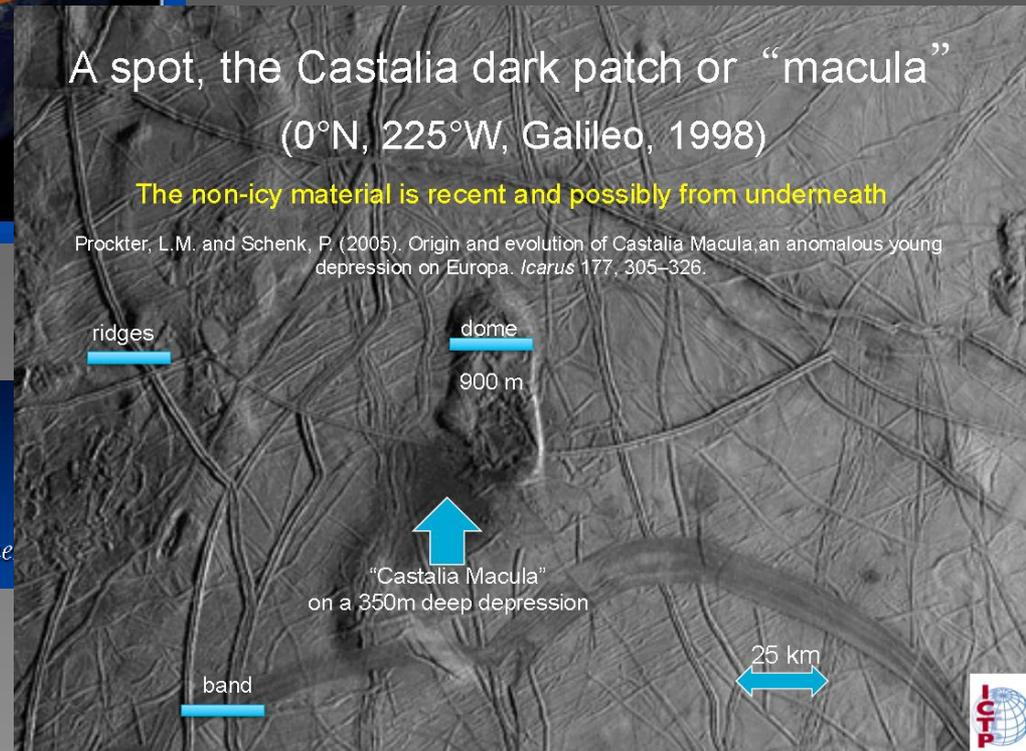


Le parole chiave:
“Frazionamento”
“Biosignatures”

A spot, the Castalia dark patch or “macula”
(0°N, 225°W, Galileo, 1998)

The non-icy material is recent and possibly from underneath

Prockter, L.M. and Schenk, P. (2005). Origin and evolution of Castalia Macula, an anomalous young depression on Europa. *Icarus* 177, 305–326.



Julián Chela-Flores,

*The Abdus Salam ICTP, Trieste, Italia and
Instituto de Estudios Avanzados, Caracas, República Bolivariana de Vene*

Searches for biomarkers on Europe's surface

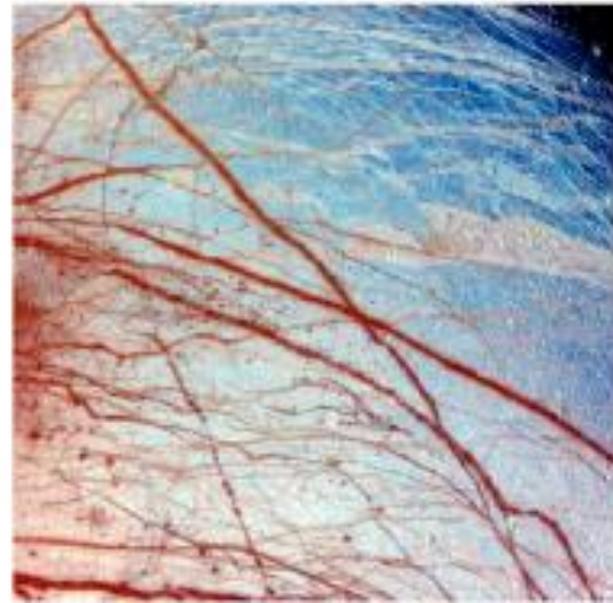
The icy surface of Europe shows reddish streaks due to different compounds, such as sulfate salts and sulfuric acid

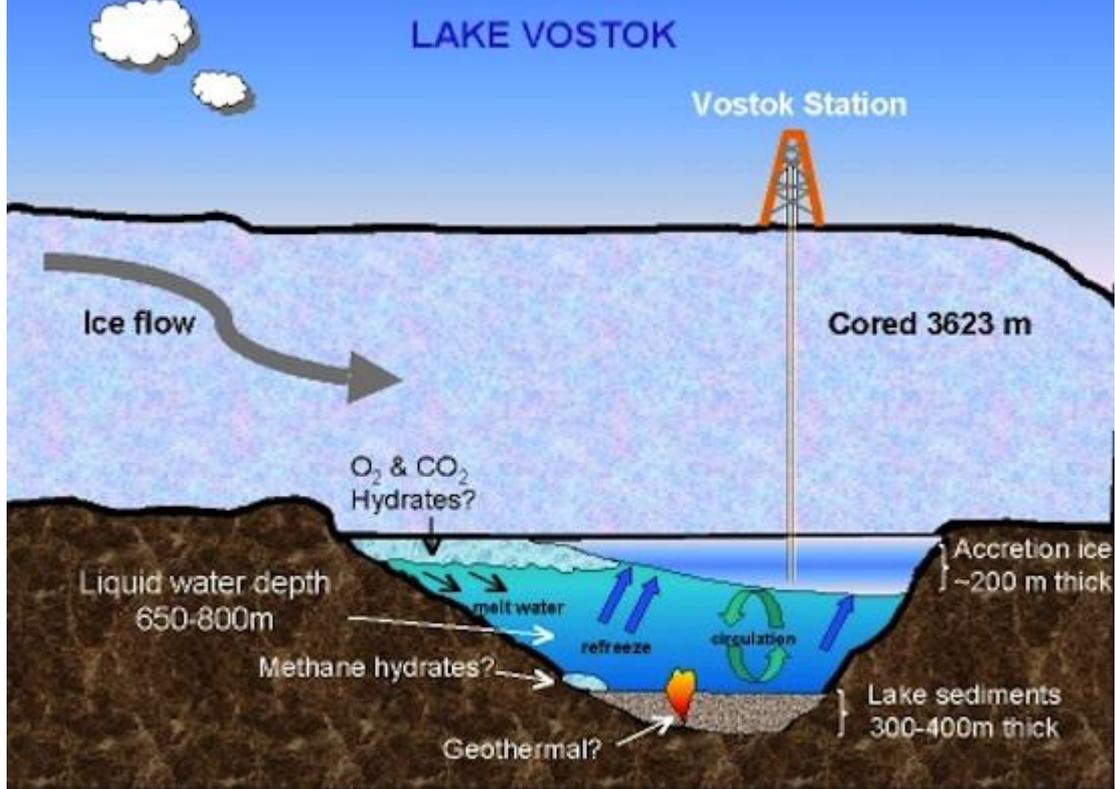
Their presence may be related to outgassing from Io, but also to an exchange of material between the surface and the subsurface layers, down to the liquid layers

The chemical pathways able to lead to the formation of such chemical compounds are investigated to search for evidence of biochemical activity, if any

In terrestrial life, sulfur can be produced biologically, in which case the isotopic ratio $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ tends to be higher than the corresponding non-biological ratio

Future space missions on Europe are considering the possibility of measuring the sulfur isotopic ratio on Europe's surface, searching for evidence of a biological origin





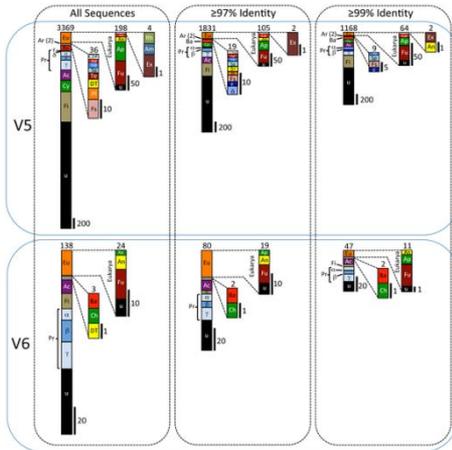
Il lago Vostok

“We are very sure that what we have found is an unclassified native microbe,” Bulat says. “It seems to belong to a division of uncultured environmental bacteria that haven’t been determined yet.”

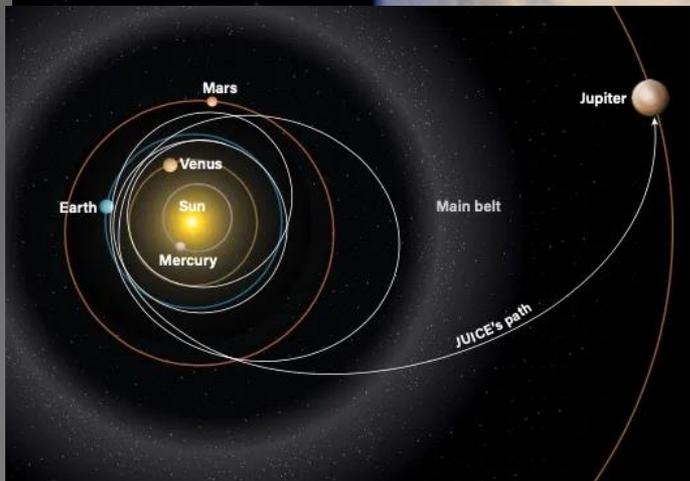
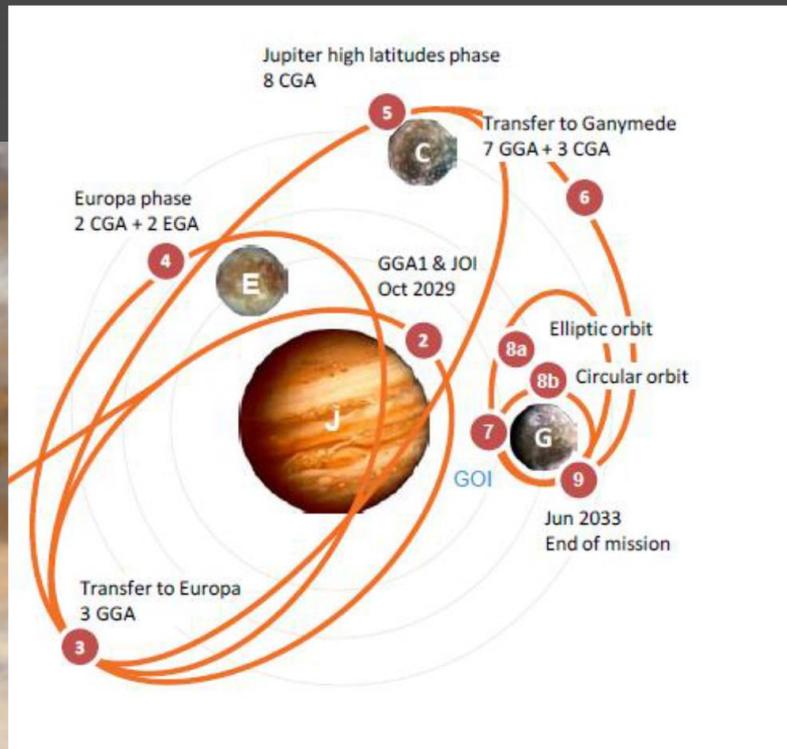
...contaminazione?

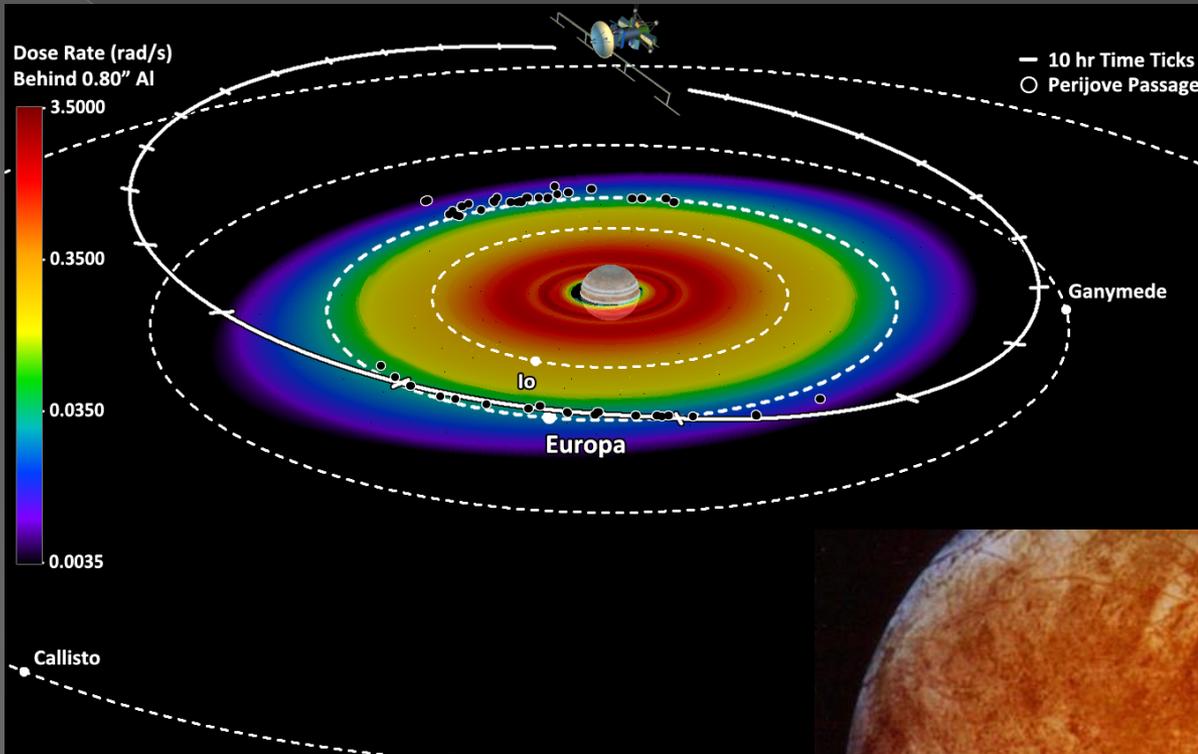
Shtarkman et al 2013:

Lake Vostok accretion ice contains nucleic acids from a diverse set of organisms, including sequences from anaerobic, aerobic, psychrophilic, thermophilic, halophilic, alkaliphilic, acidophilic, aquatic, marine and sediment-inhabiting species. The list of taxa consists of approximately 94% Bacteria and 6% Eukarya, including over 100 sequences from multicellular Eukarya. The sequences represent members of species that participate in many phases of the nitrogen cycle, as well as those that fix, utilize and recycle carbon. The higher concentrations of microbes in accretion ice compared to the overriding meteoric ice, and the presence of RNA, suggest that viable organisms exist in the lake water. Therefore, Lake Vostok might contain a complex web of organisms, zones and habitats that have developed over the tens of millions of years of its existence.

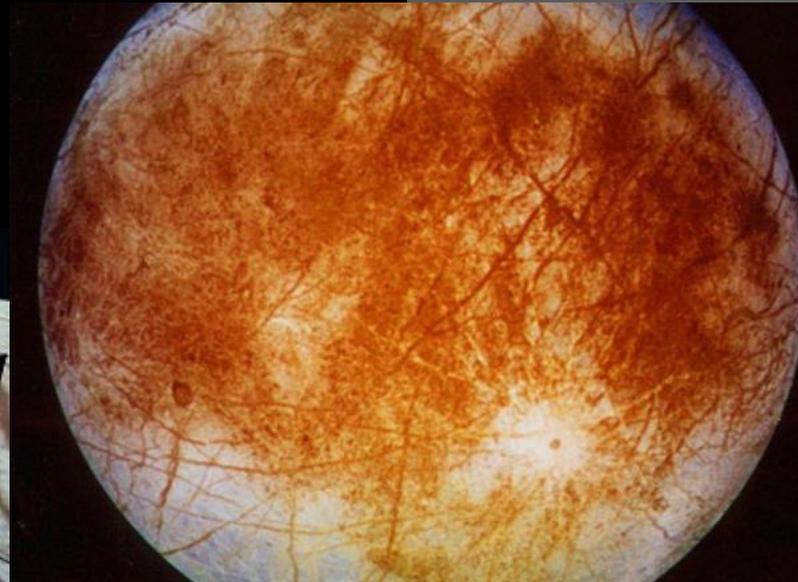


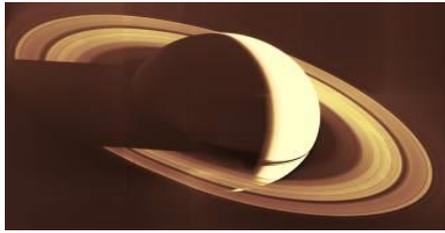
Juice



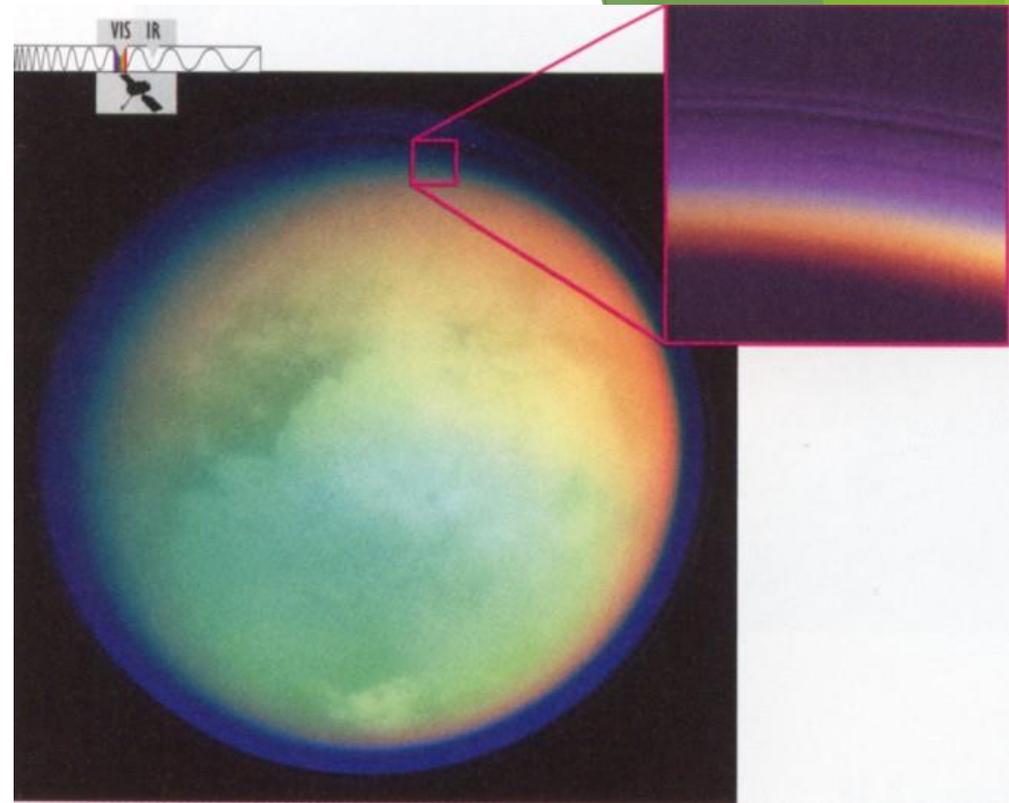


Europa clipper

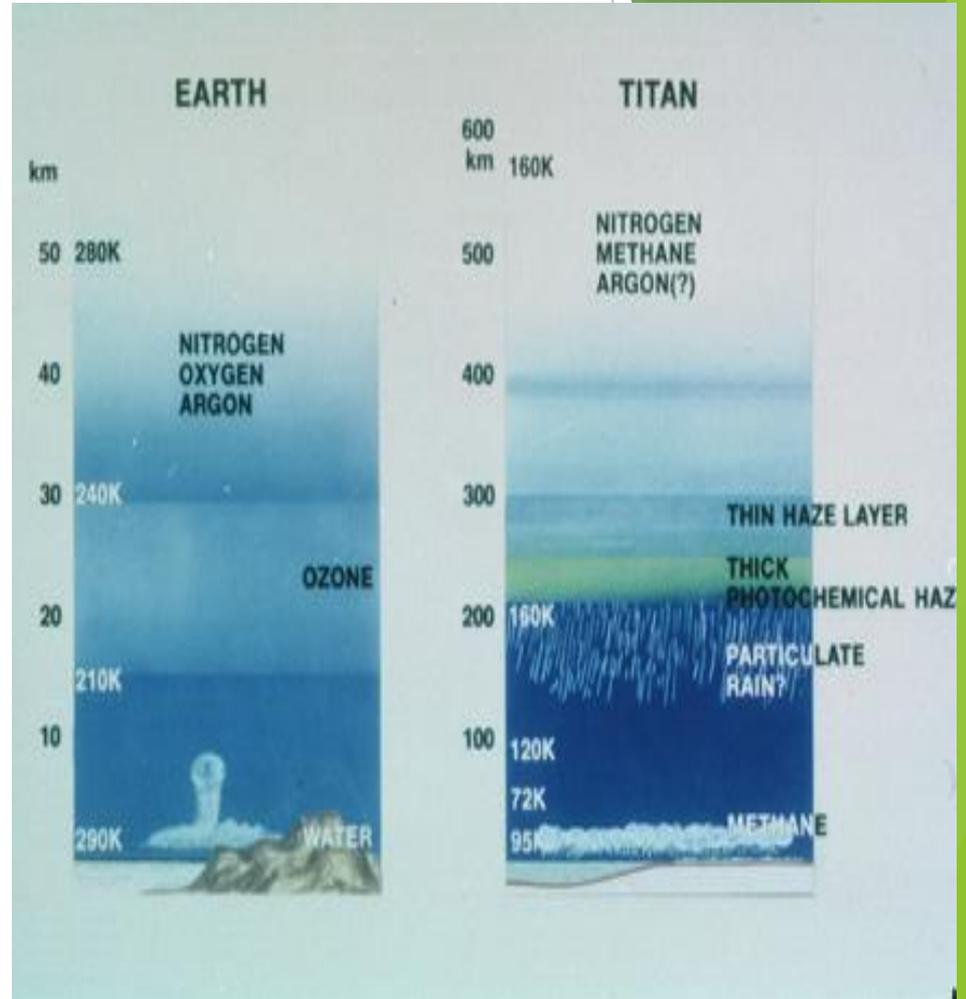




Titano



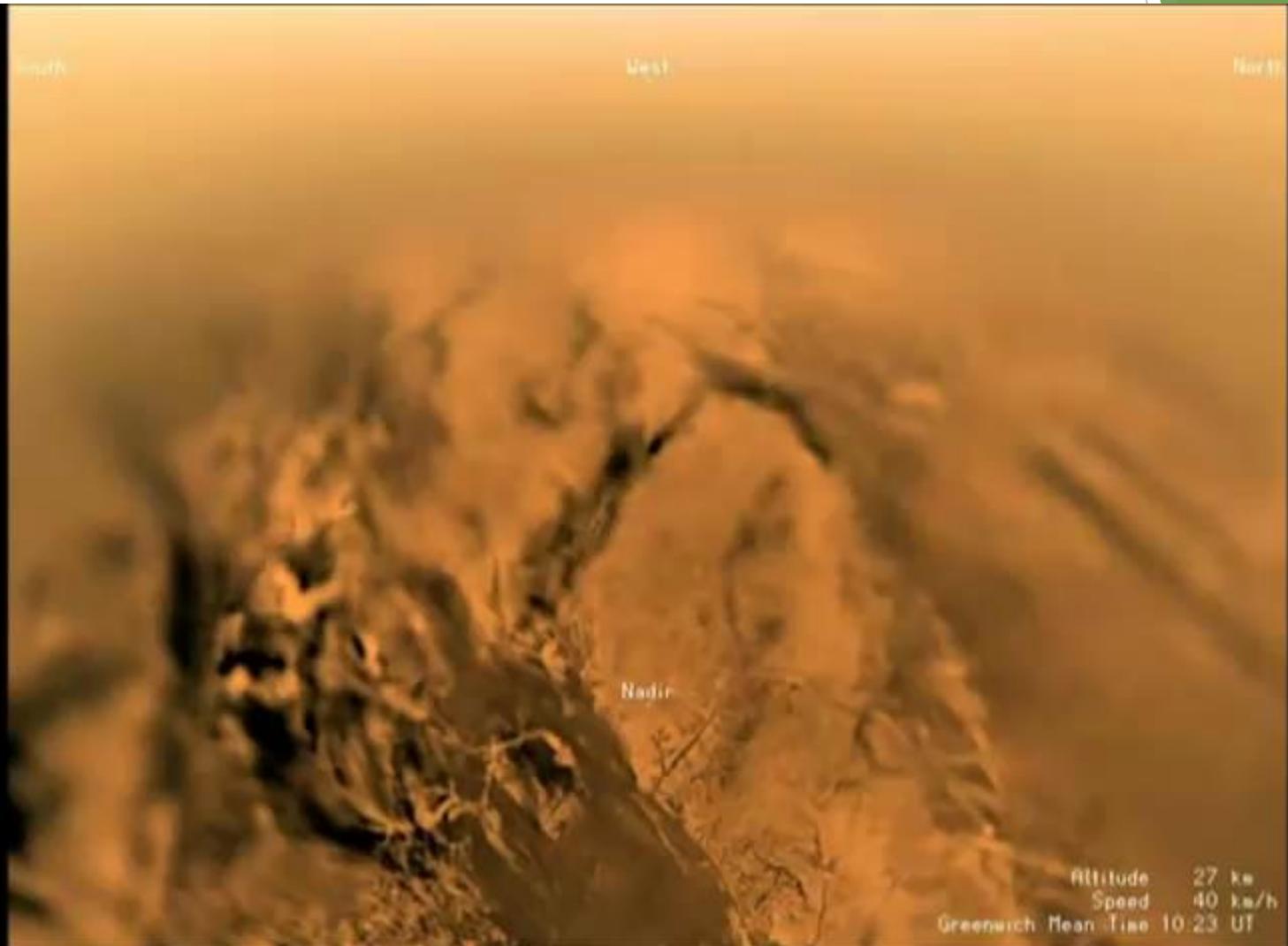
- ▶ Satellite di Saturno
- ▶ Notevoli quantità di materiale organico in superficie
- ▶ Le condizioni superficiali permettono alle molecole organiche non polari CH_4 (metano) e C_2H_6 (etano) di esistere in fase liquida
- ▶ Laboratorio ideale per capire se sia **possibile una biochimica basata su un solvente non polare**



www.astro.umd.edu/~nixon/titan_astrobiology.ppt

I PIANETI DEL SISTEMA SOLARE

Titan

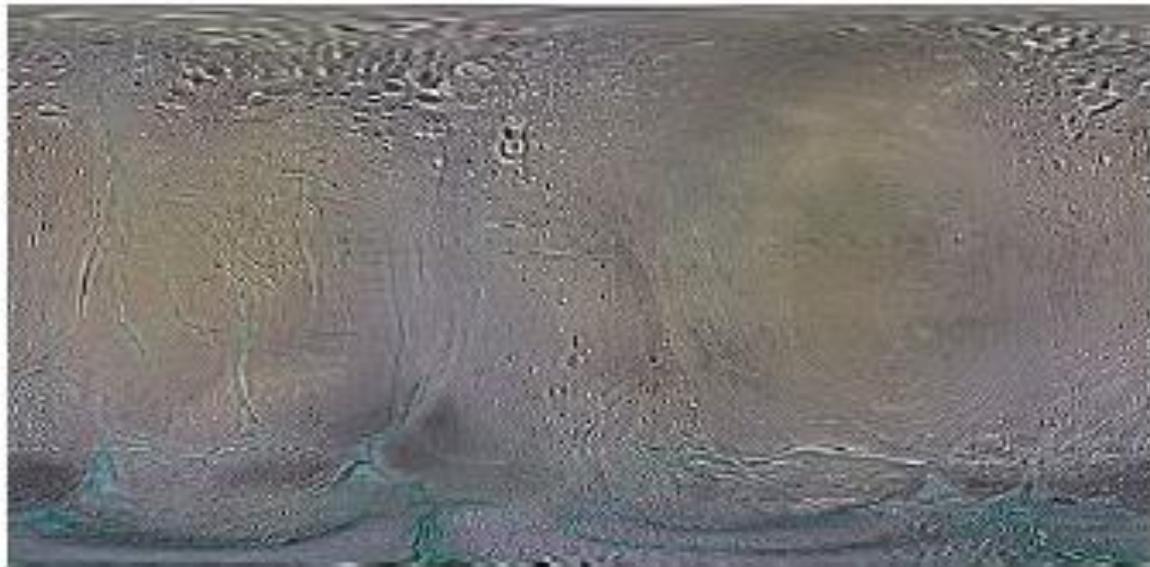


Small moons of Saturn: Enceladus

Enceladus is a moon of Saturn with radius ~ 250 km

Its mean surface temperature is extremely low (~ 75 K) not only because the low insolation, but also because of the very high albedo of its surface, which is mostly covered by fresh ice

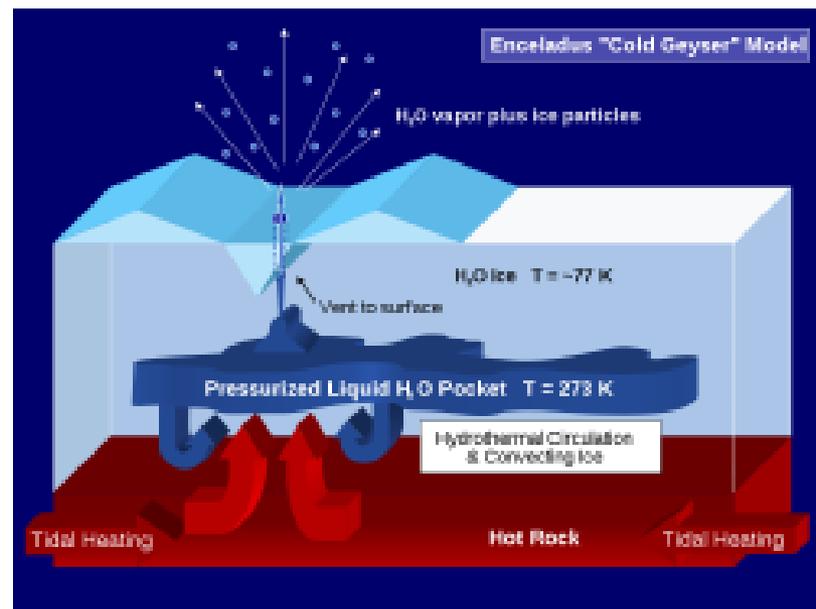
In 2005, the Cassini spacecraft performed multiple close flybys of Enceladus, revealing its surface in detail; the surface shows old, heavily cratered regions, as well as young, tectonically deformed terrains



Enceladus

Enceladus is trapped in an orbital resonance with Dione; this resonance excites its orbital eccentricity, which is damped by tidal forces

The geophysical activity is probably driven by tidal heating of its interior
The existence of liquid water and organics in an ambient with internal energy and temperature gradient makes the interior of Enceladus a potentially habitable environment

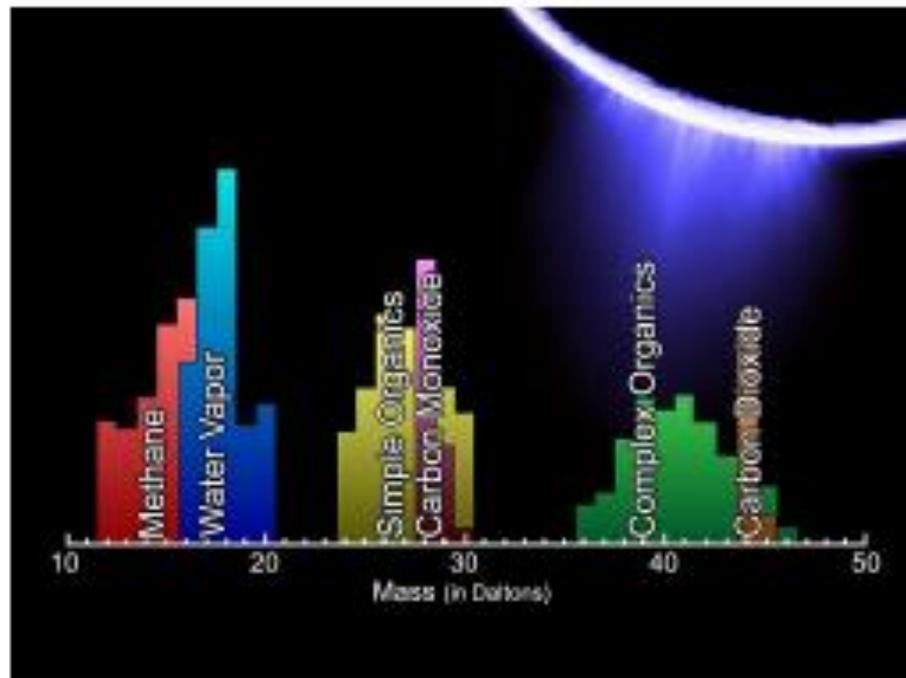


Enceladus

The astrobiological interest of Enceladus arises from the discovery of geyser-like jets of water vapor venting from the south polar region

In addition to water vapour, the jets contain methane, CO, CO₂ and organics

The geyser observations, along with the finding of escaping internal heat and the lack of impact craters in the south polar region, show that Enceladus is geologically active today



...e dopo Encelado?

- ▶ Temperature troppo basse, il Sole e' troppo debole
- ▶ Urano, Nettuno: giganti gassosi
- ▶ Plutone e la Kuiper Belt

Capitolo tre

La vita oltre il sistema solare:

“fino ad arrivare la’, dove nessun uomo e’ mai giunto prima”



Tecniche di rivelazione di pianeti extrasolari

▶ Metodi diretti

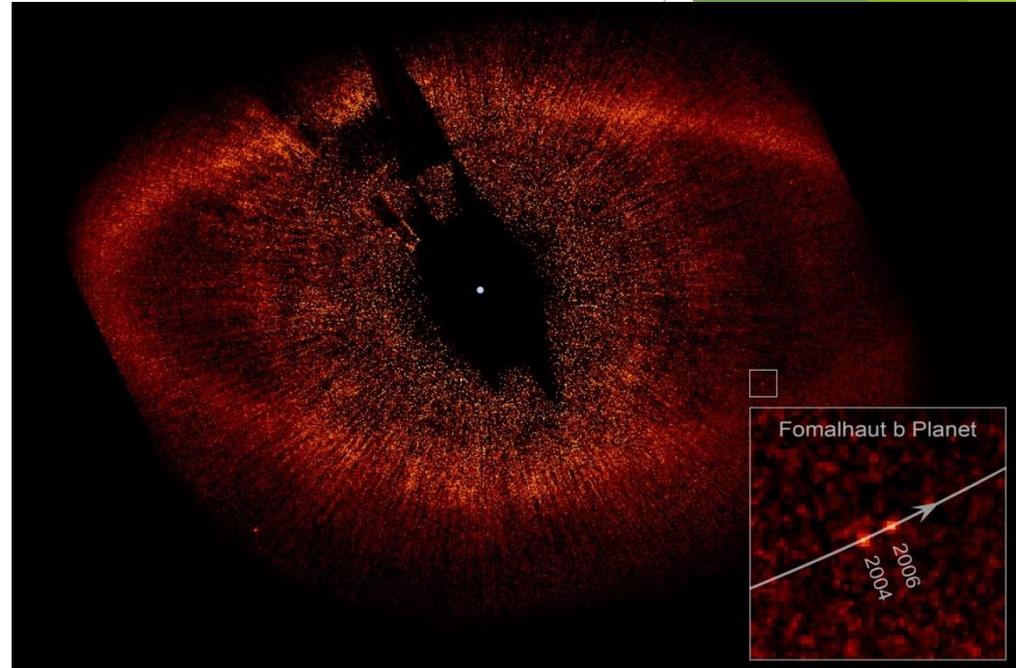
- ▶ Rivelazione dell'emissione infrarossa del pianeta e della luce stellare da esso riflessa
- ▶ Il più difficile da realizzare dal punto di vista tecnologico
- ▶ Nel visibile, usando come esempio il sistema Terra-Sole visti da lontano, il contrasto tra luce emessa dal pianeta e dalla stella è dell'ordine di $\sim 2 \times 10^9$
- ▶ Il più promettente per ottenere informazioni sulle proprietà del pianeta

▶ Metodi indiretti

- ▶ Perturbazione del moto della stella centrale
- ▶ Spettroscopia: curva di velocità radiale della stella
- ▶ Astrometria: oscillazione della posizione della stella
- ▶ Fotometria: oscuramento della stella centrale: curva di luce della stella
- ▶ Microlensing gravitazionale

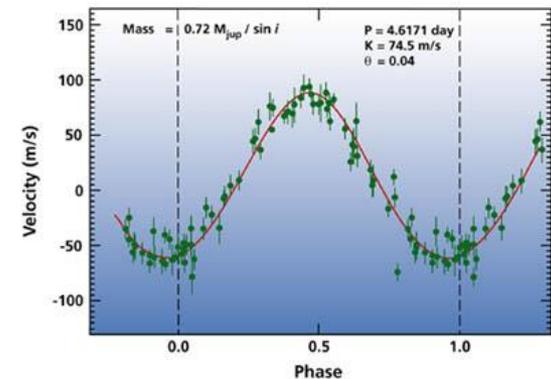
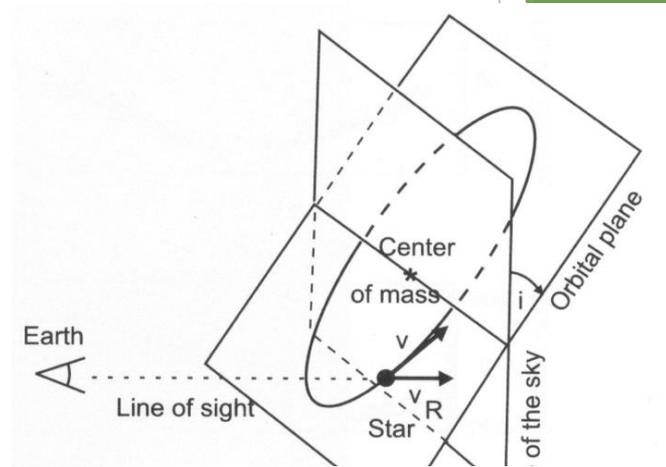
“Imaging” diretto di pianeti

- ▶ Primo esempio scoperto nel 2008 rianalizzando dati HST: Fomalhaut b
- ▶ Si stanno sviluppando strumenti per estendere l'utilizzo di questa tecnica
 - ▶ Favorirà la scoperta di pianeti relativamente lontani dalla stella
 - ▶ Contrariamente alla tecnica delle velocità radiali



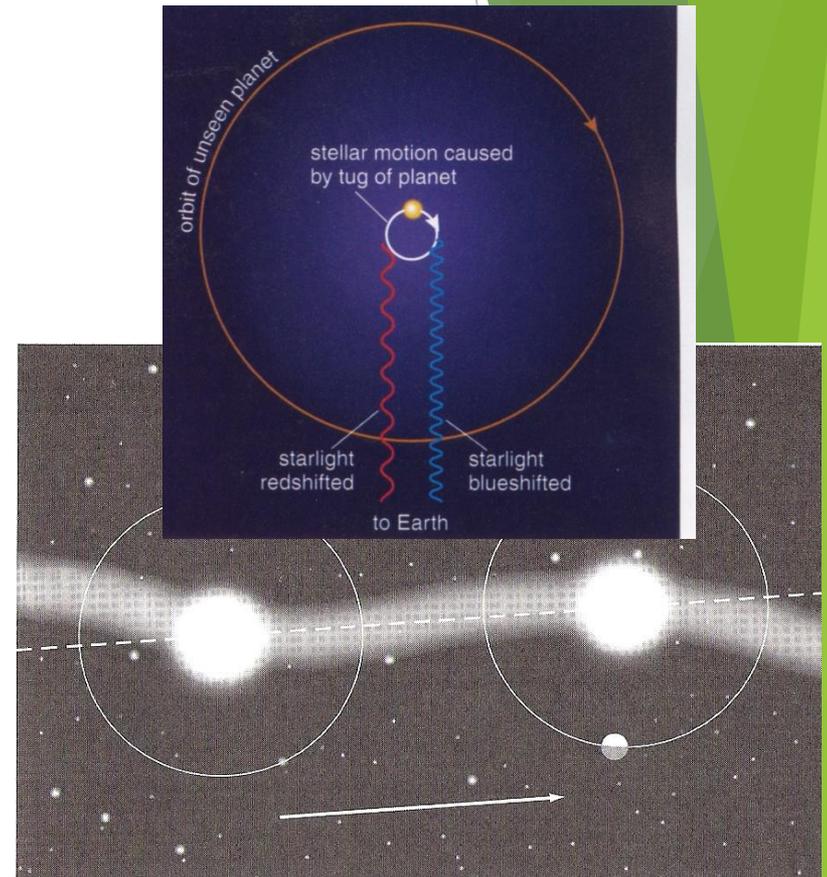
La curva di velocità radiale: il metodo che ha avuto più successo

- ▶ Dipende dall'angolo i (inclinazione) tra il piano dell'orbita e il piano perpendicolare alla visuale
- ▶ Dalle leggi di Keplero riusciamo a misurare $M \sin i$ dove M è la massa del pianeta
 - ▶ Il metodo è più efficiente quando $i=90^\circ$
- ▶ Oltre al periodo P e a $M \sin i$ riusciamo anche a misurare il raggio medio e l'eccentricità dell'orbita

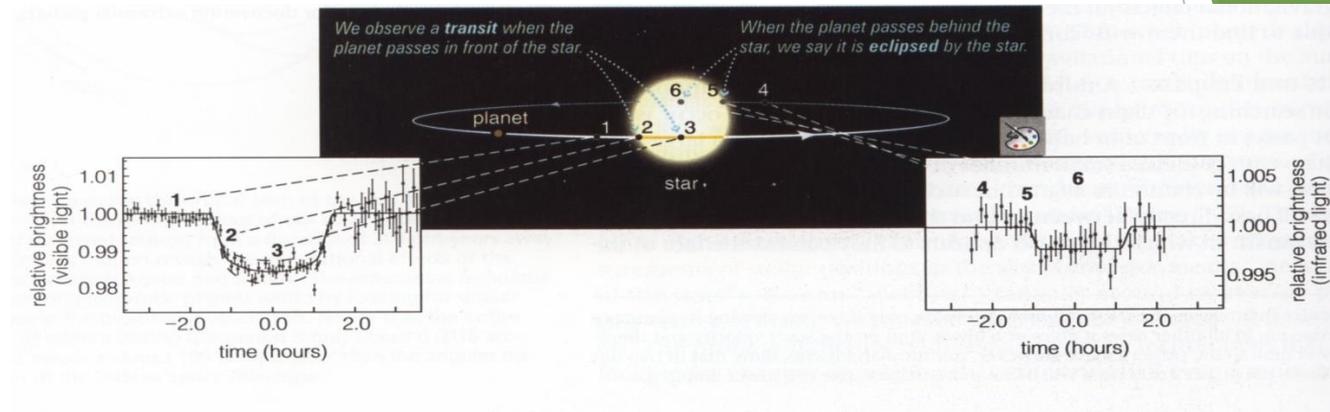


Rivelazione del moto della stella centrale

- ▶ Misura astrometrica (moto proprio) dei movimenti della stella attorno al comune centro di massa
 - ▶ In questo caso misuriamo il movimento nel piano perpendicolare alla visuale e otteniamo $M \cos i$
 - ▶ Richiede precisioni astrometriche superiori a quelle attualmente raggiunte
 - ▶ La futura missione GAIA dell'ESA è finalizzata a ottenere precisioni astrometriche di $\sim 20 \mu\text{as}$
 - ▶ due ordini di grandezza maggiori rispetto a quelle attuali
 - ▶ Con tale missione si spera di riuscire a rivelare **alcune decine di migliaia di pianeti**

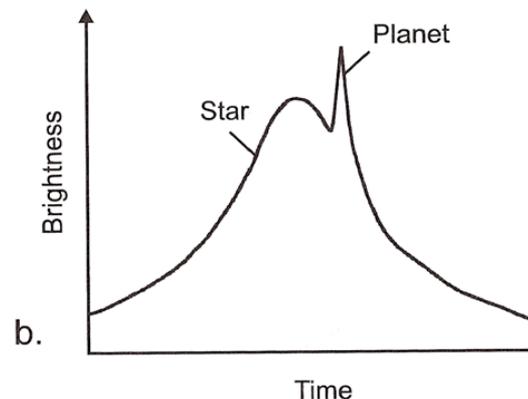
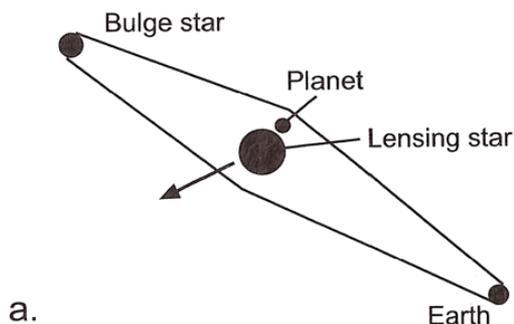


Metodo dei transiti



- ▶ Se l'orbita del pianeta è allineata con la linea di vista si può rivelare la presenza di un pianeta dallo studio della curva di luce della stella
 - ▶ Permette di risalire alla dimensione del pianeta
 - ▶ Richiede un'analisi di eventuali variazioni fotometriche intrinseche della stella
 - ▶ Esistono una mezza dozzina di casi confermati

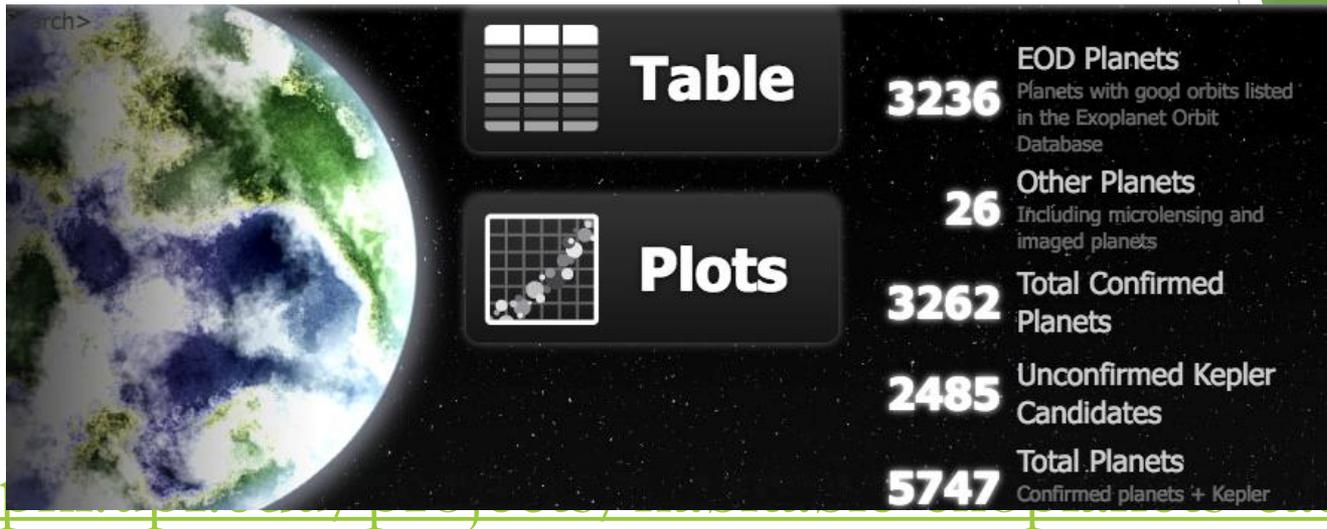
Microlensing gravitazionale



- ▶ Studio di campi di vista affollati di stelle
 - ▶ Per esempio il Bulge (rigonfiamento centrale) della nostra Galassia
- ▶ Dal confronti di varie immagini di un campo affollato vi è una certa probabilità che una stella lungo la visuale agisca da (micro)lente gravitazionale nei confronti della luce di una stella del campo
 - ▶ Effetto visualizzabile dall'analisi della curva di luce
 - ▶ la stella di fondo diventa più brillante con una curva caratteristica e un periodo che dipende dalla geometria del sistema
- ▶ Se la stella che fa da lente ha un pianeta, il passaggio del pianeta può indurre uno "spike" di corto periodo nella curva di luce
- ▶ Permette di ricavare diametro e massa del pianeta
- ▶ Osservazione rara e non ripetibile

EXO-PLANETS (Jun 30th 2021)

← <http://www.exoplanets.org/>



← <http://www.exoplanets.org/>

Last Update: October 5, 2020

The catalog was recently updated with TOI-700 d, Kepler-1649 c, GJ 1061 c/d, Kepler-1701 b, and GJ 229A c

Current Number of Potentially Habitable Exoplanets

Subterranean (Mars-size)	Terran (Earth-size)	Superterranean (Super-Earths or Mini-Neptunes)	Total
1	23	36	60

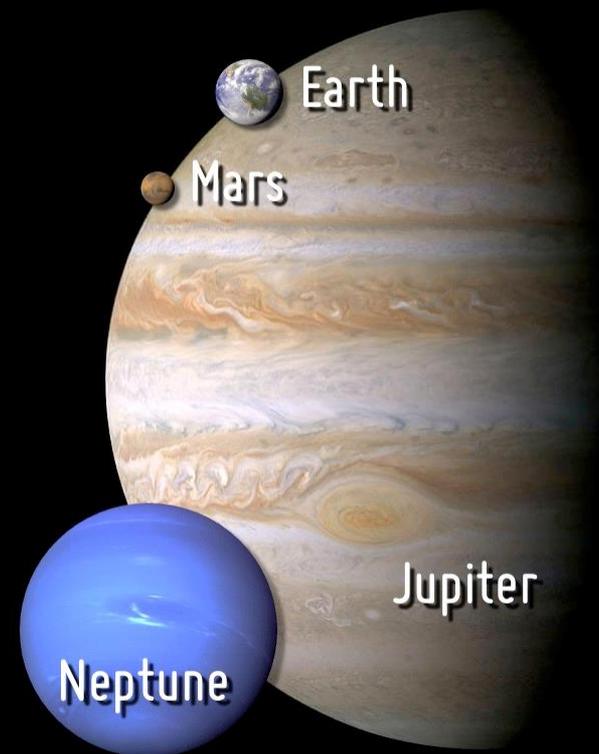
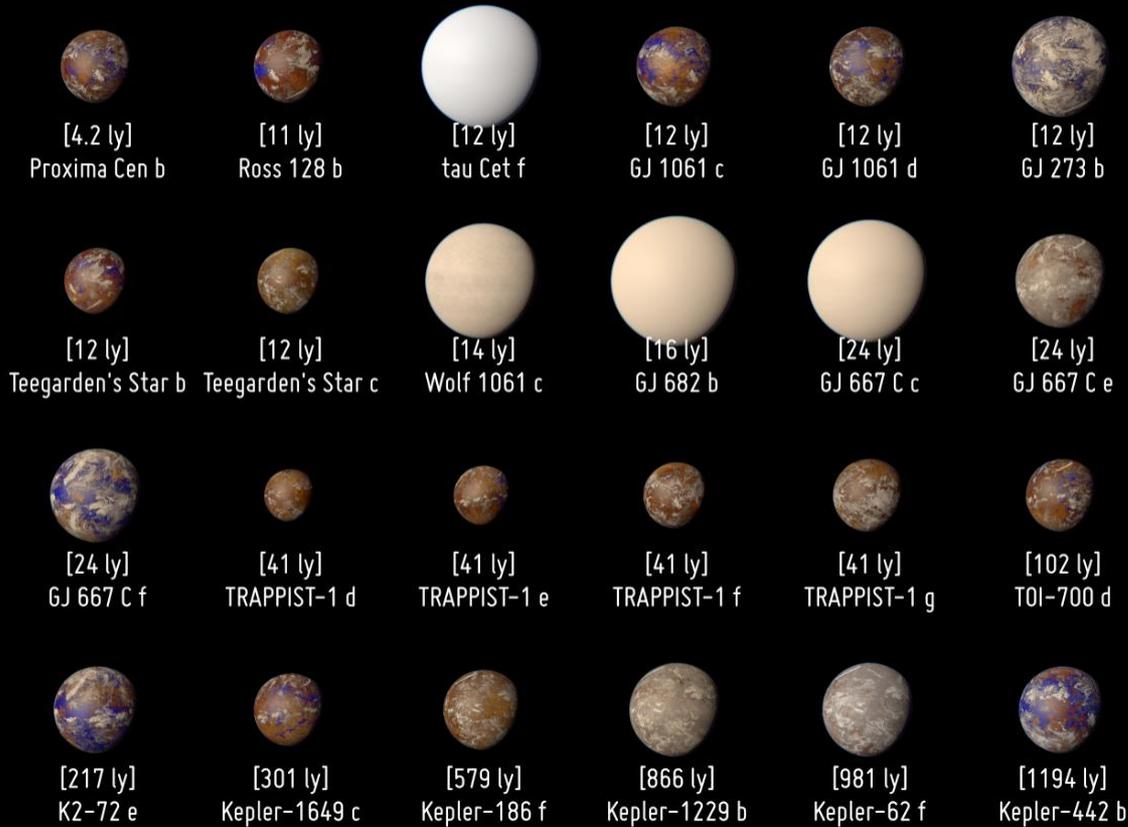
subterranean = 0.1 – 0.5 M_E or 0.4 – 0.8 R_E, terran = 0.5 – 5 M_E or 0.8 – 1.5 R_E, superterranean = 5 – 10 M_E or 1.5 – 2.5 R_E. M_E = Earth masses, and R_E = Earth radii.

EXO-PLANETS (Jun 30th 2021)



Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by Distance from Earth (light years)



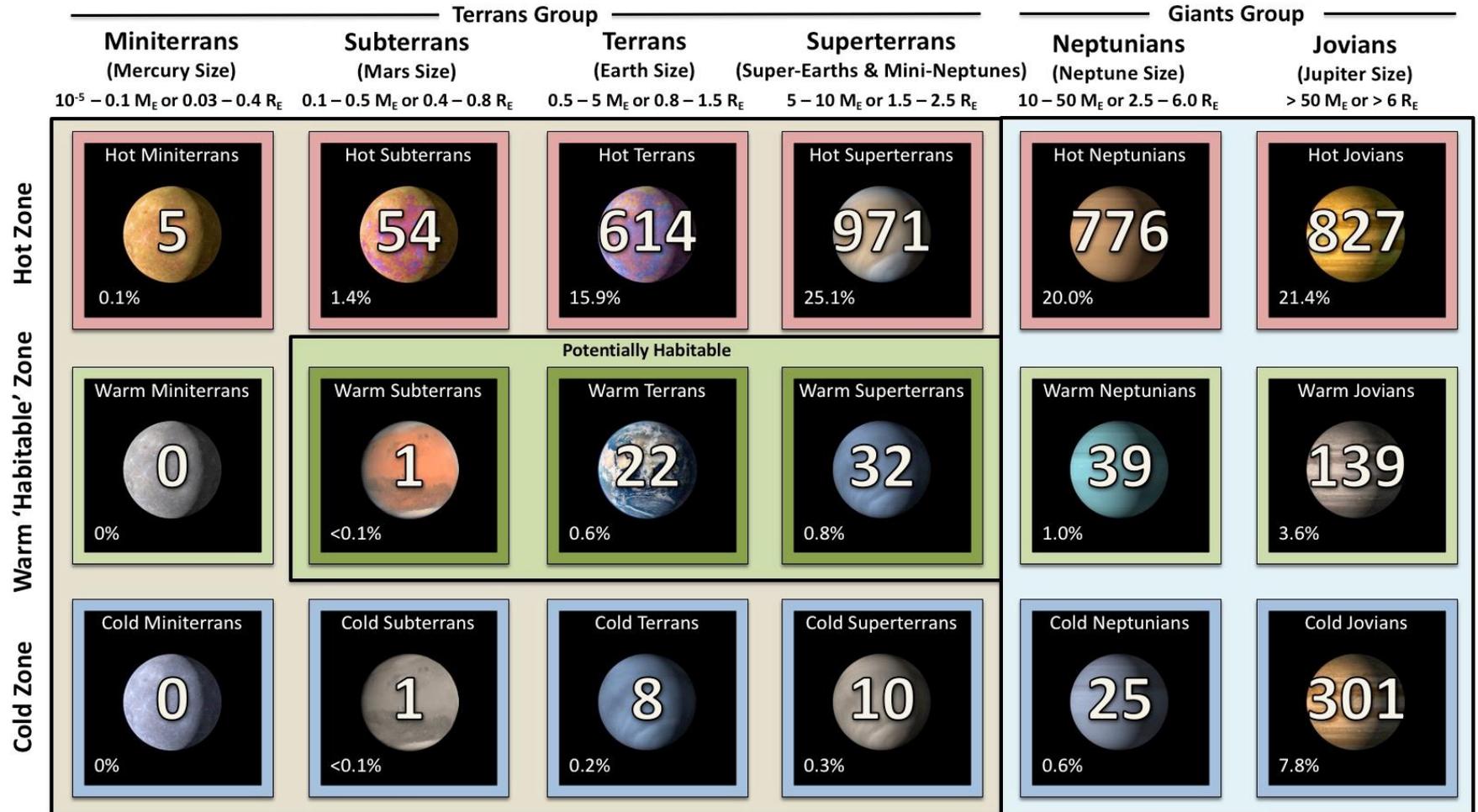
Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance from Earth is between brackets.

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Oct 5, 2020

EXO-PLANETS (Jun 30th 2021)



The Periodic Table of Exoplanets Over 3800 Exoplanets



M_E = Earth Mass, R_E = Earth Radius

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jul 2018

GAIA (ESA)



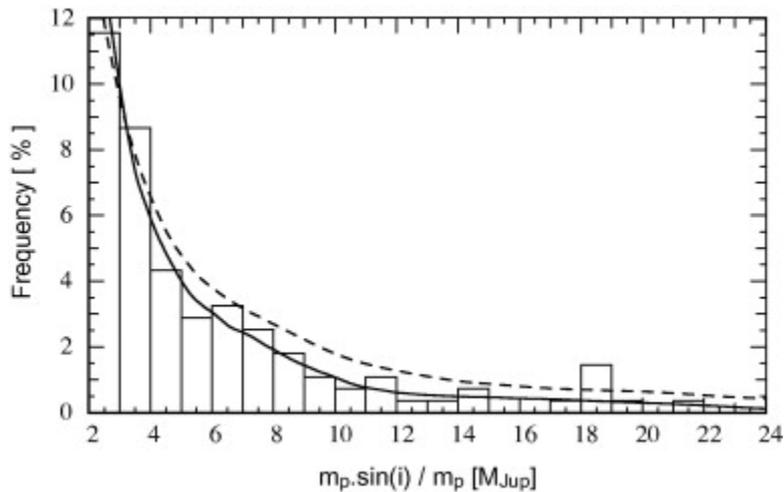
Metodo: astrometria, transiti

Ci si aspetta di scoprire
circa 8000 pianeti Gioviniani
entro 200 pc

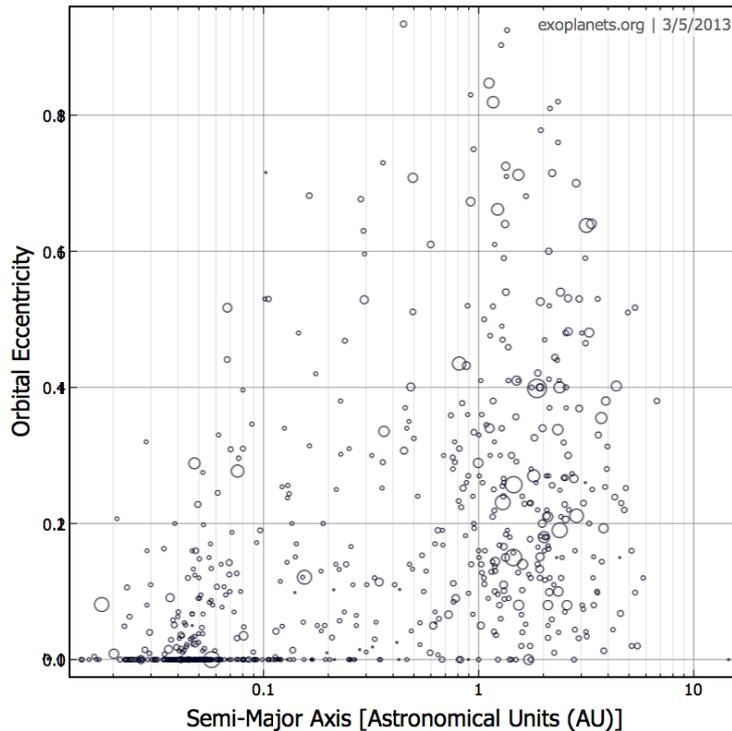


Lanciata il 19 dicembre 2013

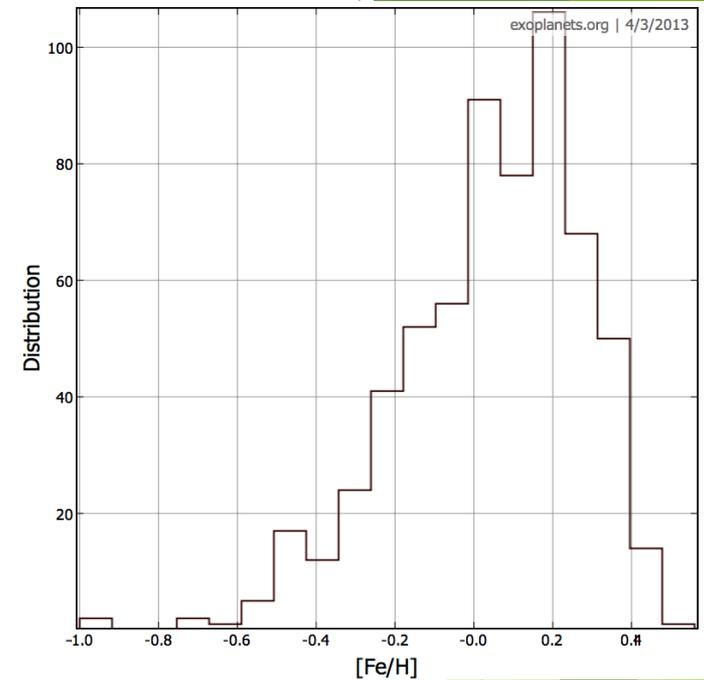
Science Data Center a Torino (M. Lattanzi)



...piu' pianeti «terrestri» che «gioviani»



Gli esopianeti hanno proprieta' molto diverse da quelle dei pianeti del sistema solare!

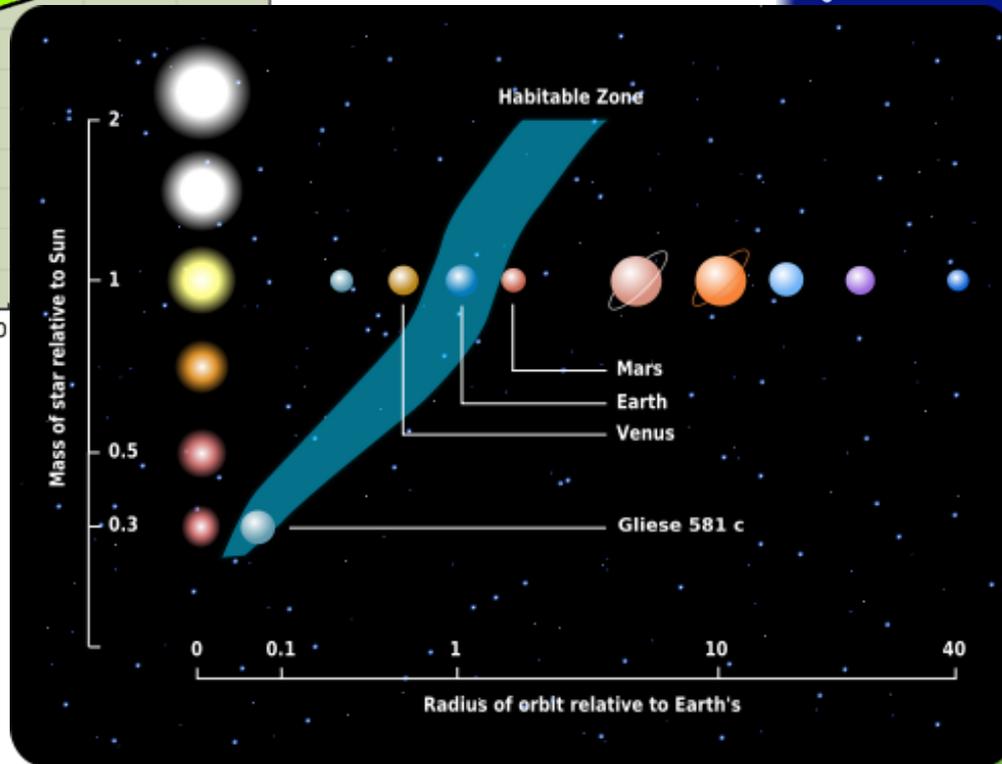
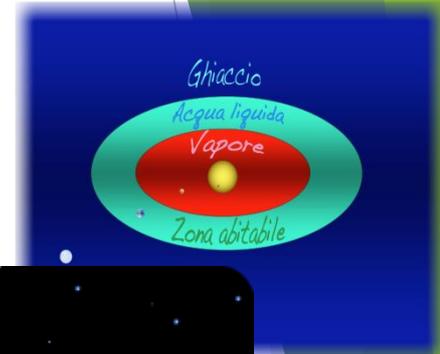
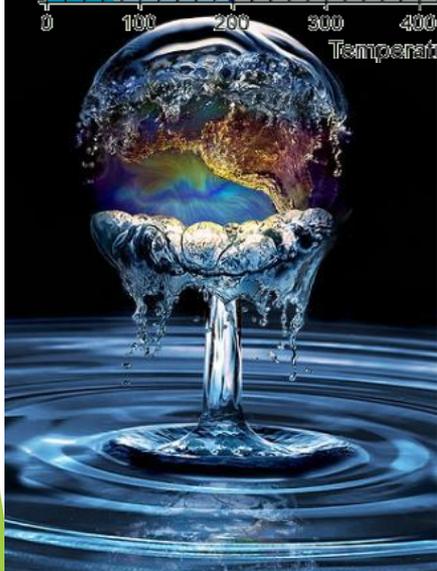
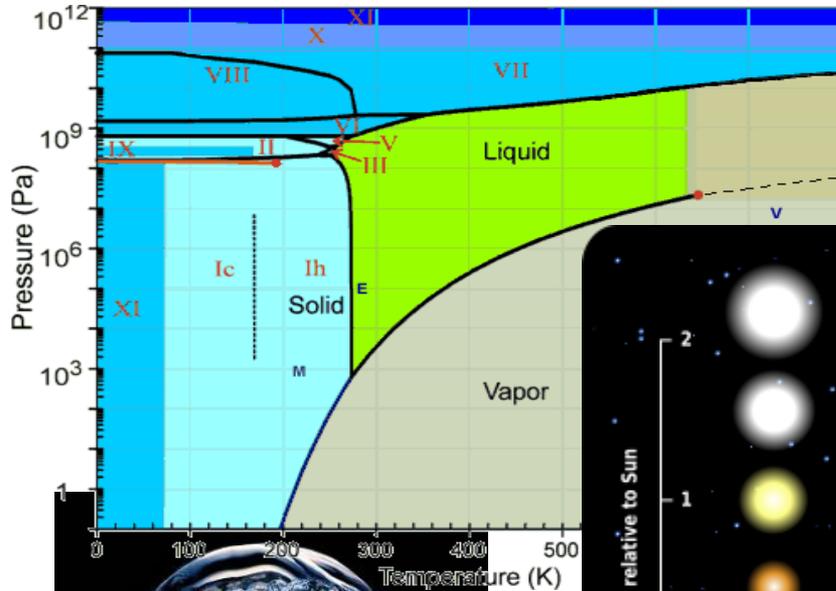


...piu' probabili se la stella ha metalli... ma solo i Giovangiani

I pianeti sono comuni nella Galassia!
Rivelati circa **760 pianeti** a partire dal 1995 (in rapida crescita; “da confermare” sono 3468)

Lista aggiornata: <http://exoplanets.org/>

Alla ricerca dell'acqua



“Zona Abitabile Circumstellare”

Abitabilità dei pianeti extrasolari

▶ Tipo di stella

- ▶ Spettro di radiazione, età sulla sequenza principale

▶ Distanza pianeta-stella

- ▶ Posizione rispetto alla zona abitabile circumstellare

▶ Eccentricità dell'orbita

- ▶ Stabilità del sistema planetario

▶ Massa del pianeta

- ▶ Tipo terrestre o gigante

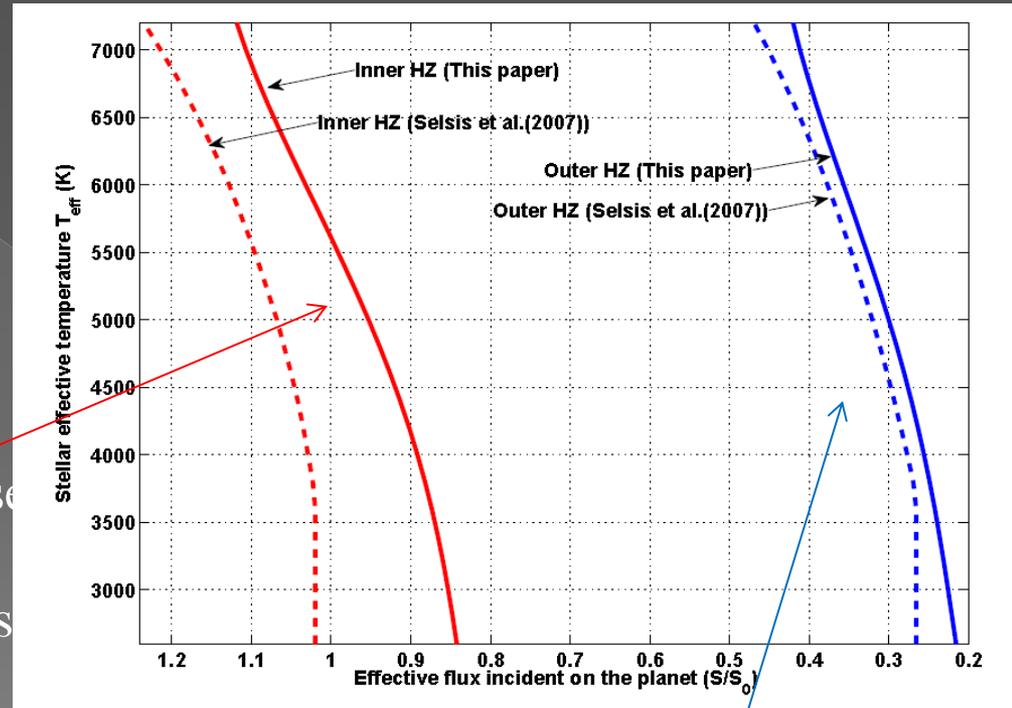
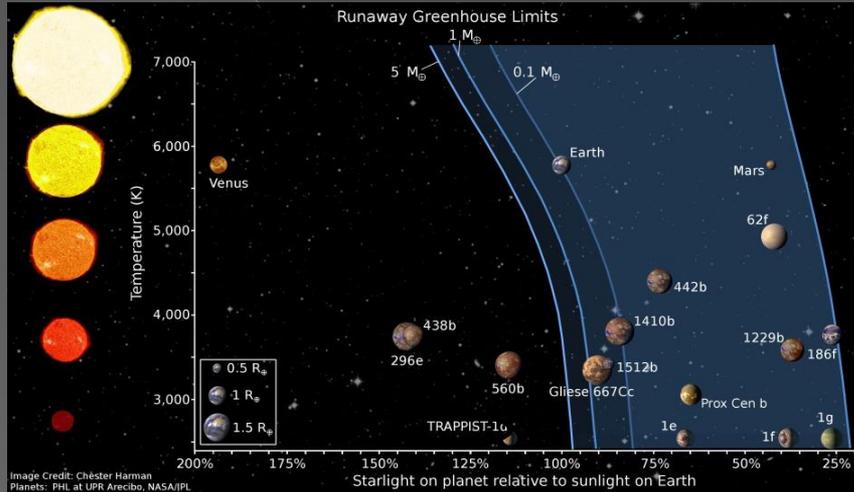
▶ Densità media del pianeta

- ▶ Tipo di pianeta (roccioso, gassoso)
- ▶ Possibilità di trattenere un'atmosfera

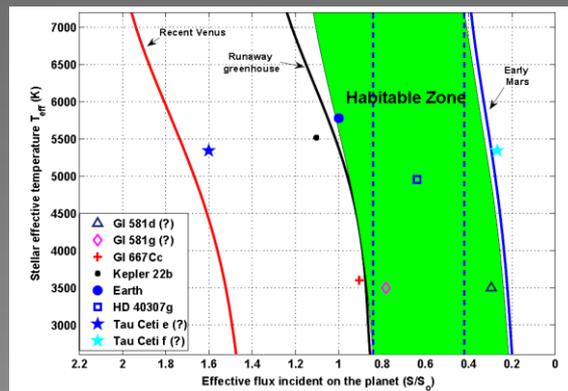
- ▶ Nei prossimi anni non solo ci sarà un aumento della statistica, e quindi della probabilità di trovare pianeti abitabili, ma si potranno anche studiare le atmosfera dei pianeti

Circumstellar habitable zone

(Kasting+ 93 – BEFORE 1st exo-planet discovery)

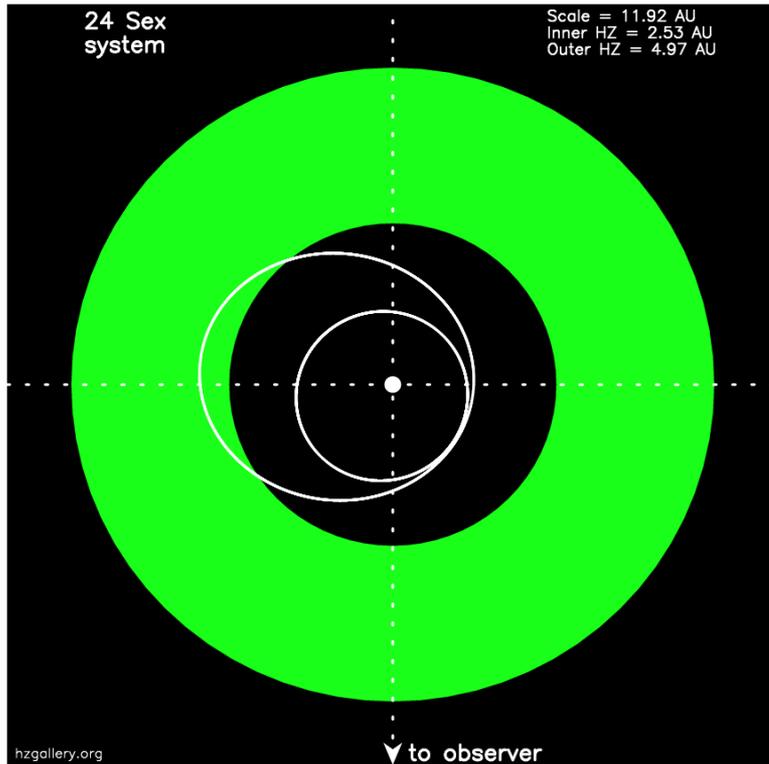


(Kopparapu+ 2013)



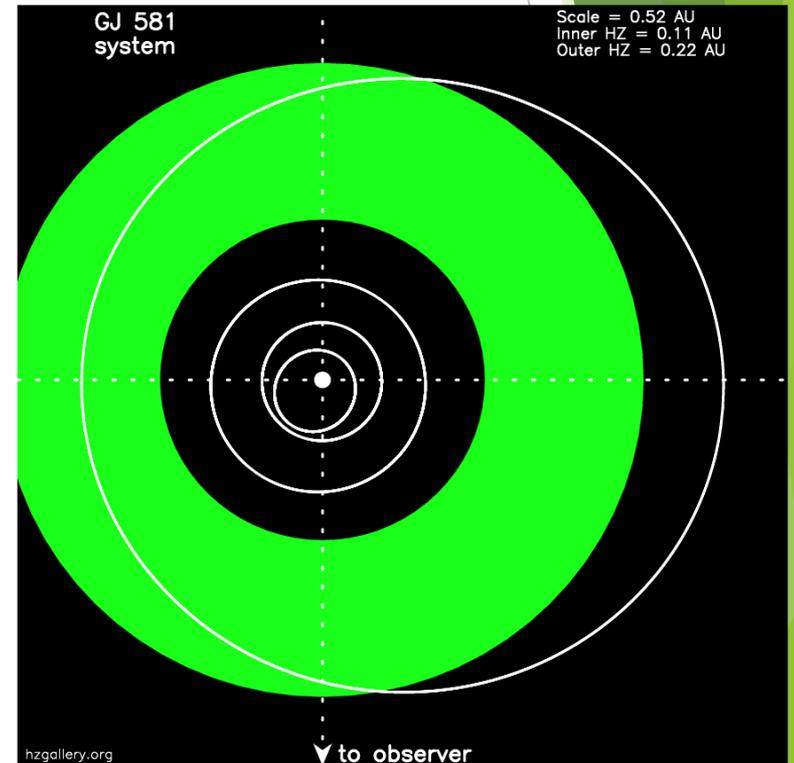
Runaway greenhouse (ocean evaporates H_2O is photodissociated and hydrogen is lost)

Maximum greenhouse (at lower insolation, effect of CO_2 clouds albedo takes over)



Zone abitabili degli esopianeti attualmente noti:

www.hzglallery.org



...due esempi...

Il clima e l'abitabilità

- ▶ La temperatura effettiva della Terra, dato il bilancio energetico, dovrebbe essere -18° , invece è $+15^{\circ}$
- ▶ La differenza sta nella presenza dell'atmosfera
- ▶ In passato il problema era ancora maggiore! (Faint Young Sun Paradox)

The surface temperature

0D model: $I = \sigma T_{eq}^4 = \frac{S}{4}(1 - A)$ $T_s = T_{eq} + \Delta T_{greenhouse}$

Earth: $T_{eq} = -18^\circ\text{C}$, $T_s = +14.5^\circ\text{C}$

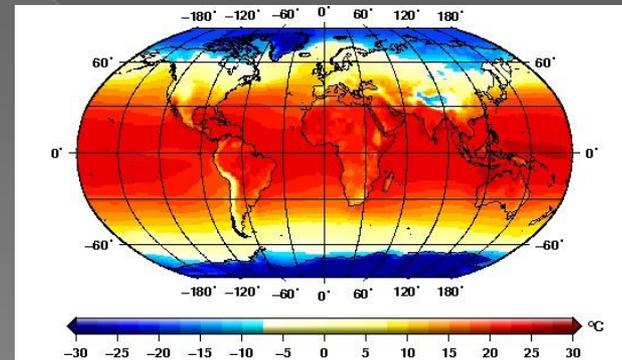
No information on latitudinal heat transport

$\Delta T_{greenhouse}$ to be modeled

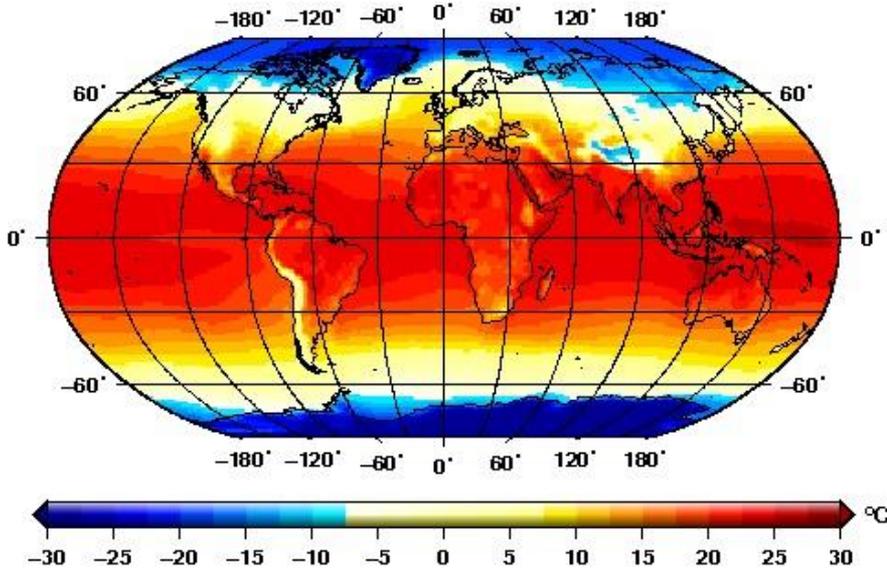
3D climate models: **G**eneral **C**irculation **M**odels

Complex, parametrized physics; requires full planet infos; need HPC and 10^5 - 10^6 CPU hours per run

1D radiative/convective atmospheric column models –use atmo chemistry and



Esoclimi



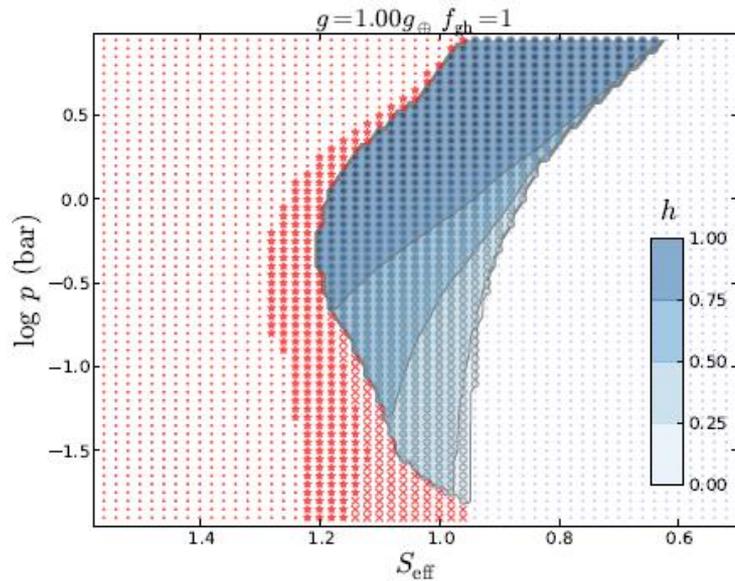
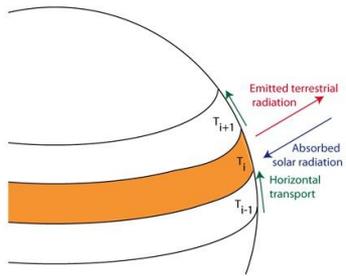
Si possono utilizzare modelli di complessità variabile per studiare climi di esopianeti

Entrano fattori astronomici (tipo di stella, tipo di orbita..) e planetari (inclinazione dell'asse, periodo di rotazione, tipo di atmosfera, pressione, frazione di oceani...)

I « NOSTRI » EBM

ESTM

Earth-like Surface Temperature Model

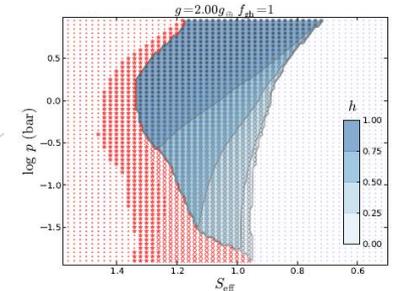
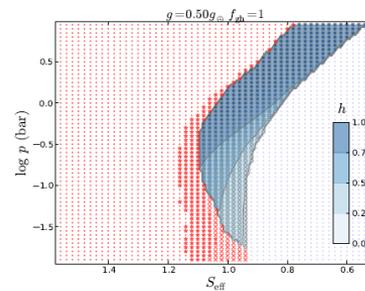


Gruppo: Giovanni Vladilo, Lorenzo Biasiotti, Erica Bisesi, Maria Di Paolo, Marco Fulle, Stavro Ivanovski, Michele Maris, Sergio Monai, Giuseppe Murante, Laura Silva, Paolo Simonetti, Antonello Provenzale, Jost von Handenberg

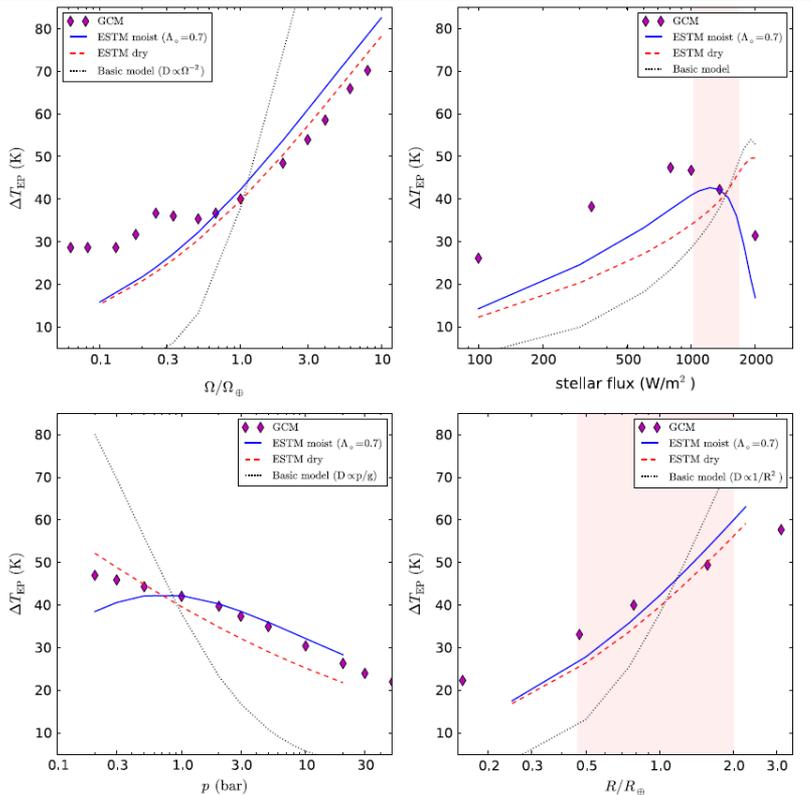
Abitabilità: acqua liquida

Abitabilità frazionaria: percentuale della superficie planetaria abitabile in una percentuale dell'anno

Vita complessa



Validation with 3D aquaplanet simulations (Kaspi & Showman 2015)



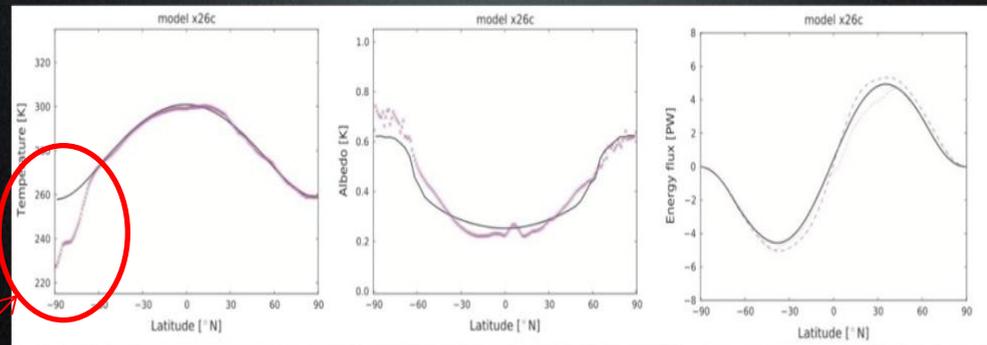
Calibration with Earth data

Calibration with Earth data:
mean annual latitudinal profiles

Surface T

Albedo

Meridional flux

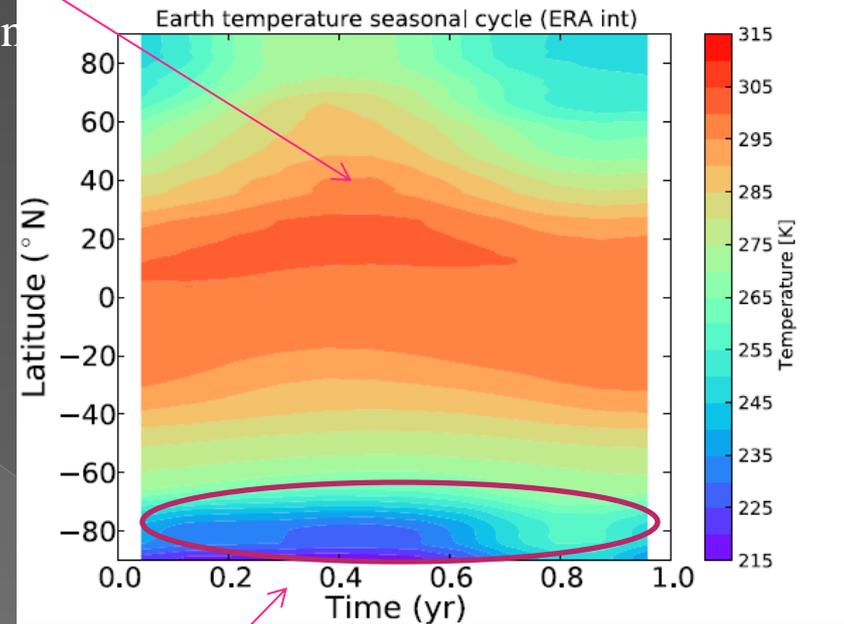
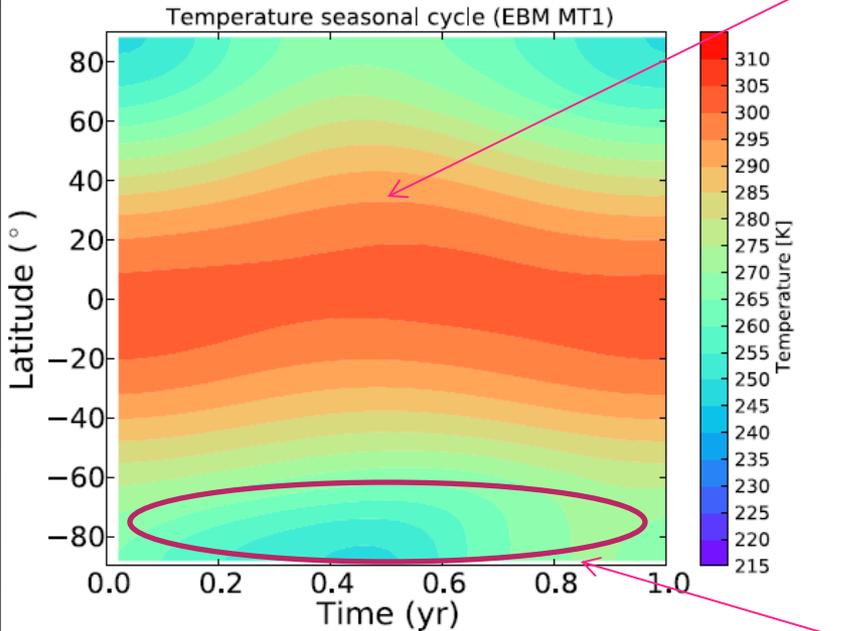


Antartica effect
(about 4000m altitude,
not included in ESTM)

Example of output from a simulation
Seasonal-latitudinal temperature map
 $T(\varphi,t)$ of an Earth twin

Earth surface temperatures $T(\varphi,t)$
(ERA int 2001-2013)

Thermal
capacity
confusion



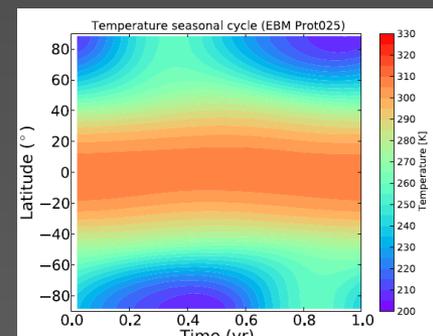
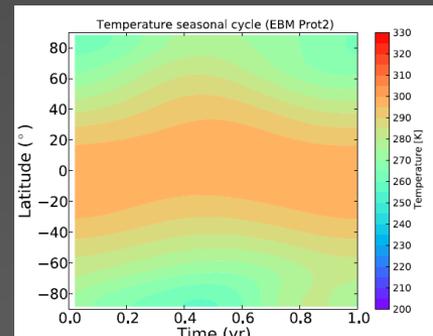
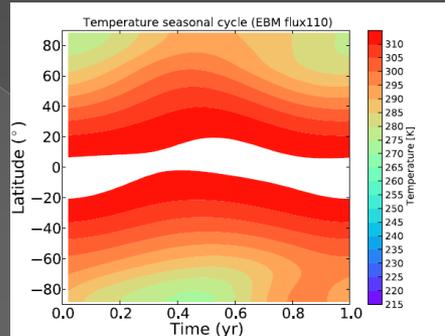
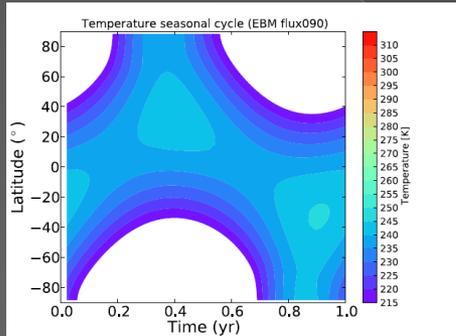
Note that the model converges
to a limit cycle.
Convergence tested on
the global annual average temperature

Antarctica effect

Varying planetary parameters

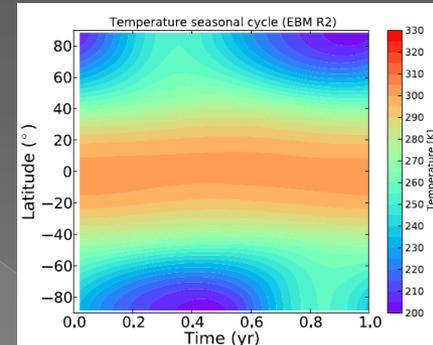
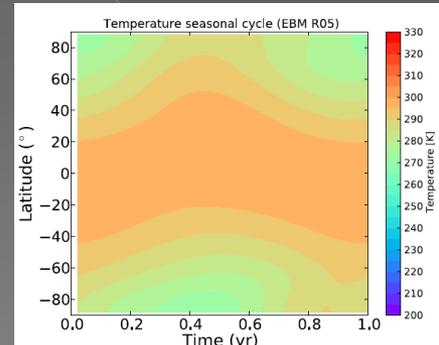
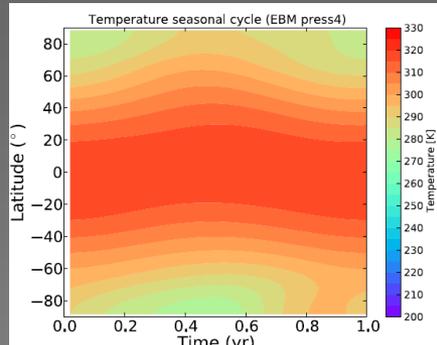
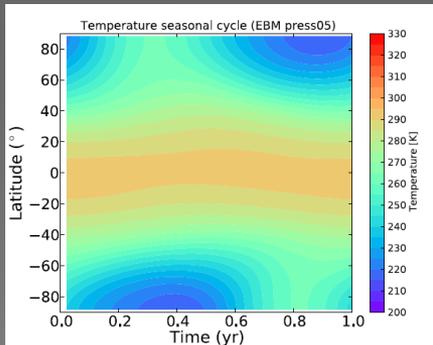
$S=0.9 S_0$ INSOLATION $S=1.1 S_0$

2.0d ROTATION PERIOD 0.25 d



0.5 bar PRESSURE 4.0 bar

0.5 R_{Earth} PLANET RADIUS 2.0 R_{Earth}



All remaining parameters and atmosphere chemical composition are Earth-like

Complex life habitability index

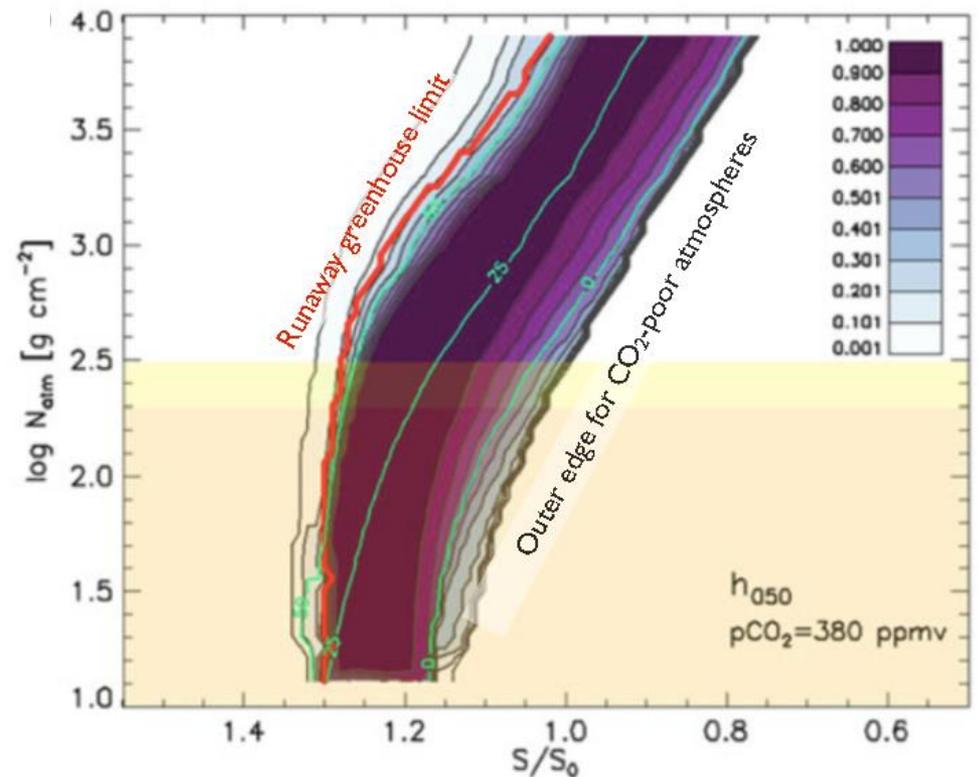
$$H(\varphi, t) = \begin{cases} 1 & 0^\circ\text{C} \leq T(\varphi, t) \leq 50^\circ\text{C} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$h_{050} = \frac{\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\varphi \int_0^P dt [H(\varphi, t) \cos \varphi]}{2P}$$

$$N_{\text{atm}} = p/g$$

Silva+ 2017a

Thousands
of runs..

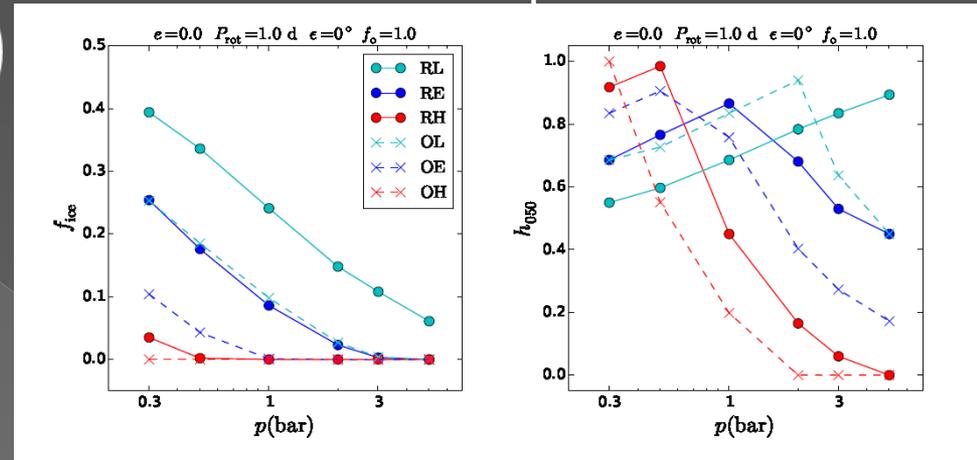


An application: K452b

- Planetary mass unknown
- Probability of being rocky: 49% to 62% (Jenkins+ 2015)
- Radius = $1.63R_{\text{Earth}}$
- $L_* = 1.21L_{\odot}$, $M_* = 1.035M_{\odot}$ insolation \odot 10% higher \odot than Earth
- $P_{\text{orb}} = 384.8\text{d}$
- Validated vs Hu+ 2017 (GCM)

Silva+ 2017b

Effect of pressure



Model	M/M_{\oplus}	g/g_{\oplus}	$p\text{CO}_2$ (ppmv)	p^b (bar)	e	P_{rot} (d)	ϵ ($^{\circ}$)	f_o	Comment
RL	4.3	1.6	10	2.6	0.0	1.0	0	1.0	Rocky, low CO_2
RE	4.3	1.6	380	2.6	0.0	1.0	0	1.0	Rocky, Earth-like CO_2
RH	4.3	1.6	38000	2.6	0.0	1.0	0	1.0	Rocky, high CO_2
OL	2.7	1.0	10	1.0	0.0	1.0	0	1.0	Rocky/water, low CO_2
OE	2.7	1.0	380	1.0	0.0	1.0	0	1.0	Rocky/water, Earth-like CO_2
OH	2.7	1.0	38000	1.0	0.0	1.0	0	1.0	Rocky/water, high CO_2

^a For each model the surface pressure, orbital eccentricity, rotation period, axis tilt and ocean fraction have been varied in the intervals: $0.3 \leq p(\text{bar}) \leq 5$, $0 \leq e \leq 0.5$, $0.5 \leq P_{\text{rot}}(\text{d}) \leq 2.0$, $0^{\circ} \leq \epsilon \leq 45^{\circ}$, and $0.1 \leq f_o \leq 1$, respectively.

These parameters are varied only one at a time in each series of simulations, fixing the others to the reference values listed in the table.

^b Educated guess of surface atmospheric pressure obtained from Eq. (3).

ARTECS

<http://wwwuser.oats.inaf.it/exobio/climates/index.html>

- Archive of **terrestrial-type climate simulations**
- Database currently containing about 22,000 runs
- We will expand it to 200,000 in December
- Plan to run **40,000,000** parameter sets exploring a 9-dimensional parameter space (Semi-Major Axis, Pressure, Eccentricity, Obliquity, CO₂, Geography, Rotation Period, Radius, Surface gravity). About 7,000,000 core hours @ bastet
- **Database realized by IA2 @ OATS:
main authors: Cristina Knapic, Elisa Londero, Sonia Zorba**

DATABASE DEGLI ESOPIANETI

[Explanation page](#)

Stellar parameters

Solar masses
 Luminosity
 Semi-major axis From To
 Eccentricity From To
 Argument of pericenter

Planet astrophysical parameters

	Min	Max
<input type="checkbox"/> Planet radius	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Planet rotation period	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Obliquity of rotation axis	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Surface gravity	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Results of the simulation

<input type="checkbox"/> Mean temperature	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mean albedo	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mean cloud coverage	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Liquid-water habitability	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Complex life habitability	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Continuous habitability	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> No. of orbits before convergence	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mean ice coverage	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Equator-pole temperature difference	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mean OLR	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Mean ADR	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Planet geophysical parameters

	Min	Max
<input type="checkbox"/> Planet geophygy	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Cloud fraction of coasts	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Pressure	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> O ₂ Partial pressure	<input type="text" value="308480.0"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> O ₂ Partial pressure	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> H ₂ Partial pressure	<input type="text" value="180340.0"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> O ₂ partial pressure	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> CH ₄ partial pressure	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Relative humidity	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text"/>

Model parameters

% of latitude zones
 % of substeps per orbit
 Cloud name
File name

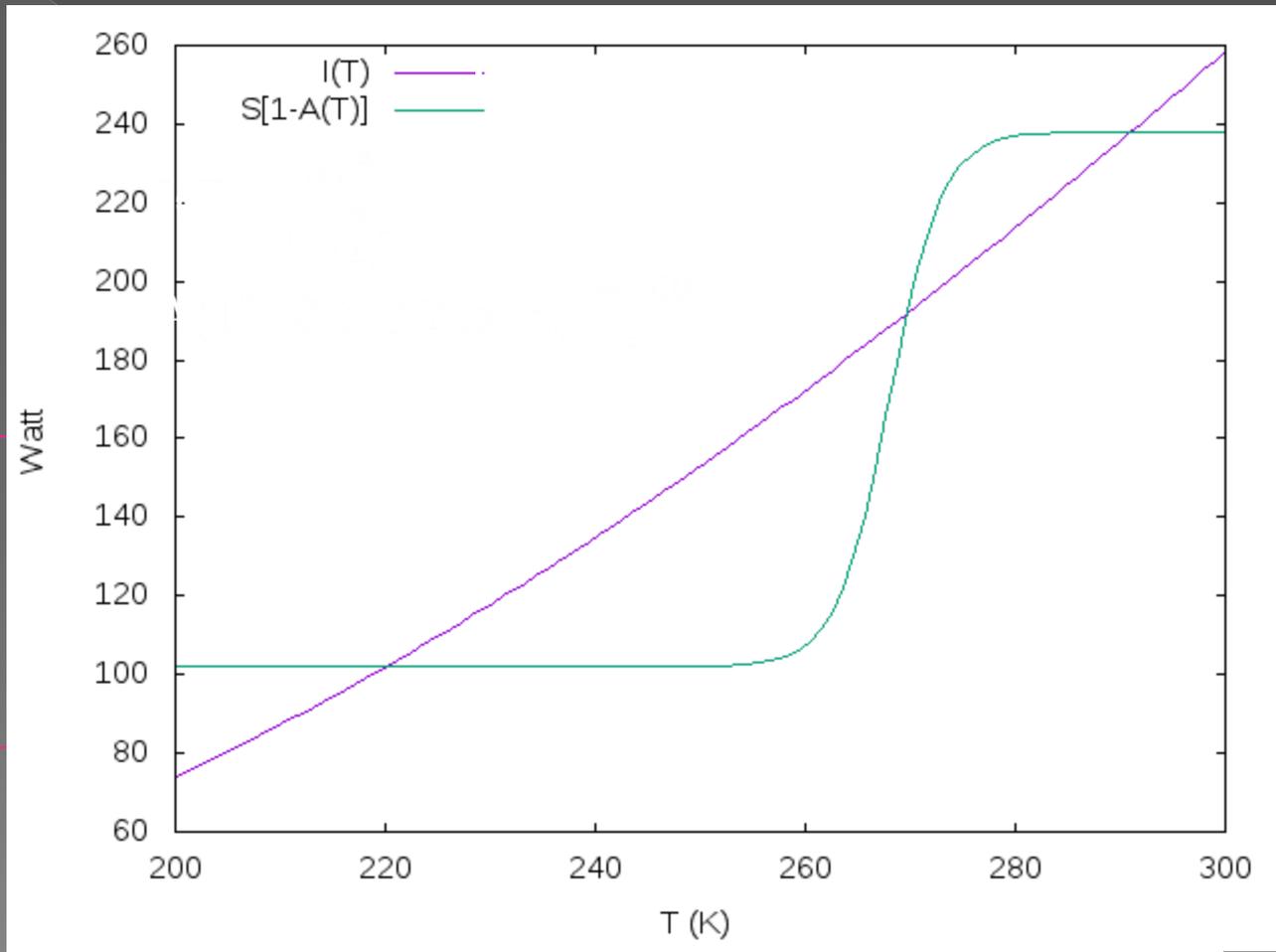
Items displayed:

12 of results: 0

Use: characterization of exo-planet climate classes

Warm

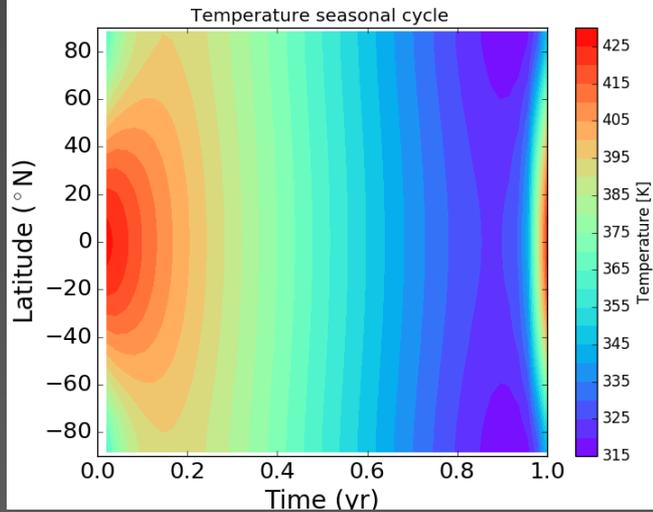
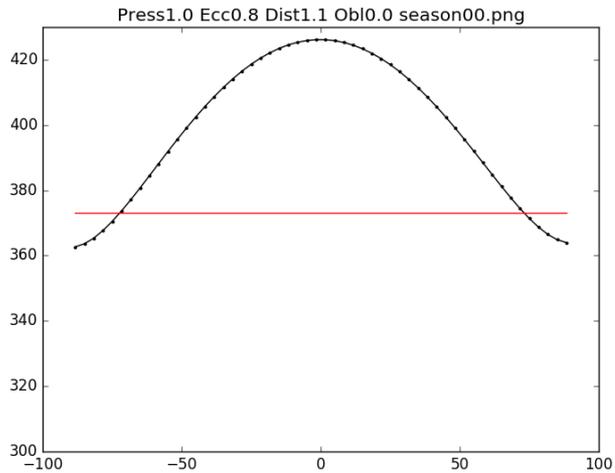
Snowball



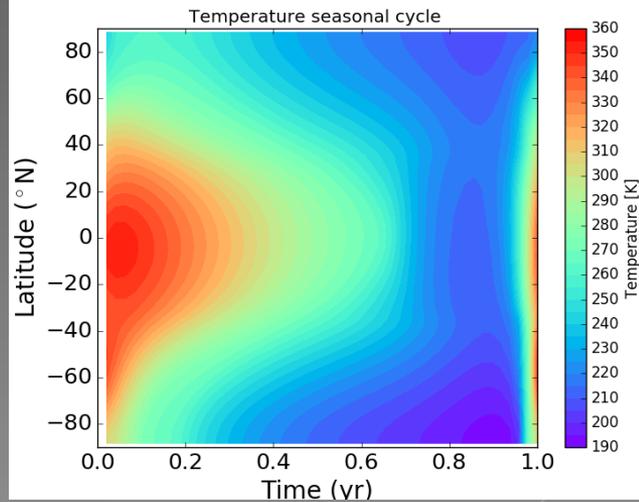
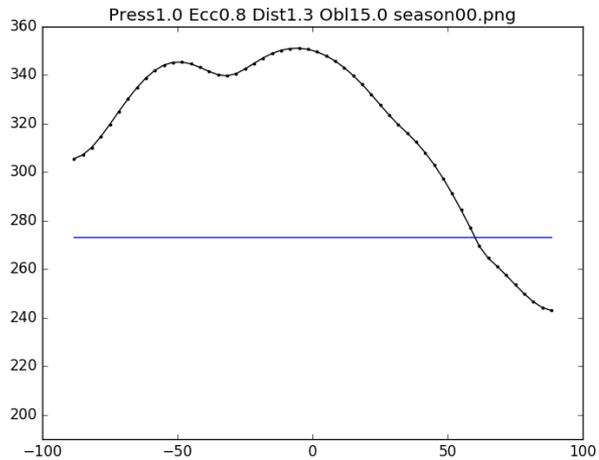
habitable!

erbelt!

HOT



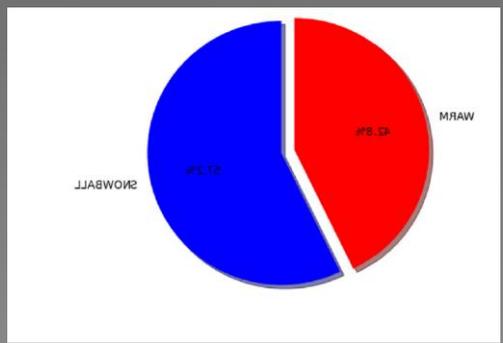
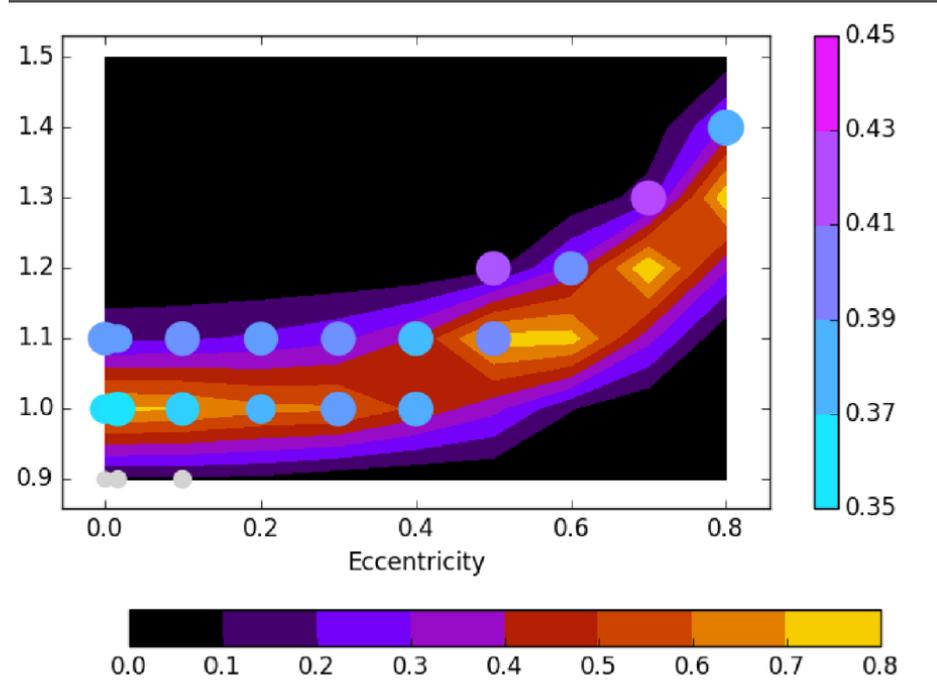
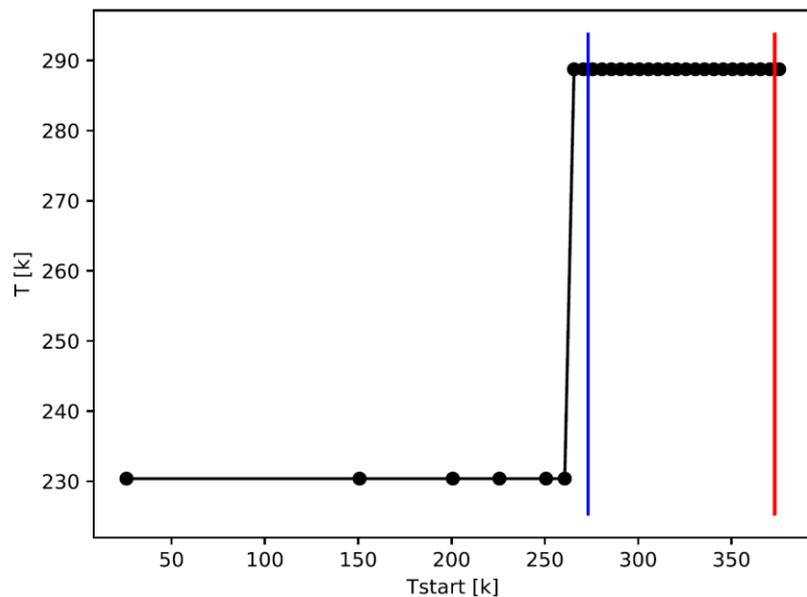
WATERBELT



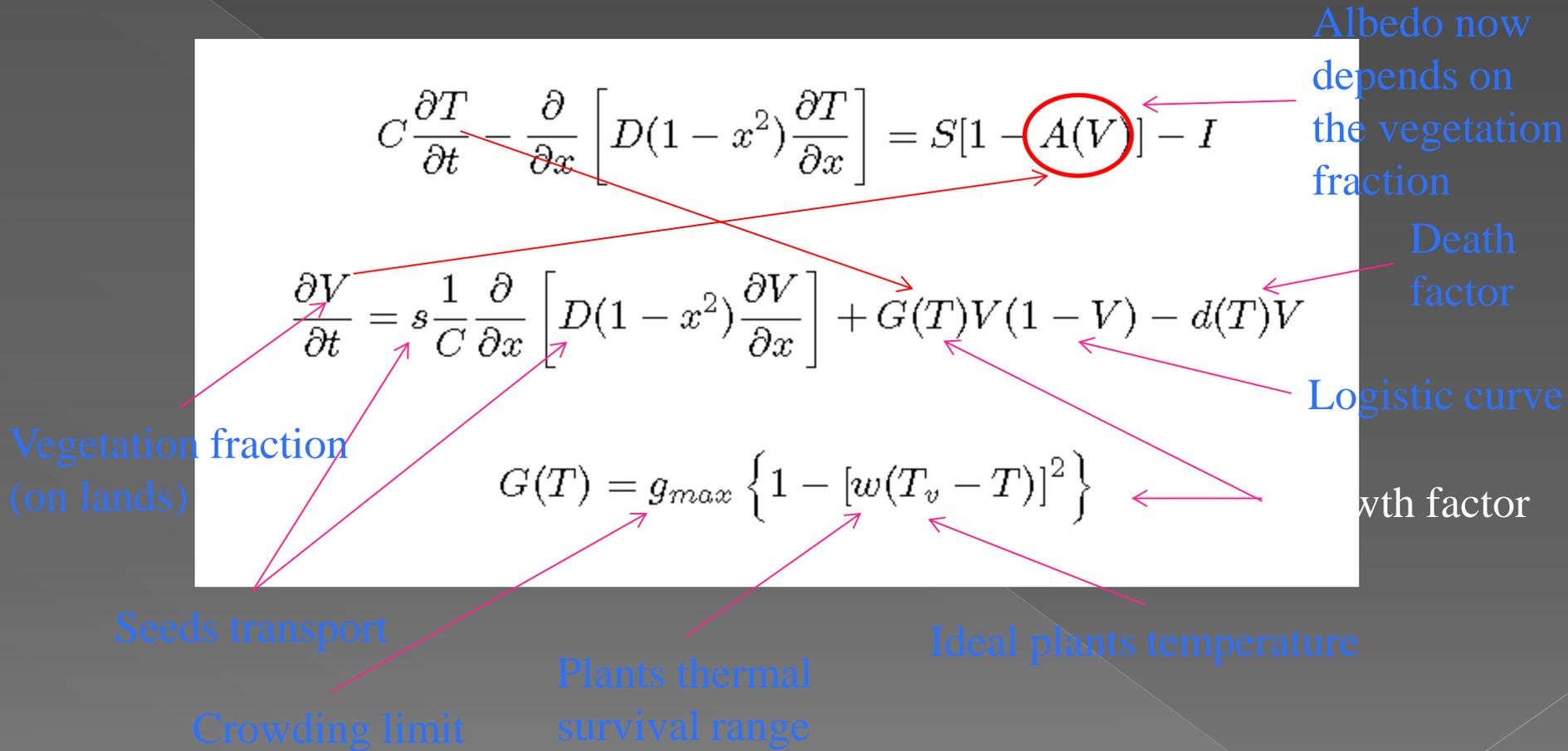
BISTABILITÀ

Climate bistability on Earth-like exoplanets

Murante, Provenzale, Vladilo, Taffoni, Silva, Palazzi, Hardenberg, Maris, Londero, Knapic & Zorba 2019



Vegetation coupling



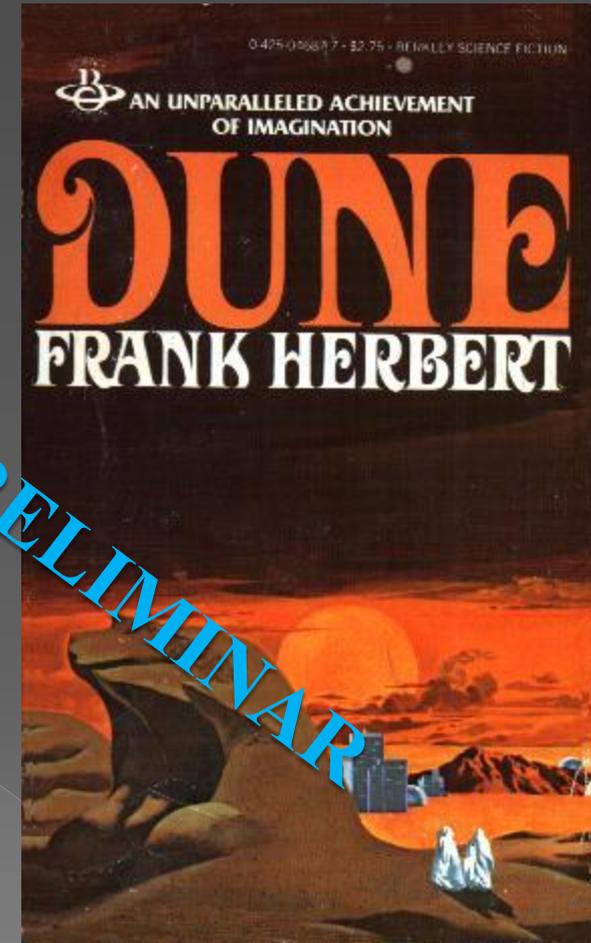
Vegetation albedo is different from continents albedo (lower – but can also favour clouds covering, i.e. higher albedo): **VEGETATION ALBEDO FEEDBACK**

DUNE and the GAIA hypothesis

- Dune: desert, water-limited world
- Climate-vegetation dynamics studied in literature (Baudena+ 2008, Aleina+ 2012)

Drought in the Sahara: A Biogeophysical Feedback Mechanism

Abstract. Two integrations of a global general circulation model, differing only in the prescribed surface albedo in the Sahara, show that an increase in albedo resulting from a decrease in plant cover causes a decrease in rainfall. Thus any tendency for plant cover to decrease would be reinforced by a decrease in rainfall, and could initiate or perpetuate a drought.



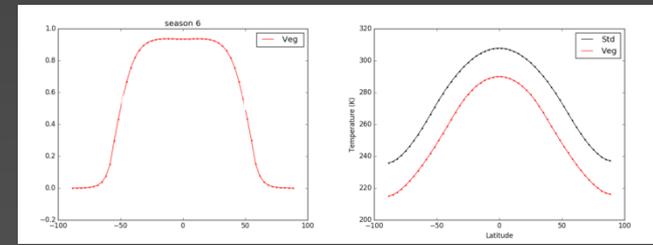
DUNE with ESTM

- Obliquity=0, ocean fraction=0, SMA=1.048, R=1.63, stellar luminosity=1.1, P=3 bar, soil albedo=0.35, vegetation albedo=0.15

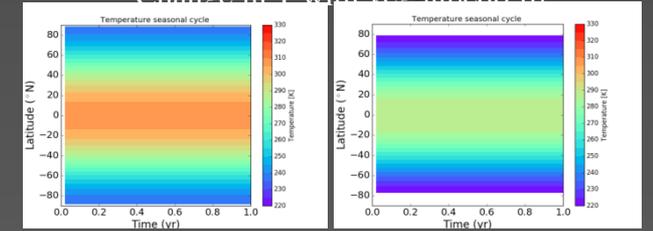
- Run with and without vegetation-albedo feedback

- Biosphere can and will change the climate, thus the habitable zone!**

PRELIMINAR

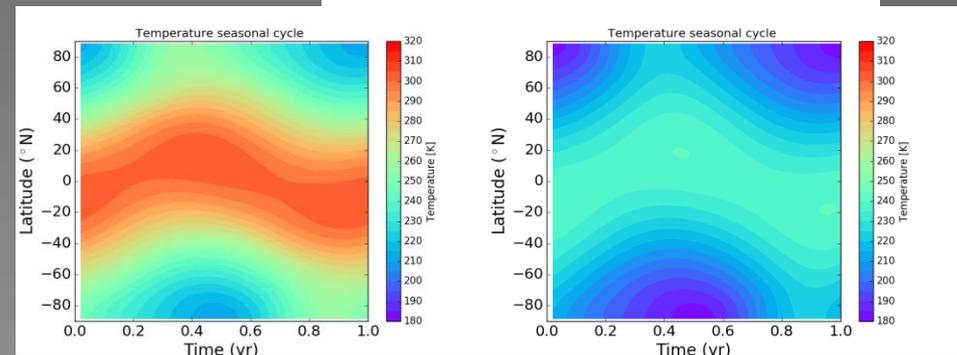
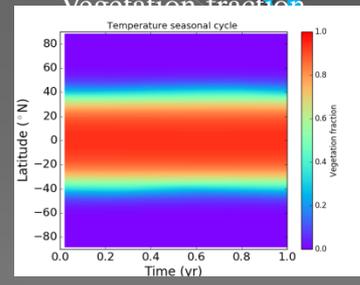
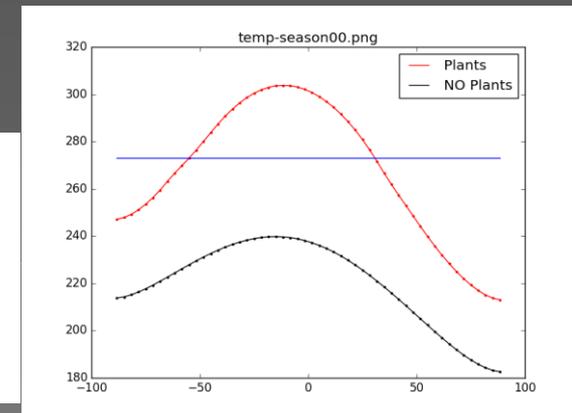


Change in T with veg-albedo fb



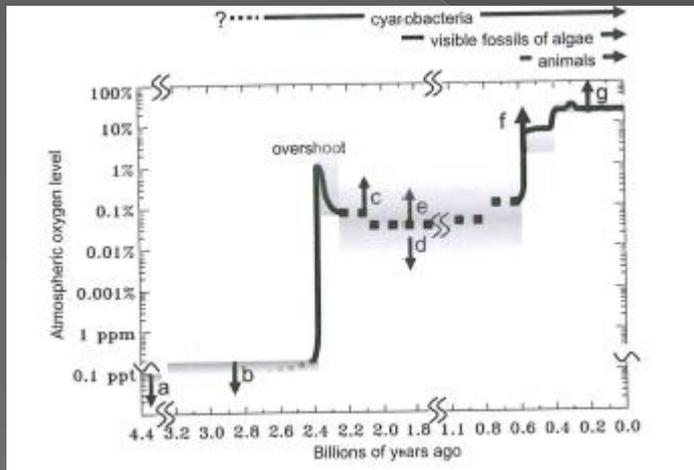
plants

NO plants

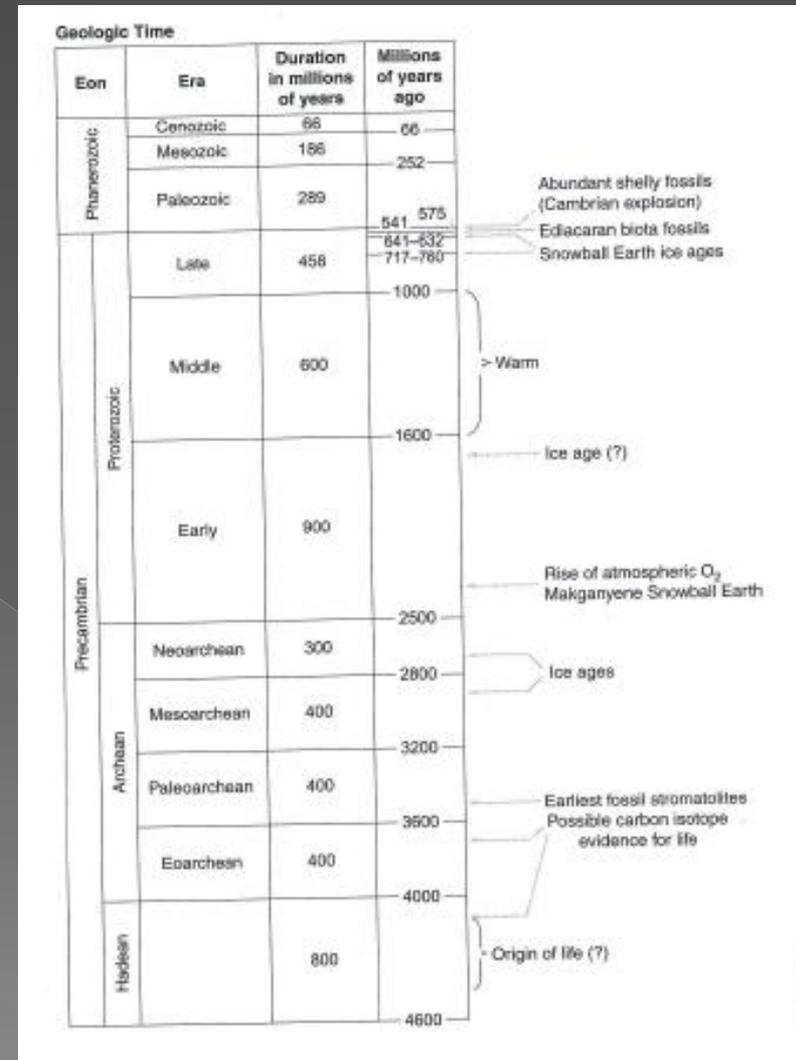


Paleo-climates

- ESTM can also be used to study paleo-Earth climates
- Recent and remote ice ages – The Great Oxidation Event



- Faint Young Sun problem
- Carbonate-Silicate geological cycle and the exit from a Snowball Earth episode



(figures from Catling&Kasting, 2017, "Atmospheric evolution on inhabited and lifeless worlds")

Limits of ESTM



(This is Far Oer. Note, no trees. There are a few in places protected from the winds. On a tidally locked planets we expect latitudinal winds at thousands of kmh... Definitely not a good place for a holiday)

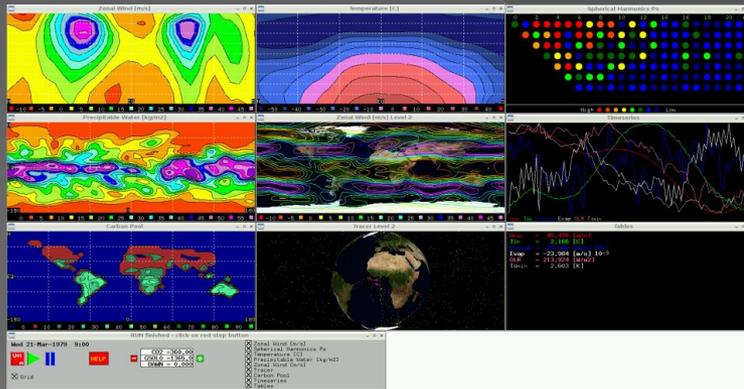
Also: these stars have violent UV flares, planets experience stellar wind pressures 10^3 - 10^5 times the Earth...
See e.g. Garraffo+ 2017 arXiv:1706.04617

- Approximate
- Can't treat obliquities larger than 45 degrees
- Can't deal with tidally locked worlds
- Can't deal with slowly rotating planets
- Thermal capacity confusion
- NO oceanic heat transport
- Validated only using Earth data
- Earth-like atmosphere (we are dealing with this!)

Beyond ESTM : PLASIM

- Intermediate complexity model
- Simplified atmosphere, ocean, land
- Configurable geography
- 3D
- Fast (not as fast as ESTM...)

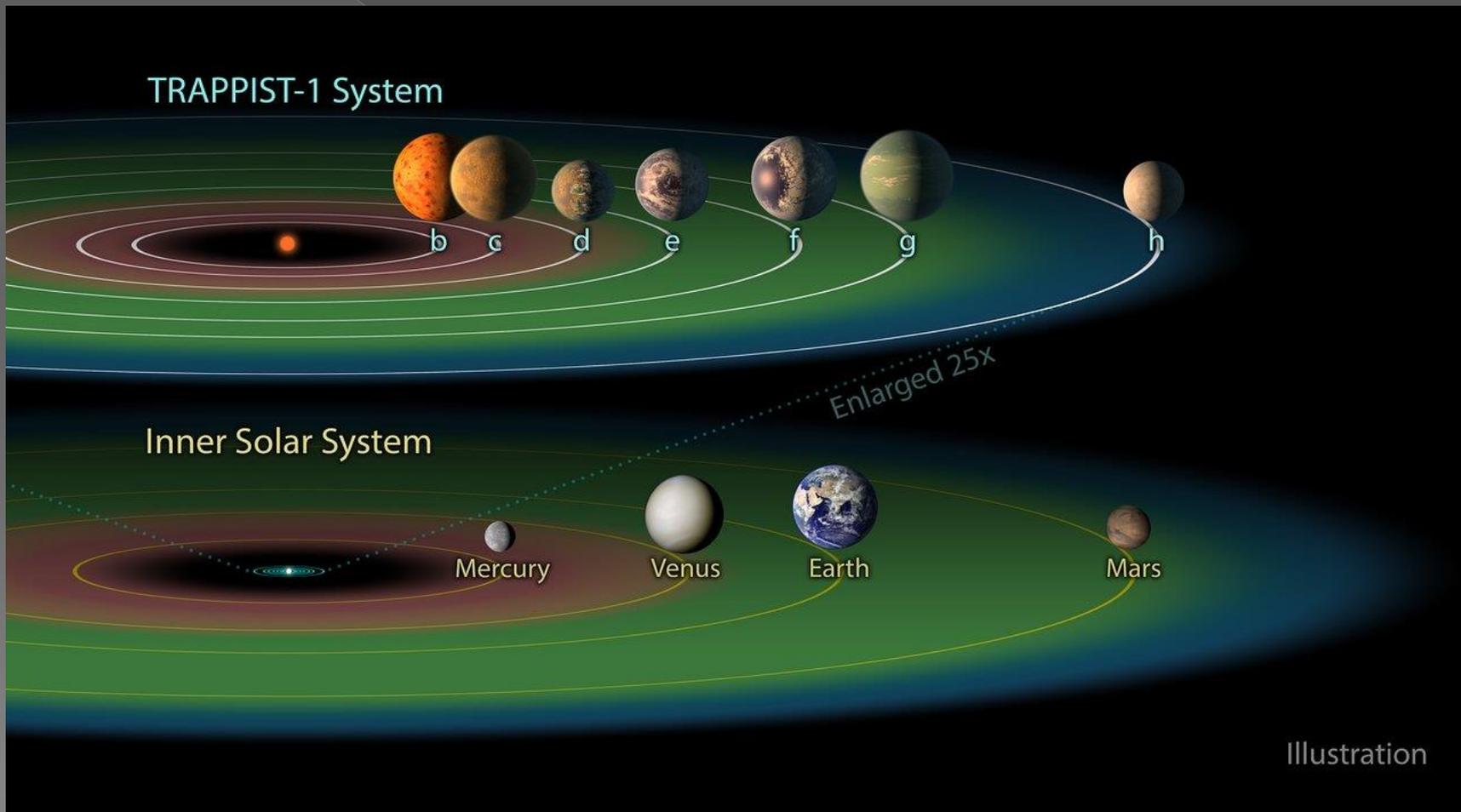
(in collaboration with
CNR-ISAC and CNR-IGG)



Name	Value
KICK	1
NPSTEP	45
NDIAG	0
NGSPEC	1
NPFD	1
NPRINT	0
CO2	360.0
DRAWN	0.0
GSOLO	1365.0

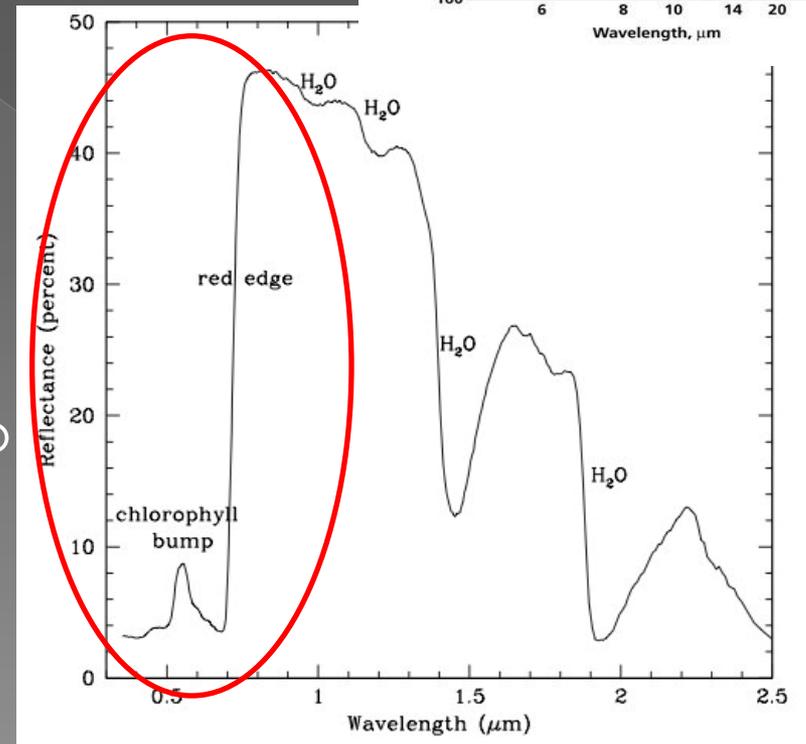
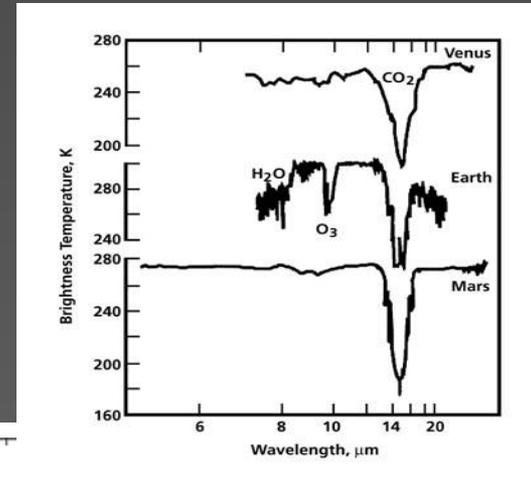
- Validation of ESTM in non-Earth cases
- Tidally locked / strong obliquity planets
- We are cleaning the code! (currently Earth/Mars simulator ©)
- Cascade of increasing complexity models?

Trappist-1



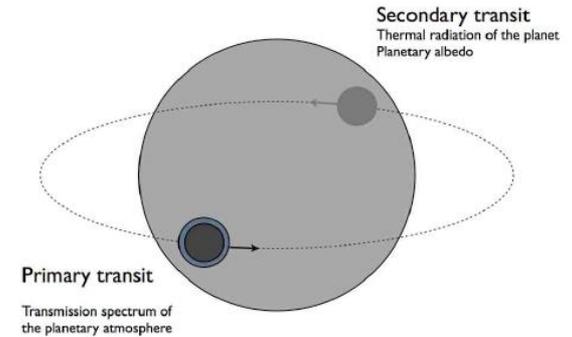
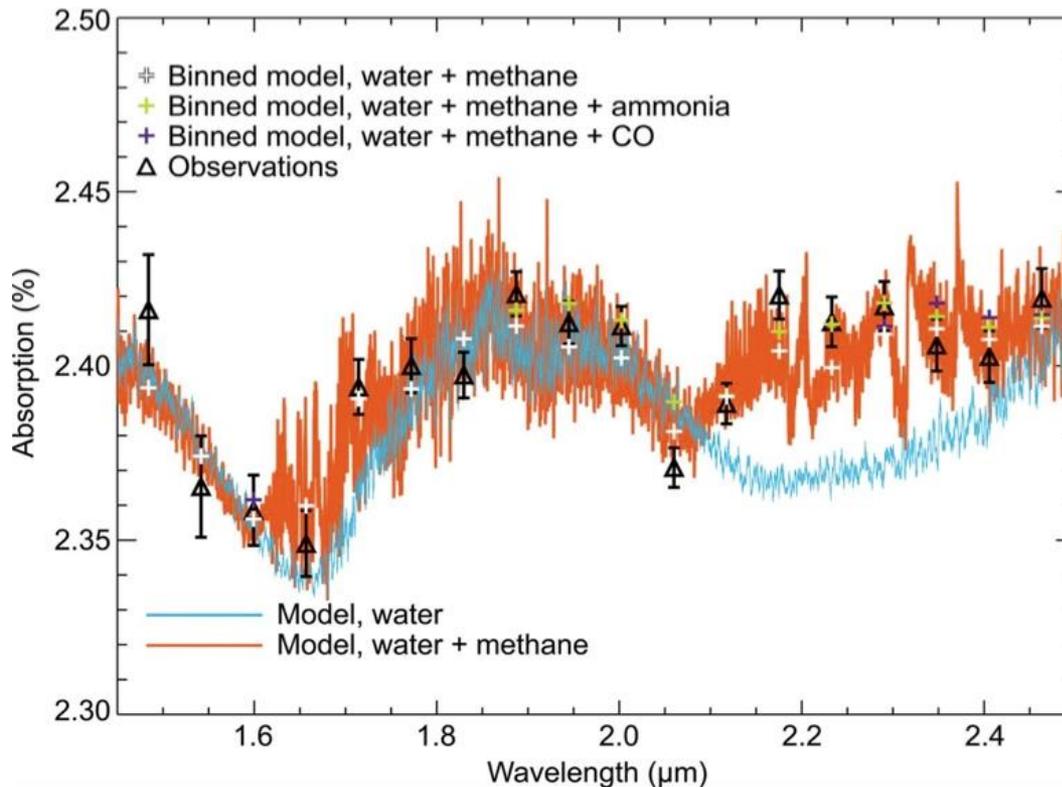
Rivelare la vita sugli esopianeti

- **Biomarcatori** negli *spettri* delle atmosfere planetarie
- ..specie fuori equilibrio chimico
- Si spera in futuro di poter rivelare evidenze dirette di attività biologica o quantomeno capire se le proprietà dell'atmosfera planetaria siano favorevoli alla vita oppure no
- Nella banda infrarossa, dove si spera di riuscire a risolvere lo spettro planetario da quello stellare, cadono righe spettrali di diversi biomarcatori



... è già una realtà!

- ▶ Prima osservazione dell'atmosfera di un pianeta (gigante gassoso)
 - ▶ Scoperta di acqua e metano
 - ▶ Giovanna Tinetti et al. (2007)



Potenziali tipi di habitat nell'Universo

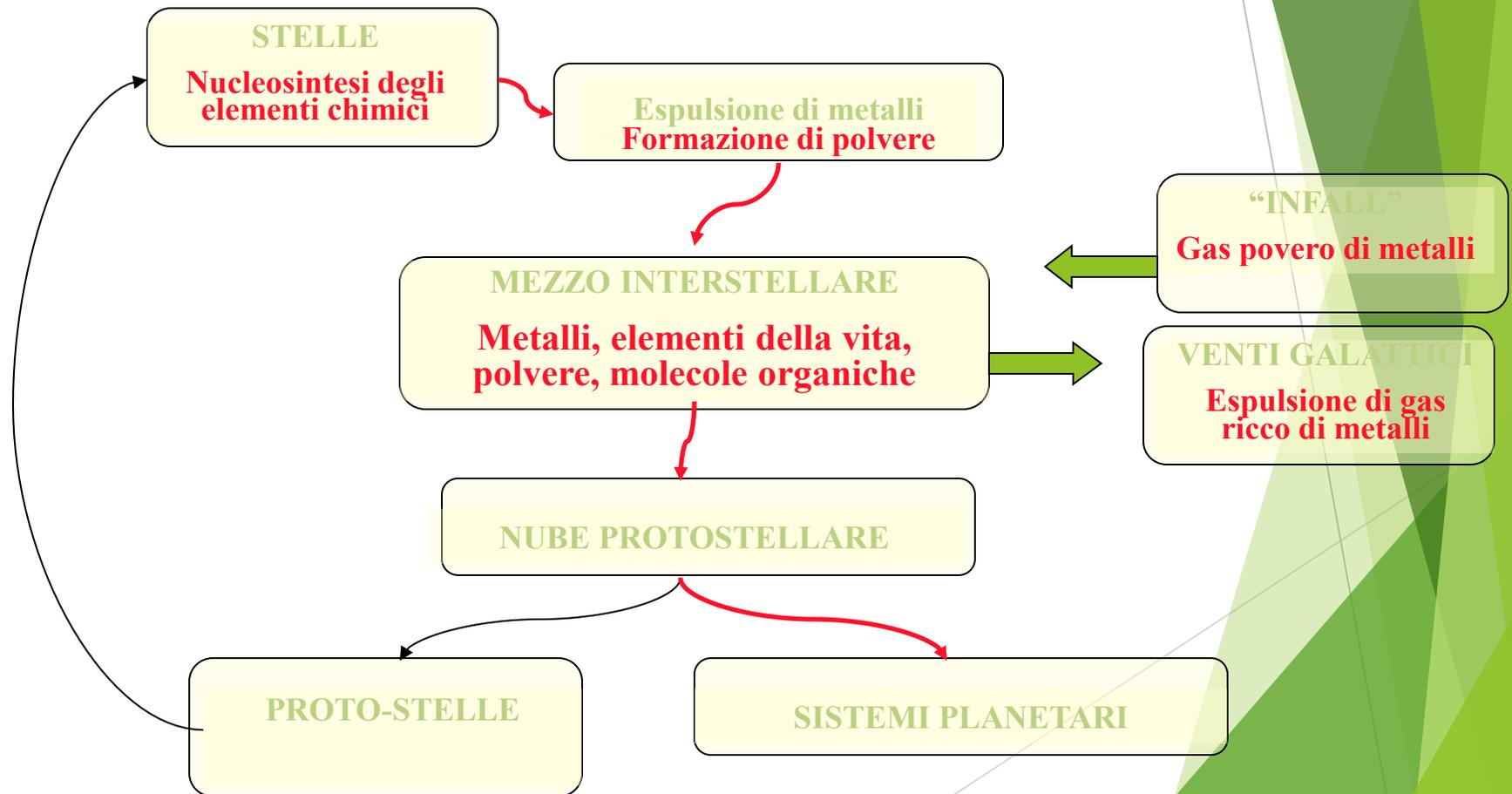
▶ Zona abitabile nell'Universo

- ▶ Ambiente astronomico capace di ospitare forme di vita
 - ▶ Concetto in via di definizione attualmente utilizzato con diversi significati in diversi ambiti di studio
 - ▶ La definizione di vita è essenziale per definire il concetto di abitabilità
 - ▶ In mancanza di una definizione chiara di vita, gli studi attuali di abitabilità prendono principalmente in considerazione la vita di tipo terrestre

▶ Abitabilità per vita di tipo terrestre

- ▶ Principali **ingredienti/condizioni** necessarie
 - ▶ Disponibilità di elementi biogenici (H, C, N, O , ...)
 - ▶ Possibilità di esistenza di acqua allo stato liquido
 - ▶ Disponibilità di fonti di energia adeguate a sostenere la vita
- ▶ Esistenza di un ambiente fisico adeguato
 - ▶ Pianeti o satelliti con condizioni climatiche adatte
 - ▶ Ambiente interplanetario/interstellare con condizioni fisiche non ostili

Evoluzione chimica delle galassie e astrobiologia



Zona abitabile Galattica

- ▶ Criteri di abitabilità attualmente considerati
 - ▶ Presenza di elementi chimici
 - ▶ Esplosioni di supernove
- ▶ Nelle prime fasi di formazione della Galassia non c'erano abbastanza metalli per poter formare pianeti tipo Terra, meno che nelle regioni centrali della Galassia, dove però il tasso di esplosioni di supernove era troppo alto (figura in basso in rosso)
- ▶ Col passar del tempo i metalli si formano nelle regioni più esterne della Galassia creando condizioni di abitabilità in regioni con poche esplosioni di supernove (figura in alto in verde)

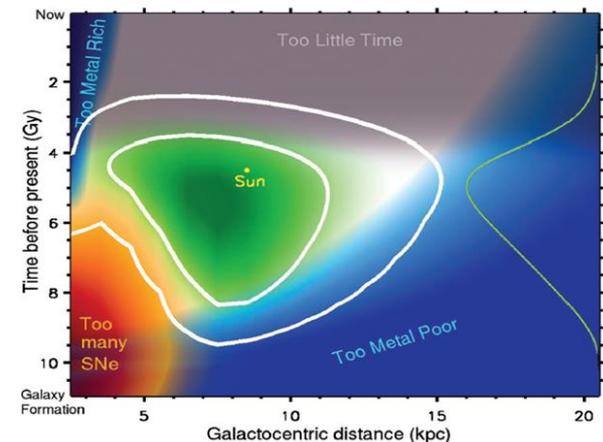
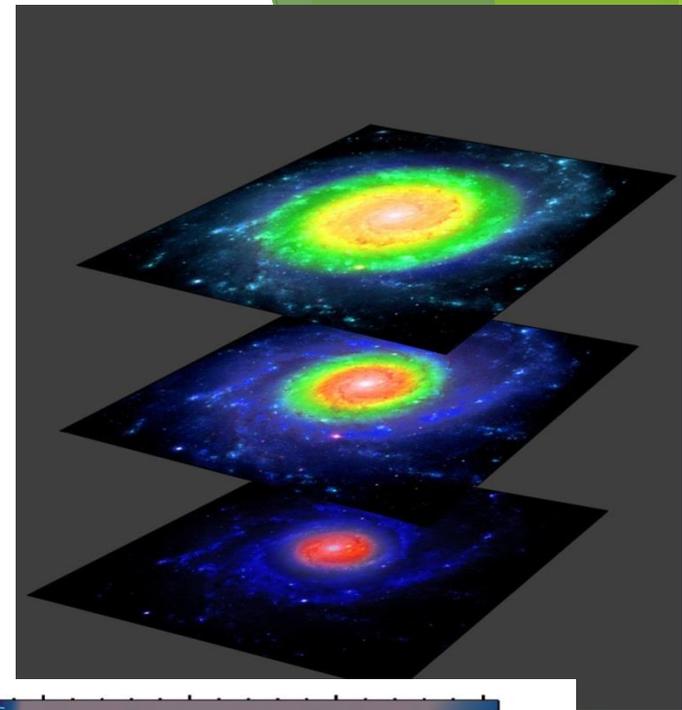


Fig. 3. The GHZ in the disk of the Milky Way based on the star formation rate, metallicity (blue), sufficient time for evolution (gray), and freedom from life-extinguishing supernova explosions (red). The white contours encompass 68% (inner) and 95% (outer) of the origins of stars with the highest potential to be harboring complex life today. The green line on the right is the age distribution of complex life and is obtained by integrating $P_{GHZ}(r, t)$ over r .

Gonzalez et al. 2001, *Icarus*, 152, 185

Lineweaver et al. 2004, *Science* 303, 59

Spitoni, Matteucci (UniTS), on Andromeda, submitted

L'equazione di Drake

Probabilità di sopravvivere ad eventi astrofisici catastrofici

$$N = R^* \cdot f_p \cdot N_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

Numero di
civilta'
extraterrestri

Formazione
stellare

Frazione
di stelle
con pianeti

Numero di
pianeti
abitabili per
stella

Probabilità di avere
pianeti abitabili

...con vita
intelligente

Frazione
di pianeti
abitati

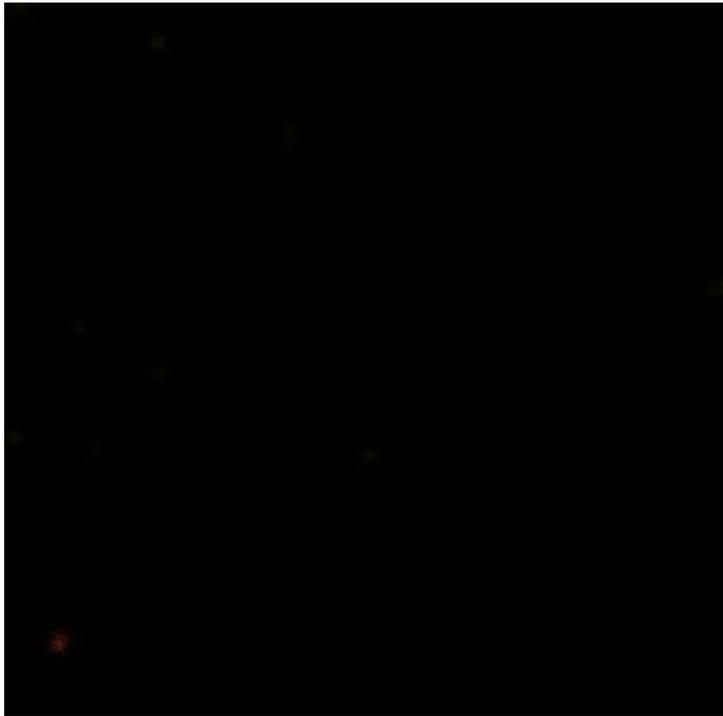
Probabilità di evoluzione

...capace di
comunicare

Durata della
civilta'

Mappe di abitabilità galattica ottenute da simulazioni di galassie

- ▶ G. Murante (INAF-To), P. Monaco & L. Tornatore (Univ.Ts), G. Vladilo (INAF-Ts)

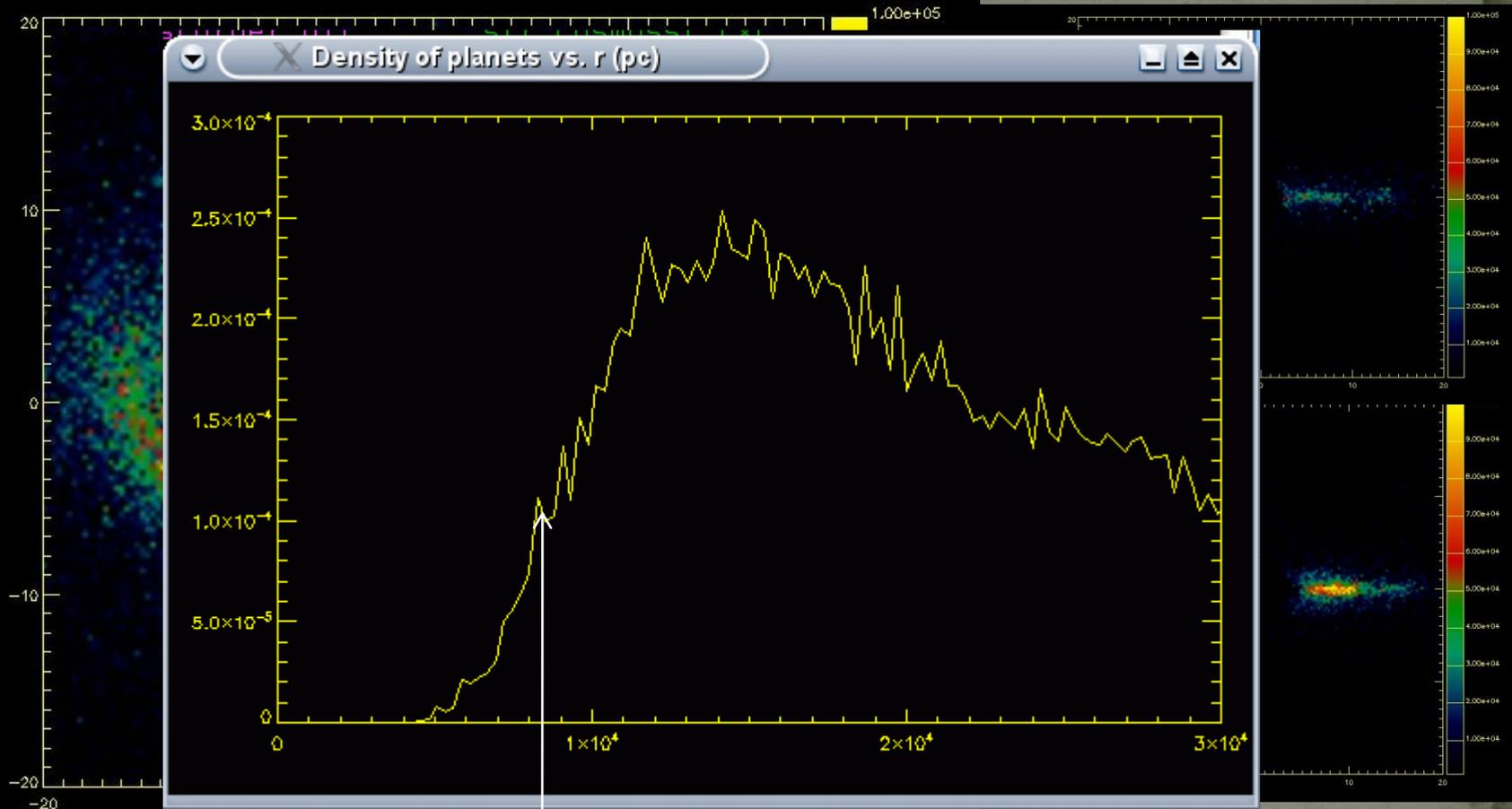


Rendering di una
nostra simulazione
numerica



Numero di pianeti nel disco galattico

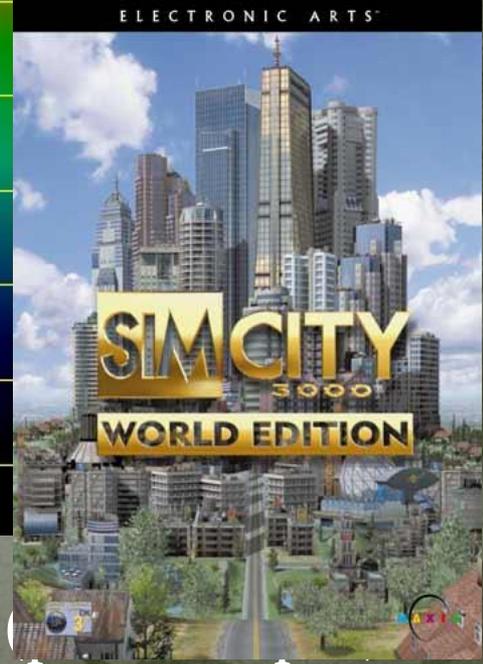
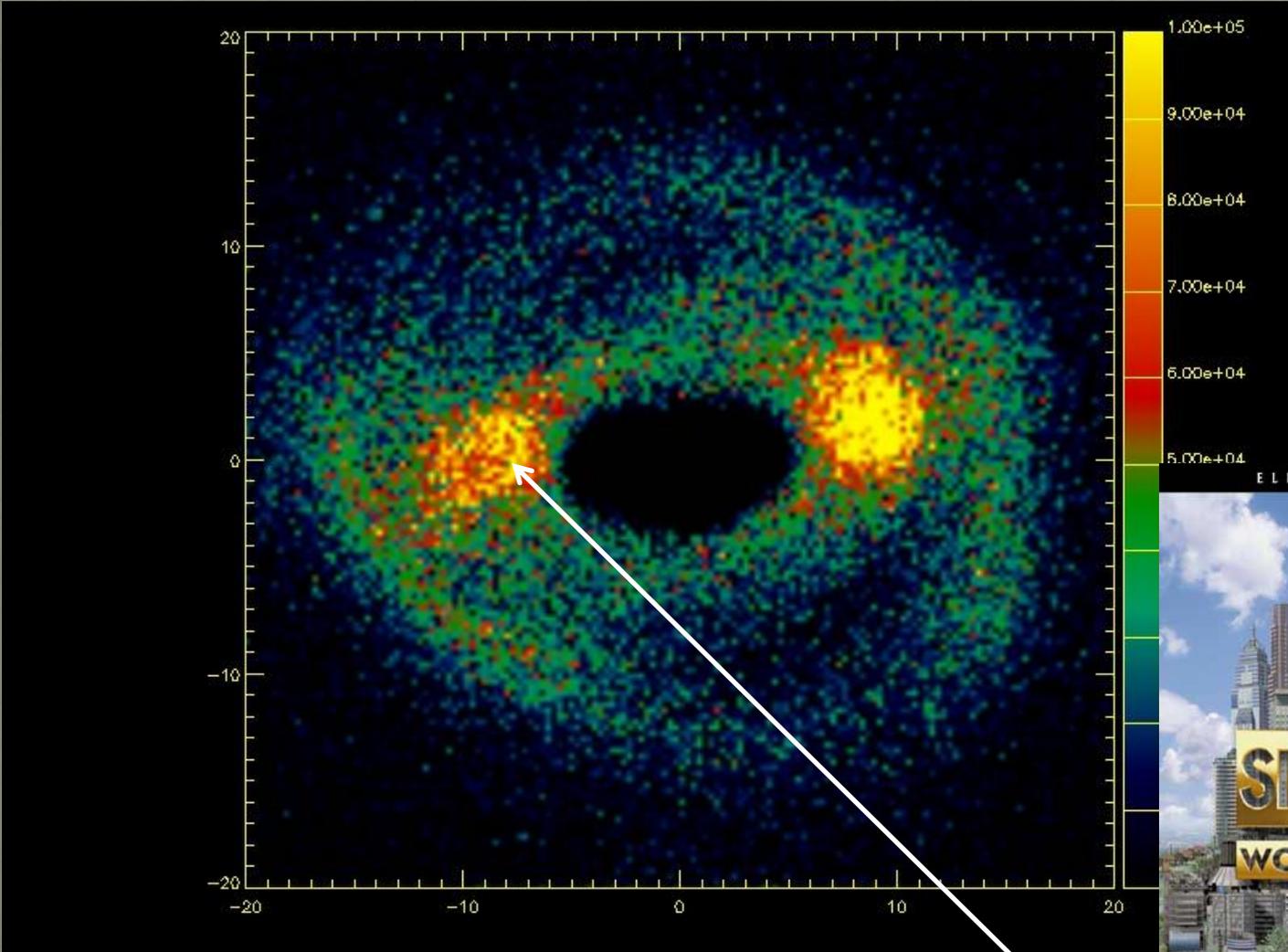
$$(P_{\text{steril}} * P_{\text{age}} * N_{\text{planets}})$$



0.0001 pianeti con vita complessa per pc^2 in questa mappa, alla posizione del sole

~1 entro 100 pc!

Bene, ma..

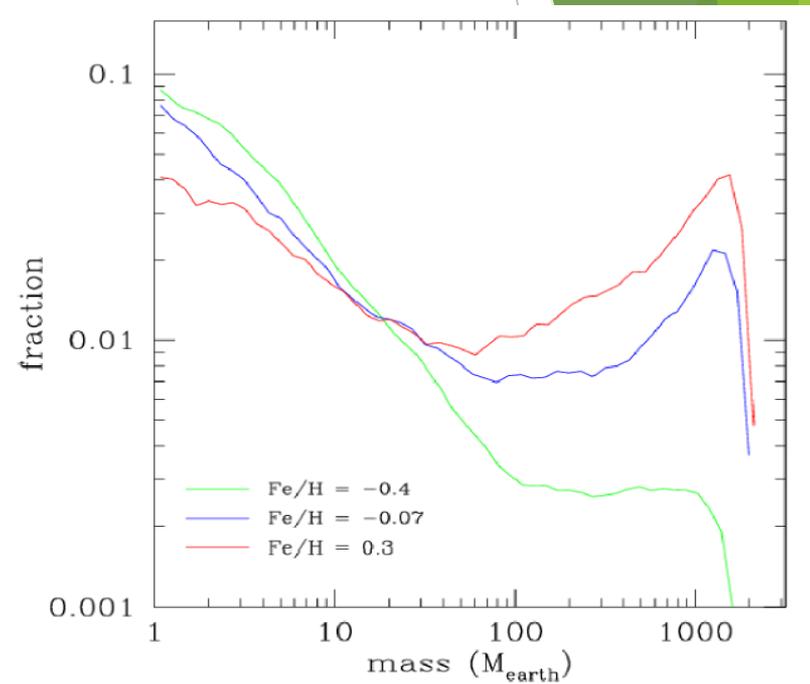


VOI SIETE QUI

Critiche recenti al concetto di zona abitabile Galattica

- ▶ A basse metallicità potrebbe diminuire la percentuale di pianeti massicci tipo Giove (quelli trovati finora), ma potrebbe aumentare la percentuale di pianeti di tipo terrestre
 - ▶ Le osservazioni di pianeti di tipo terrestre saranno fondamentali anche per chiarire quest'aspetto
- ▶ Si critica anche la definizione di abitabilità basata sul tasso di esplosione di supernove
- ▶ Chiaramente c'è ancora strada da fare nella definizione di abitabilità: serve una definizione chiara

Prantzos et al. 2006, astro-ph/0612316



Search for ExtraTerrestrial Intelligence

- ▶ Iniziato nel 1960 da F. Drake (Ozma) a Green Bank, puntando Tau Ceti ed Epsilon Eridani
- ▶ Proseguito da NASA e sovietici, ora basato su contributi privati
- ▶ Osservazioni radio di stelle simili al sole, anche con radiotelescopi in «pausa»
- ▶ 1974 Arecibo: Drake manda un nostro segnale!
- ▶ SETI@home
- ▶ Allen Telescope Array (350 antenne), nord California
- ▶ CATS: Characterizing Atmospheres TecnoSignatures

