

Capitolo 2 Ambienti abitabili

1. Abitabilità sulla Terra
2. Abitabilità nell'Universo

Condizioni di abitabilità sulla Terra

- **Abitabilità**
 - Capacità di sostenimento di forme di vita da parte di un determinato ambiente
 - La definizione di abitabilità è strettamente legata alla definizione di vita
- **Abitabilità terrestre**
 - Punto di riferimento per lo studio di abitabilità in altri ambienti astronomici
- **I fattori che determinano l'abitabilità sono svariati**

Qui esaminiamo i seguenti aspetti

- Limiti estremi delle condizioni fisico/chimiche che consentono la presenza di forme di vita sulla Terra
- Presenza di fonti di energia
- Protezione da radiazioni ionizzanti

Abitabilità terrestre: limiti estremi fisico/chimici

Organismi estremofili

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

3

Tipi di habitat terrestri

- **Progressiva estensione dei limiti della biosfera terrestre**
 - Gli studi di microbiologia hanno dimostrato l'esistenza di ecosistemi in ambienti terrestri che in precedenza si ritenevano inabitabili
- **Le condizioni fisiche di tali ambienti sono estreme rispetto a quelle in cui vivono gli organismi complessi nella parte più accessibile della biosfera**
 - I microrganismi che popolano tali ecosistemi vengono chiamati estremofili

Gli organismi estremofili sono importanti in astrobiologia

Indicano che la vita può esistere anche in condizioni ambientali estreme, quali quelle presenti in altri pianeti o satelliti del Sistema Solare, nei pianeti extrasolari o in altre regioni dell'Universo

Ci danno indicazioni sull'origine stessa della vita, in quanto alcuni organismi estremofili sembrano essere tra i più antichi organismi viventi sulla Terra dal punto di vista evolutivo

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

4

Organismi estremofili

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

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

5

Alte temperature

- **Organismi termofili**
 - Crescita ottimale a circa 40 °C o a temperature maggiori
- **Organismi ipertermofili**
 - Crescita ottimale a circa 80°C o a temperature maggiori
- **Esempi**
 - Geisers o fumarole in superficie
 - Parco di Yellowstone
 - Bacterial mats
 - Condizioni estreme non solo per quanto riguarda la temperatura, ma anche l'acidità
 - Sorgenti vulcaniche sottomarine
 - “hydrothermal vents”

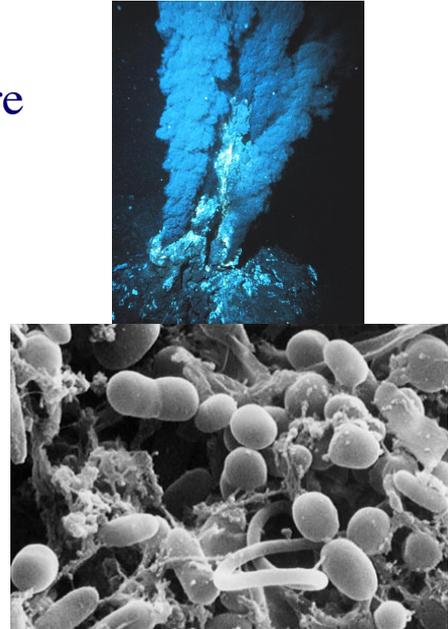


Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

6

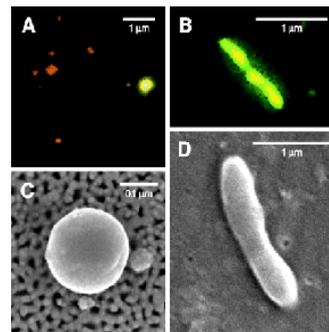
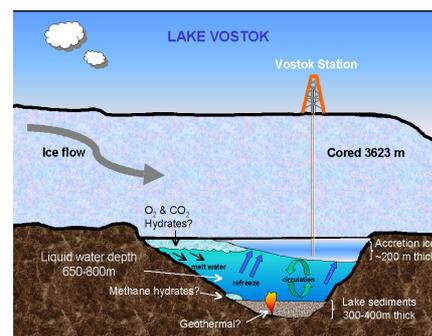
Alte temperature

- **Sorgenti vulcaniche sottomarine**
 - “hydrothermal vents”
 - Temperature maggiori di 370 °C
 - Pressioni tra 70 e 300 bar
 - Ecosistema senza luce solare che trae la sua energia da reazioni di ossido-riduzione
 - Archeobatteri chemiosintetici
 - Ecosistemi scoperti nel 1977 nei fondali vicini alle isole Galapagos; trovati poi in altri siti
- **Importanza degli organismi termofili negli studi di astrobiologia**
 - Gli studi di biologia molecolare indicano che sono tra gli organismi meno evoluti
 - Tra le specie conosciute sono tra le più prossime all’origine della vita



Basse temperature

- **Organismi psicrofili**
 - Crescita ottimale a circa 15 °C o temperature più basse
 - Trovati anche organismi nella profondità di ghiacciai
- **Ambienti ghiacciati**
 - Antartide
 - Scoperti circa 100 laghi subglaciali
 - Lago Vostok
 - Bassissime temperature, alte pressioni, assenza di energia solare, isolamento dal resto della biosfera
 - Batteri estratti a più di 3 km di profondità con età di circa 400 mila anni sono stati riattivati in laboratorio
- **Laboratorio ideale per studi di astrobiologia**
 - Messa a punto di tecniche per
 - Prevenire la contaminazione biologica di ambienti isolati
 - Ricerche di vita in ambienti ghiacciati nel Sistema Solare
 - Satellite di Giove Europa



Acidità e Salinità

- **Alofili**

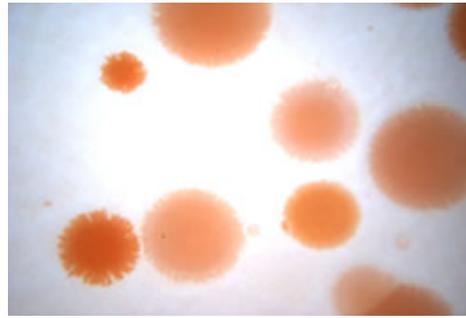
- Ambienti salini

- Concentrazioni saline, fino a ~25%

- Mar Morto

- Gran Lago Salato (Utah)

- Condizioni estreme di salinità e di esposizione a radiazione UV

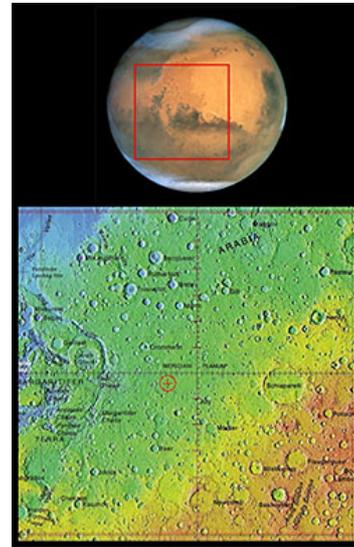


- **Importanza in astrobiologia**

- Esempio

- Esiste una zona pianeggiante di Marte con caratteristiche di un ex lago salato

- Meridiani Planum



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

9

Abitabilità terrestre: fonti di energia

- **L'esistenza di fonti di energia è un requisito essenziale di qualsiasi ambiente abitabile.**

- Posto che gli organismi eterotrofi acquisiscono la loro energia dall'assimilazione degli autotrofi, possiamo affermare che un ambiente abitabile deve essere in grado di provvedere al sostentamento energetico di organismi autotrofi

- Diversamente non esisterebbe alcuna forma di vita.

- **Gli organismi autotrofi terrestri acquisiscono l'energia in due modi:**

- mediante reazioni chimiche di ossido-riduzione
 - mediante fotosintesi

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

10

Reazioni di ossido-riduzione come fonti di energia per la vita

- **Ne esistono tanti tipi**
 - Adattati all'abbondanza e disponibilità di elementi chimici nell'ambiente
- **Alcuni esempi**
 - **Metanogenesi**
 - È un esempio di reazione di ossido-riduzione in cui viene ossidato idrogeno e ridotta anidride carbonica; schema di reazione:
$$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$$
 - Utilizzata da organismi autotrofi nelle bocche vulcaniche sottomarine ("hydrothermal vents")
 - Fornisce energia, fissa il carbonio rendendolo disponibile per ulteriore sintesi di molecole organiche
 - **Metabolismo basato sullo zolfo**
 - Probabilmente molto antico
 - Esempi di microrganismi che lo usano:
Thiobacillus thiooxidans, Sulfolobus acidocaldarius
 - Esempio di ossidazione del solfuro di idrogeno
$$6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O} + 12\text{S} + \text{energia}$$
 - Ecosistema in grotte sulfuree

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

11

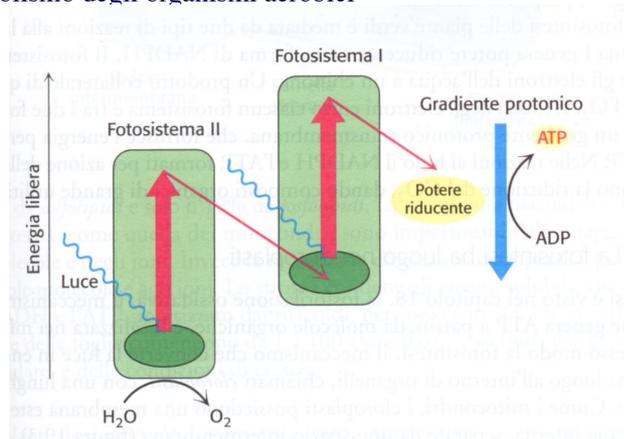
La fotosintesi come fonte di energia

Lo schema di reazione di base della fotosintesi è apparentemente semplice



(CH₂O) rappresenta un carboidrato, principalmente il saccarosio o l'amido

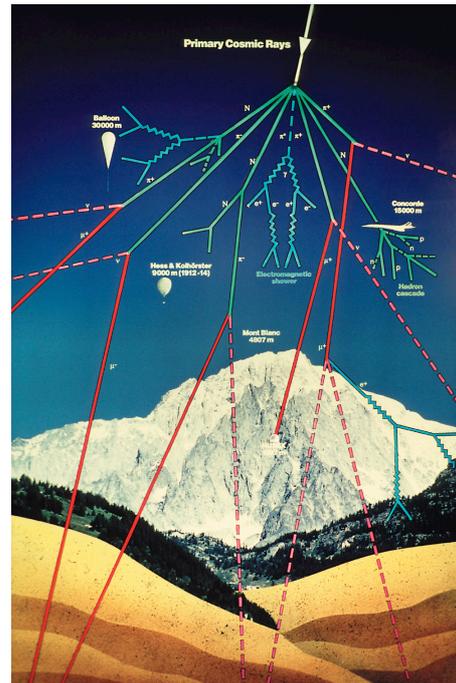
- In realtà il meccanismo della fotosintesi è molto complesso
 - Richiede l'intervento di molte proteine e piccole molecole
- La fotosintesi converte energia luminosa in energia chimica
 - Sulla Terra è la fonte di quasi tutti i composti del carbonio e di tutto l'ossigeno da cui dipende il metabolismo degli organismi aerobici



12

Abitabilità terrestre: protezione da radiazioni ionizzanti

- La superficie terrestre è abitabile anche in quanto è protetta da radiazioni ionizzanti in arrivo dallo spazio
- Radiazioni ultraviolette
 - Attraverserebbero l'atmosfera in assenza dello strato di ozono
 - Provenienti dal Sole e dal campo di radiazione interstellare
- Raggi cosmici
 - Radiazioni ionizzanti che provocano cascate di particelle nell'atmosfera terrestre
 - Provenienti dalle supernove Galattiche e dal Sole



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

13

EFFETTO PROTETTIVO DELL'ATMOSFERA

L'atmosfera terrestre svolge il ruolo fondamentale di protezione sia dalle particelle (raggi cosmici) che dai fotoni di alta energia.

L'effetto dell'atmosfera sui raggi cosmici è quello di trasformarli in particelle di minore energia, mediante una serie di cascate di particelle negli strati più alti dell'atmosfera. Tipicamente i protoni energetici collidono con una molecola atmosferica producendo una cascata ("air shower") di mesoni carichi che decadono a loro volta in altre particelle. I raggi cosmici sono anche responsabili della produzione continua di isotopi instabili nell'atmosfera terrestre, quale ad esempio il ^{14}C .

L'effetto protettivo nei confronti dei fotoni ultravioletti si ha grazie all'esistenza di ossigeno nell'atmosfera terrestre e, in particolare, di uno strato di ozono (O_3) che assorbe molto efficacemente le radiazioni ultraviolette più energetiche. L'ozono si forma proprio grazie al fatto che parte delle molecole di O_2 vengono dissociate dalla radiazione ultravioletta negli strati più alti dell'atmosfera. Gli atomi di ossigeno così liberati reagiscono con molecole O_2 non dissociate per creare O_3 . Nel caso della Terra, dunque, la presenza di ossigeno svolge attualmente un ruolo fondamentale di protezione dalle radiazioni ionizzanti.

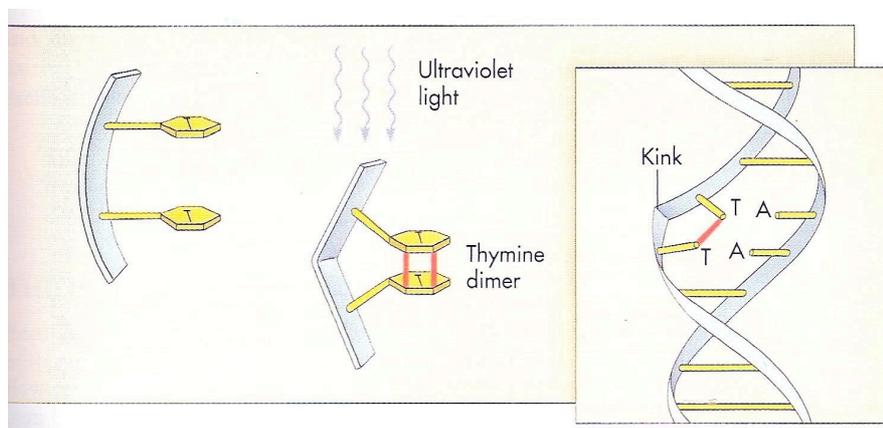
Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

14

Danni biologici dovuti a radiazioni ionizzanti

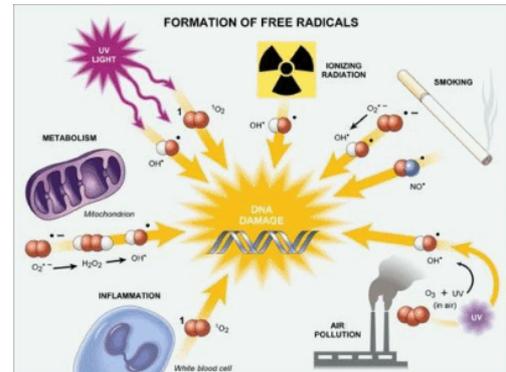
- I danni più notevoli riguardano la struttura del DNA
 - Danni a uno dei due filamenti
 - Danni al doppio filamento

- **Mutazioni genetiche dovute a radiazione ultravioletta**
 - La radiazione ultravioletta non ionizza atomi o molecole biologiche
 - Però fa diventare reattive alcune basi del DNA
 - Tali basi, se adiacenti, si legano chimicamente formando una “piega” nella struttura del DNA
 - Tale “piega” può bloccare la replicazione del DNA, provocando un danno letale
 - Esistono meccanismi biologici naturali di riparazione del DNA
 - Se il tasso di mutazioni è basso riescono a riparare i danni in maniera efficiente



Mutazioni genetiche dovute a radiazioni ionizzanti

- Particelle di alta energia, raggi X, raggi γ
 - Ionizzano atomi e molecole
 - Il danno diretto avviene principalmente sulle molecole d'acqua in cui sono immerse le molecole biologiche
 - Vengono creati "radicali liberi"
 - speci molecolari altamente reattive
 - Il danno sul DNA avviene in maniera indiretta
 - Mediante l'azione dei radicali liberi
- Le radiazioni ionizzanti possono danneggiare entrambi i filamenti del DNA nella stessa posizione
 - Molto più difficile, se non impossibile, riparare il DNA
 - Esistono alcuni microrganismi capaci di riparare tale tipo di danno (es. *Deinococcus Radiodurans*)



2. Ambienti abitabili nell'Universo

Come per il caso della Terra, molti sono i possibili criteri di abitabilità

Qui consideriamo in dettaglio

- I limiti estremi di temperatura e pressione che consentono la presenza di forme di vita
- L'abitabilità planetaria

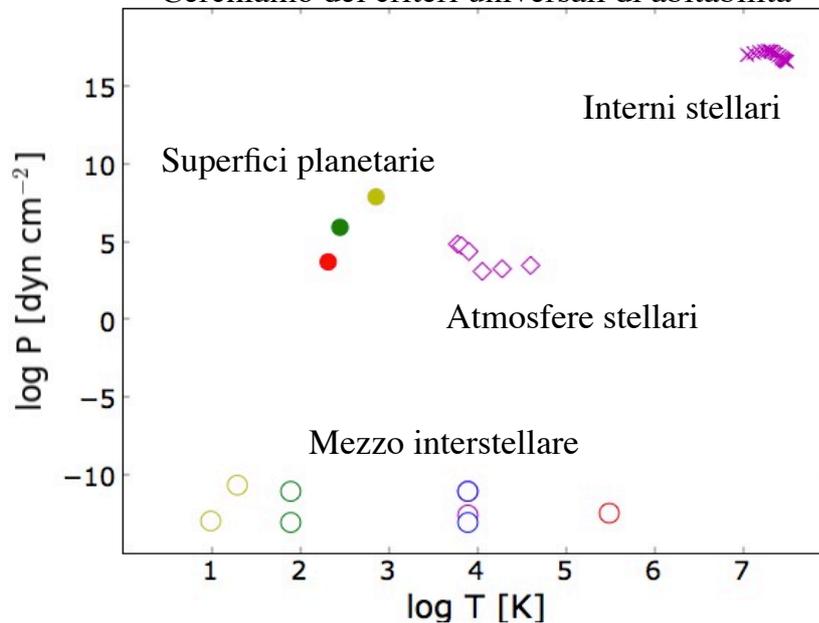
Infine diamo un breve cenno su

- Fonti di energia
- Protezione da radiazioni ionizzanti

L'Universo Abitabile

Ambienti astronomici nel diagramma temperatura-pressione

Cerchiamo dei criteri universali di abitabilità



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

19

Ambienti abitabili ed energie dei legami chimici

- Definizione operativa di ambiente abitabile dal punto di vista delle condizioni fisiche
– Ottenuta dal confronto tra energia cinetica media $E = (3/2)kT$ ed energia caratteristica dei legami chimici d'interesse biologico

Per evitare la distruzione delle molecole biologiche:

$$E_{\text{cinetica}} < E_{\text{legame chimico}}$$

- Energie caratteristiche di legame chimico

– Legami covalenti

Tipicamente tra ~50 e ~200 kcal/mole

$$100 \text{ kcal/mole} \sim 418 \text{ kJ/mole} \sim 4.2 \text{ eV}$$

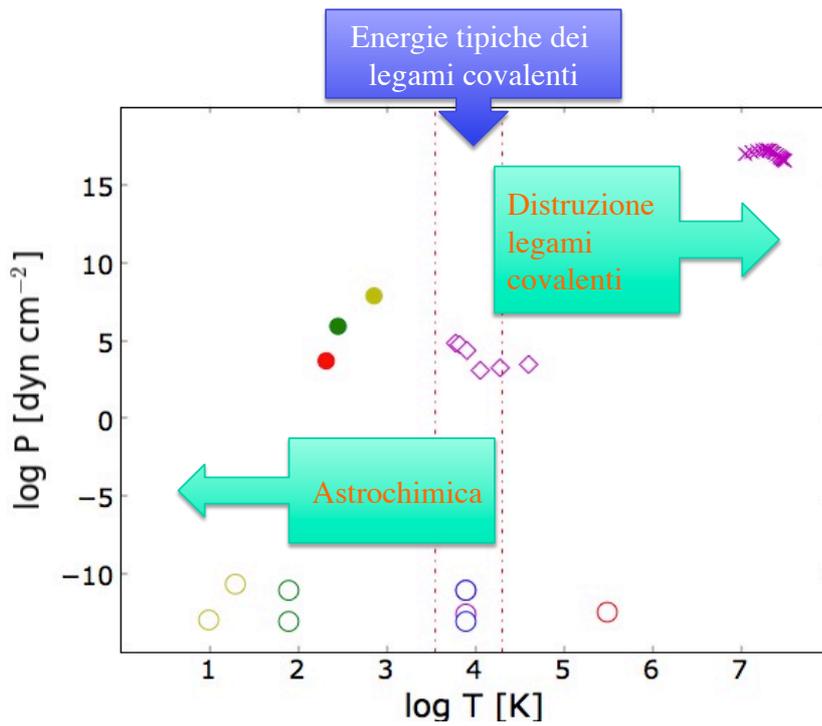
– Legami idrogeno

Tipicamente tra ~1 e ~10 kcal/mole

$$5 \text{ kcal/mole} \sim 20 \text{ kJ/mole} \sim 0.2 \text{ eV}$$

Convertiamo in temperatura le energie caratteristiche
dei legami chimici d'interesse biologico
in modo da poter porre dei limiti di abitabilità nel diagramma T-P

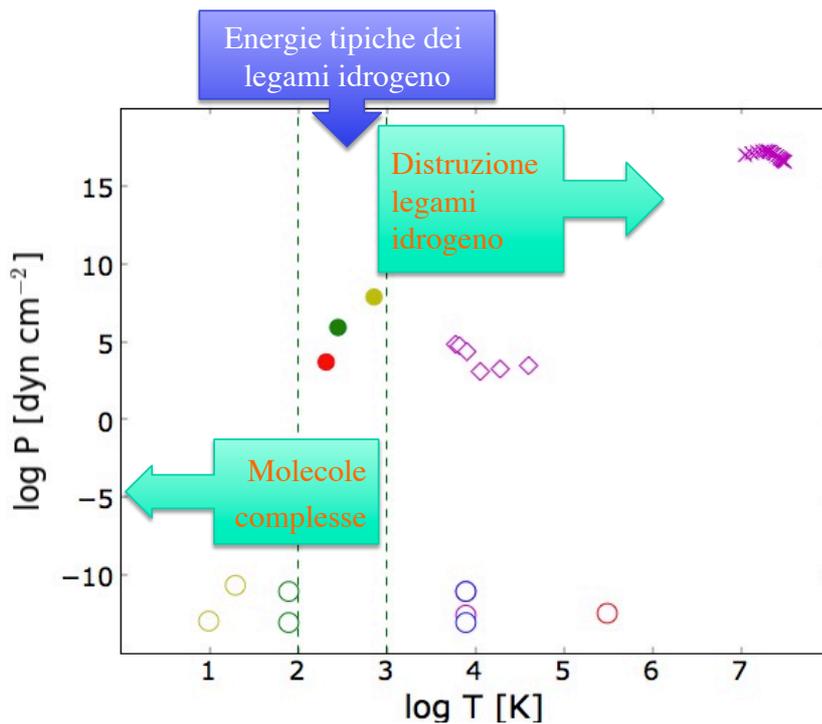
L'Universo Abitabile



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

21

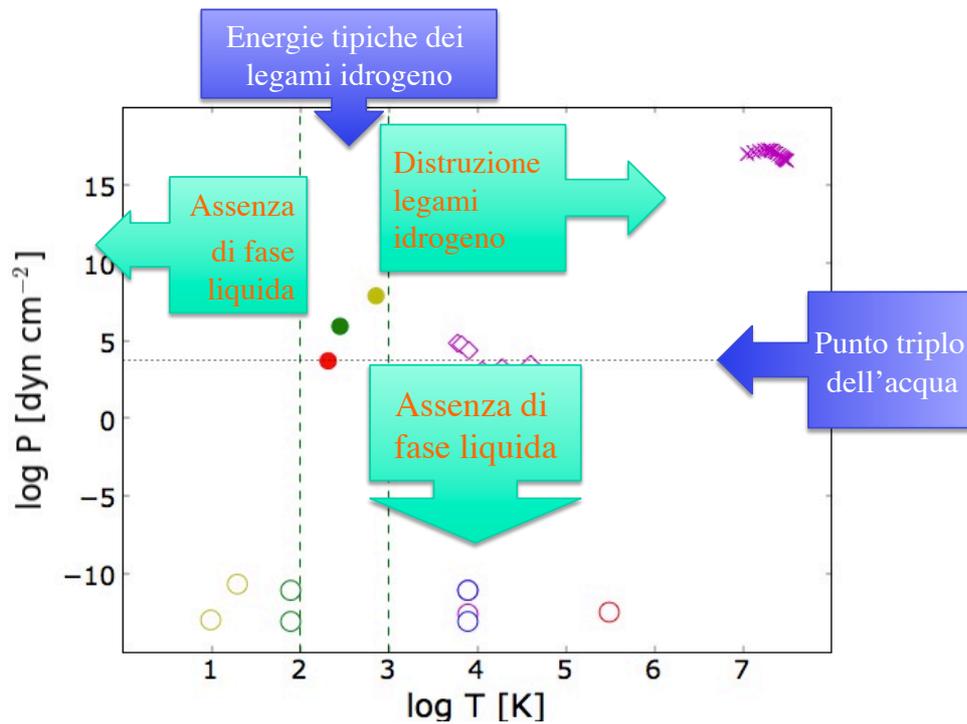
L'Universo Abitabile



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

22

L'Universo Abitabile



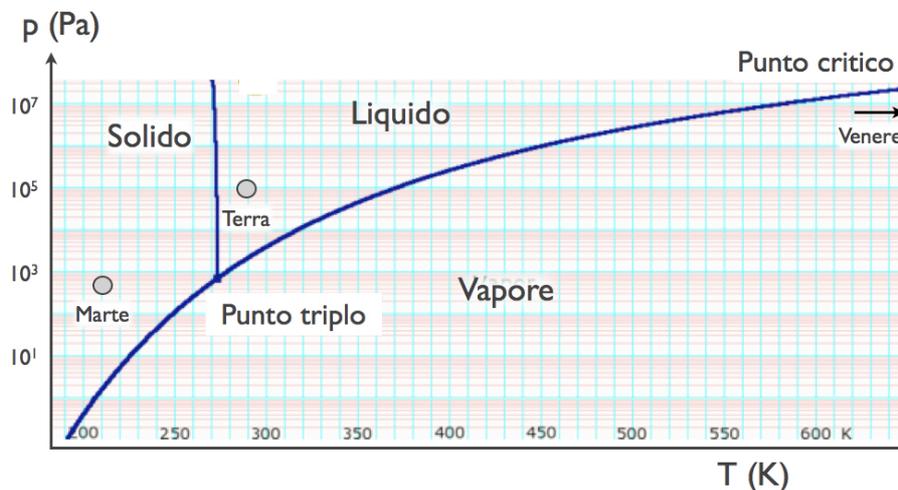
Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

23

L'Universo Abitabile

Il criterio di esistenza di acqua in fase liquida porta a risultati molto simili al criterio di sopravvivenza dei legami idrogeno. Non è un caso, dal momento che sono proprio tali legami che conferiscono all'acqua liquida le proprietà che conosciamo

Il criterio dell'acqua liquida ha lo svantaggio di essere meno universale rispetto al criterio dei legami idrogeno, ma il vantaggio di essere un criterio ben definito dal punto di vista dei limiti delle variabili termodinamiche



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

24

L'universo abitabile

- **Conclusione**

I sistemi planetari sono i principali candidati (se non gli unici) per la ricerca di ambienti abitabili nell'Universo

- Il fatto che i pianeti si possono trovare a diverse distanze dalla stella centrale, e abbiano diversi tipi di strutture e condizioni ambientali, offre un ventaglio di possibilità in cui poter cercare ambienti abitabili

Abitabilità planetaria

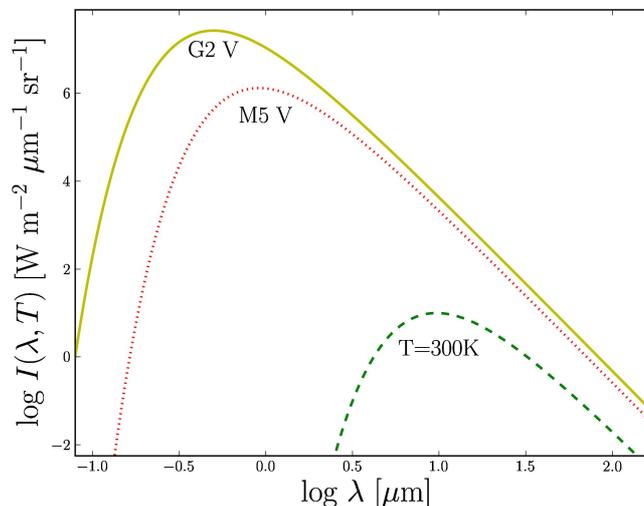
Calcolo della temperatura superficiale media di un pianeta

La temperatura media superficiale di un pianeta può venir stimata mediante un'equazione di bilancio tra l'energia per unità di tempo in arrivo sulla superficie del pianeta, \mathcal{L}_{in} , e quella in uscita, \mathcal{L}_{out} . L'energia che arriva in superficie è composta da due termini. Uno rappresenta l'energia in arrivo dall'esterno, \mathcal{L}_* , ovvero la frazione di radiazione stellare assorbita dalla superficie. L'altro termine, \mathcal{L}_g , rappresenta l'energia in arrivo dall'interno del pianeta, ovvero il calore geotermico. L'equazione di bilancio è pertanto

$$\mathcal{L}_{in} = \mathcal{L}_* + \mathcal{L}_g = \mathcal{L}_{out} , \quad (2.1)$$

dove \mathcal{L}_{out} , rappresenta l'energia per unità di tempo irradiata dal pianeta nello spazio.

Per meglio comprendere il significato di questa equazione bisogna tener presente che la radiazione stellare in arrivo e la radiazione planetaria in uscita si trovano in diverse bande spettrali: la prima tipicamente nella banda visibile/ultravioletta, la seconda nella banda infrarossa. In Fig. 2.2 compariamo, a titolo di esempio, le emissioni di corpo nero di una stella di tipo solare, di una stella fredda e di un pianeta con temperatura $T = 300$ K. Il massimo di emissione della stella di tipo solare si ha a $\simeq 0.5 \mu\text{m}$, mentre quello del pianeta a $\simeq 10 \mu\text{m}$.



Valutiamo ora il termine "astronomico" \mathcal{L}_* dell'equazione. Chiamiamo L_* la luminosità della stella, d la distanza stella-pianeta, e

$$S_* \equiv L_*/(4\pi d^2) . \quad (2.2)$$

L'energia radiante stellare incidente per unità di tempo sul pianeta è data da $\pi R_p^2 S_*$, dove R_p è il raggio del pianeta. Chiamiamo *albedo* A la *frazione di flusso stellare riflessa nello spazio dal pianeta* in tutte le lunghezze d'onda. Con queste definizioni l'energia di radiazione stellare assorbita dalla superficie del pianeta sarà $\mathcal{L}_* = \pi R_p^2 S_* (1 - A)$.

Chiamiamo poi ϵ_g il flusso di calore interno geotermico (Watt m^{-2}). L'energia per unità di tempo in arrivo dall'interno del pianeta sarà $\mathcal{L}_g = 4\pi R_p^2 \epsilon_g$.

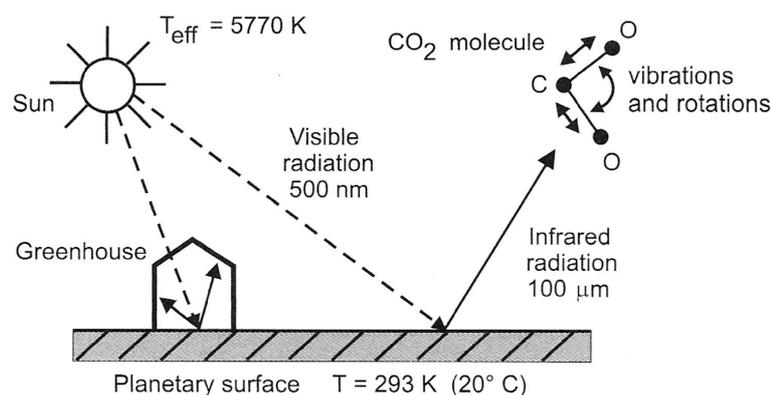
Per quanto riguarda l'energia irradiata dal pianeta nello spazio, assumendo che l'emissione sia di corpo nero, si ha $\mathcal{L}_{out} = 4\pi R_p^2 \sigma T_p^4$, dove σ è la costante di Stephan-Boltzmann e T_p la temperatura effettiva del pianeta.

Sostituendo i termini nell'equazione di bilancio (2.1) si ottiene

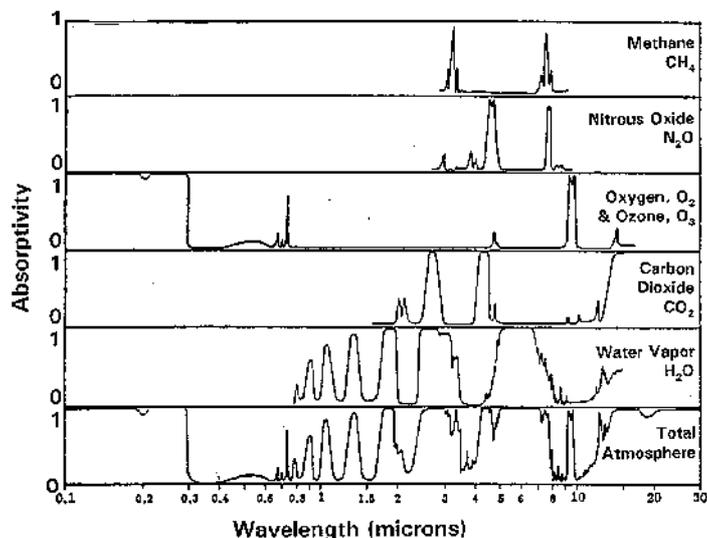
$$(1 - A) \frac{S_*}{4} + \epsilon_g = \sigma T_p^4 , \quad (2.3)$$

da cui si può ricavare una stima della temperatura effettiva del pianeta.

La temperatura effettiva determinata dalla relazione (2.3) sarà in generale diversa dalla vera temperatura superficiale del pianeta, T_s . In particolare, se l'atmosfera del pianeta contiene composti gassosi trasparenti alla radiazione visibile/ultravioletta in arrivo, ma che assorbono la radiazione termica in uscita, si avrà un *effetto serra*.

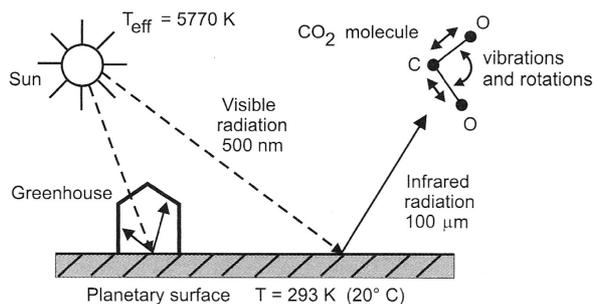


ABSORPTION SPECTRA FOR MAJOR NATURAL GREENHOUSE GASES IN THE EARTH'S ATMOSPHERE



[After J. N. Howard, 1959: *Proc. I.R.E.* 47, 1459; and R. M. Goody and G. D. Robinson, 1951: *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 77, 153]

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)



Come conseguenza dell'effetto serra la radiazione termica rimarrà parzialmente intrappolata nell'atmosfera e la temperatura superficiale del pianeta sarà maggiore di quella stimata dall'espressione (2.3). Possiamo quantificare in maniera puramente empirica l'effetto serra ("greenhouse effect") definendo un incremento ΔT_s tale che

$$T_s = T_p + \Delta T_s \quad . \quad (2.4)$$

Applichiamo dunque le equazioni di temperatura superficiale al caso della Terra. Data la luminosità bolometrica del Sole, $L_{\odot} = 3.845 \times 10^{26} \text{ W}$ e la distanza media terra-sole $d = 1 \text{ AU} = 1.495 \times 10^{11} \text{ m}$, si ha che

$$S = L_{\odot} / (4 \pi d^2) = 1366 \text{ W m}^{-2} \quad . \quad (2.5)$$

Quest'ultima quantità viene chiamata *costante solare* e rappresenta il flusso di radiazione solare incidente su di una superficie unitaria posta fuori dall'atmosfera terrestre e orientata perpendicolarmente ai raggi solari.

Al momento attuale l'energia geotermica che perviene in superficie per unità di tempo è $\mathcal{L}_g = 42 \times 10^{12} \text{ W}$ [72]. Da questo valore si deduce che $\epsilon_g = 0.082 \text{ W m}^{-2}$. Questo flusso interno è decisamente trascurabile rispetto a quello in arrivo dal Sole, $S = 1366 \text{ W m}^{-2}$. Per stimare la temperatura effettiva della Terra usiamo pertanto l'equazione (2.3) trascurando il termine ϵ_g .

Adottando un valore di albedo $A = 0.3$ si ottiene $T_p = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$. Questo valore è decisamente più basso della temperatura media misurata alla superficie della Terra, $T_s = 288 \text{ K} = +15^\circ \text{C}$. La differenza è interpretata come effetto serra. Il contributo alla temperatura media superficiale dato dall'effetto serra risulta pertanto essere $\Delta T_s = 33 \text{ K}$. In assenza di tale effetto la superficie terrestre sarebbe dunque ghiacciata. Adottando un valore di albedo più alto, tipico di nevi e ghiacci, otterremmo una temperatura ancora più bassa.

Zona abitabile circumstellare

$$(1 - A) \frac{S_*}{4} + \epsilon_g = \sigma T_p^4 \quad S_* \equiv L_* / (4\pi d^2)$$

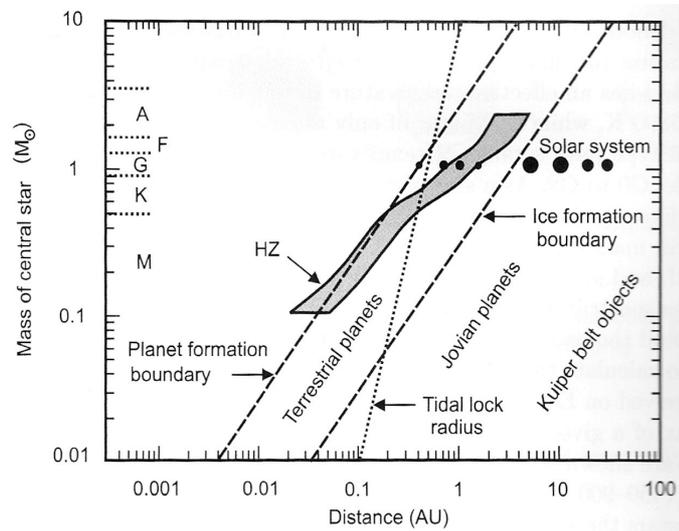
Poichè $S_* \propto d^{-2}$, è possibile determinare due valori critici di distanza dalla stella centrale, d_{\min} e d_{\max} , all'interno dei quali la temperatura media superficiale cade entro il campo di esistenza della fase liquida nel diagramma di stato dell'acqua per un dato valore di pressione. Se $p = 10^5 \text{ Pa}$, si deduce naturalmente che la temperatura superficiale deve cadere entro l'intervallo $0^\circ \text{C} \leq T_s \leq 100^\circ \text{C}$.

A parità di altre condizioni fisiche superficiali planetarie, il vincolo sulla temperatura si traduce in un vincolo sulla distanza. Se $d < d_{\min}$ la temperatura sarà troppo elevata per sostenere la vita; l'acqua eventualmente presente sul pianeta evaporerà dalla superficie. Se $d > d_{\max}$ l'acqua superficiale, se presente, sarà ghiacciata. L'intervallo di distanze tra d_{\min} e d_{\max} viene chiamato *zona abitabile circumstellare*. Tale zona viene anche chiamata *LWHZ* (*Liquid Water Habitable Zone*).

Zona abitabile circumstellare

- Calcolata per stelle di diverso tipo spettrale

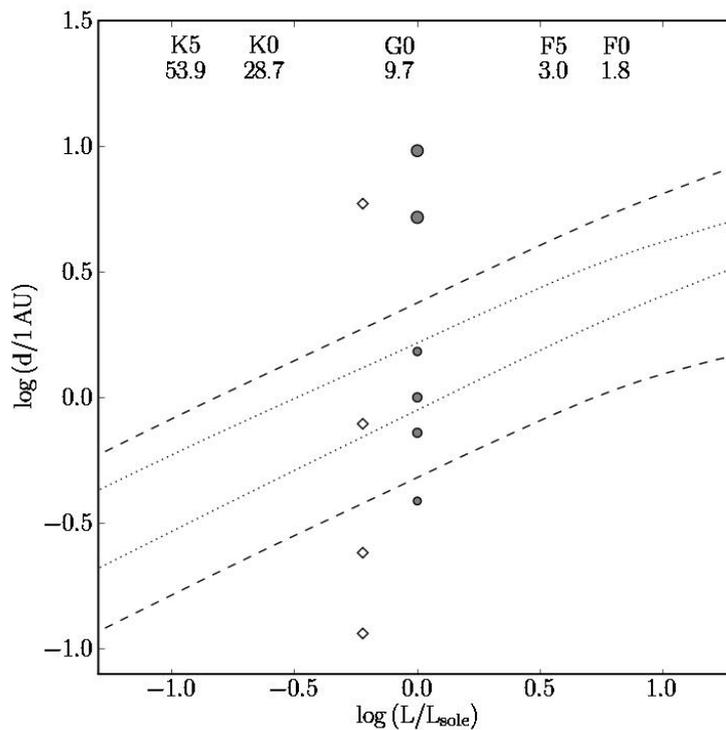
Kasting et al. 1993, Icarus, 101, 108



G. Vladilo - Vita e Zone Abitabili nell'Universo
Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

35

35

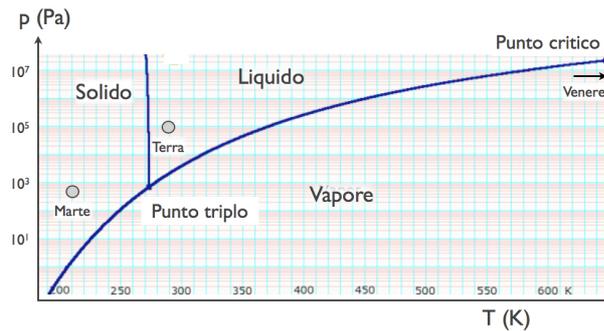


Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

36

L'esistenza di un'atmosfera planetaria è una condizione necessaria per l'abitabilità di tipo superficiale. Questo fatto è facilmente dimostrabile, e quantificabile, tenendo in conto che deve esserci una pressione atmosferica superficiale superiore a quella del punto triplo dell'acqua affinché possa esistere acqua in fase liquida. Come si può vedere dalla Fig. 2.1, la pressione superficiale del pianeta dev'essere pertanto

$$p_s \gtrsim 612 \text{ Pa} . \quad (2.12)$$



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

L'esistenza di un'atmosfera pone a sua volta vincoli sulla massa, M_p , e il raggio, R_p , del pianeta. Tali parametri devono essere sufficientemente grandi da trattenere gravitazionalmente l'atmosfera, prevenendo il meccanismo di *Jean escape*. Tale meccanismo consiste nella perdita verso lo spazio esterno delle molecole atmosferiche con velocità termica superiore alla velocità di fuga del pianeta. Questo succede se le molecole che si trovano nella coda della distribuzione maxwelliana delle velocità molecolari raggiungono la velocità di fuga ad un livello dell'atmosfera dove il cammino libero medio è comparabile con l'altezza di scala. Affinchè tale meccanismo non faccia perdere l'atmosfera del pianeta bisogna che sia soddisfatta la condizione

$$\int_{v_{fuga}}^{\infty} f_v(T, \mu) dv \ll 1 \quad (2.13)$$

dove $f_v(T, \mu)$ è la distribuzione maxwelliana delle velocità delle molecole atmosferiche, che dipende dalla temperatura atmosferica, T , e dalla massa delle molecole, μ ; l'integrazione è estesa a partire dalla velocità di fuga superficiale dal pianeta,

$$v_{fuga} = \left(\frac{2GM_p}{R_p} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{8}{3} \pi G \rho_p \right)^{\frac{1}{2}} R_p , \quad (2.14)$$

che può essere utilmente espressa in funzione della densità media del pianeta, ρ_p . Dall'espressione della distribuzione maxwelliana

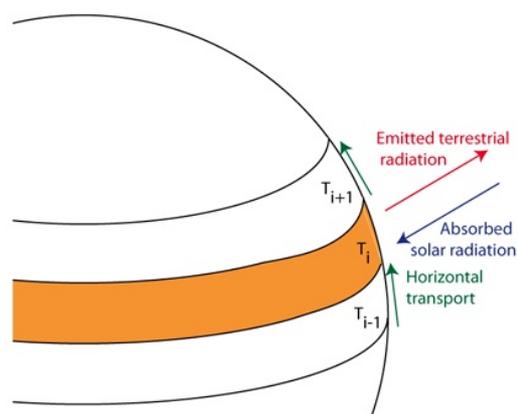
$$f_v(T, \mu) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} v^2 \left(\frac{\mu}{2kT} \right)^{3/2} e^{-\mu v^2 / (2kT)} \quad (2.15)$$

si può dedurre che la coda di alta velocità delle molecole è tanto più popolata quanto più alto è il rapporto T/μ .

Studi di climatologia, atmosfere e strutture interne planetarie sono essenziali per definire l'abitabilità

- Studio multidisciplinare in cui sono fondamentali le interazioni con le Scienze della Terra
 - Atmosfere e climi planetari <--> Atmosfera e clima della Terra
 - Strutture interne planetarie <--> Struttura interna della Terra

Modelli climatici di bilancio energetico (EBM)

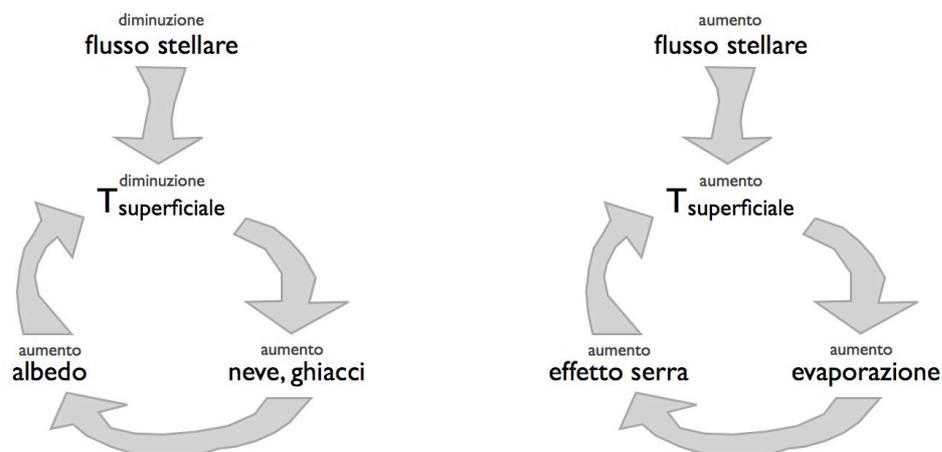


$$I_i + C_i \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[D_i (1 - x^2) \frac{\partial T}{\partial x} \right] = S_i (1 - A_i)$$

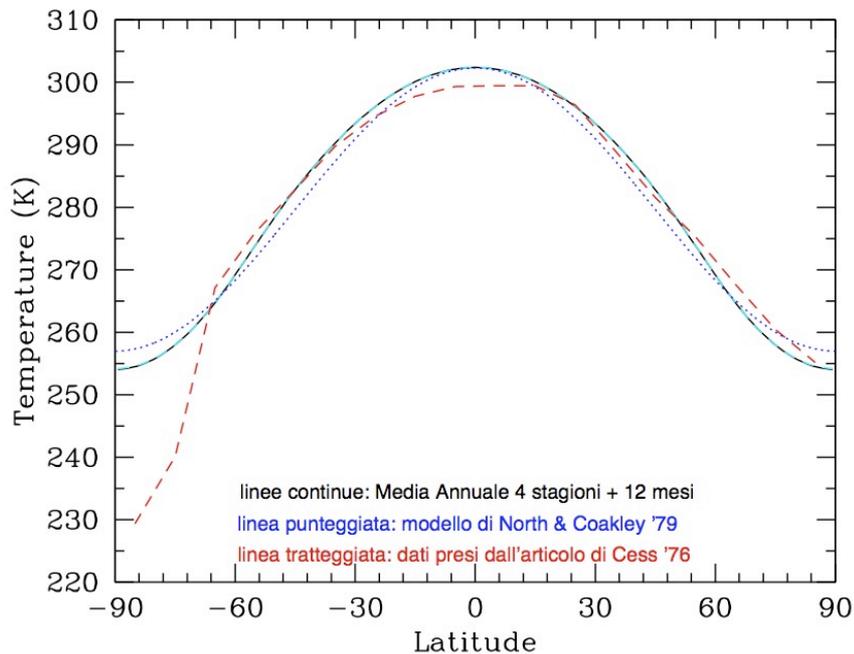
Effetti di 'feedback'

- Lo studio dell'abitabilità planetaria è complesso a causa della dipendenza del clima da molti effetti che sono tra loro interdipendenti
- Alcuni di tali effetti di 'feedback' portano a stabilizzare il clima, altri portano a instabilità climatiche
- I modelli climatici devono essere in grado di rappresentare tale effetti di feedback
 - Nonostante la loro semplicità, gli EBM sono in grado simulare alcuni di tali effetti di feedback
- Vediamo due esempi estremi di feedback climatico che portano ad una glaciazione totale oppure ad una evaporazione totale del pianeta

Esempi di meccanismi che creano instabilità climatiche



Esempio di calcolo della temperatura superficiale media della Terra con un EBM



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

43

FATTORI PLANETARI: ALBEDO

L'albedo superficiale dipende dalla presenza di oceani e continenti e dallo loro eventuale copertura da parte di neve e ghiacci. L'albedo planetaria è però anche influenzata dall'eventuale copertura nuvolosa dell'atmosfera. Nella banda visibile l'albedo è alta se la superficie è coperta di nubi, neve o ghiacci ($A \simeq 0.8/0.9$), mentre ha valori più bassi per superfici rocciose o sabbiose ($A \simeq 0.25$). Sulla Terra anche la presenza di vegetazione altera il valore d'albedo. Ciò dimostra che, in generale, la presenza stessa di vita può introdurre forme di *feedback* che influenzano condizioni climatiche del pianeta.

FATTORI PLANETARI: CAPACITÀ TERMICA SUPERFICIALE

La capacità termica superficiale è tenuta in conto in modelli di bilancio energetico più raffinati rispetto al semplice modello di bilancio globale considerato nell'Eq. (2.3). Ad esempio, gli *energy balance model* unidimensionali, che tengono conto della diffusione del calore lungo fasce latitudinali del pianeta [110, 9], contengono un termine di capacità termica.

La presenza di oceani influenza il clima mediante l'alto valore di capacità termica dell'acqua, che fornisce un importante meccanismo di mitigazione del climatico. I continenti sono invece caratterizzati da valori più bassi di capacità termica e dunque da maggiori escursioni termiche. Modelli di climi planetari dovrebbero pertanto tenere in considerazione la frazione di superficie coperta da continenti e oceani.

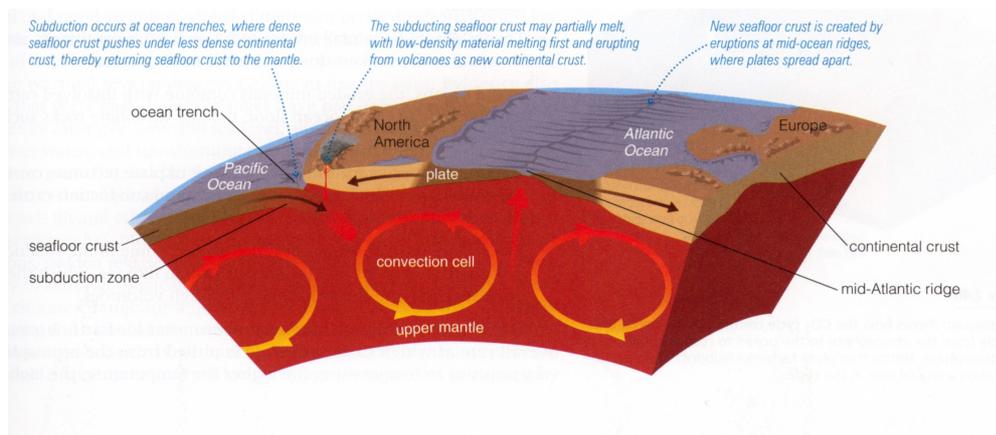
Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

44

- **L'acqua come fattore di abitabilità**
 - Albedo
 - Capacità termica
 - Densità ghiaccio < densità liquido
 - Proprietà caratteristica dell'acqua
 - Crea possibilità di abitabilità al di sotto di una superficie ghiacciata
- **Le proprietà dell'acqua in termini di abitabilità si vanno ad aggiungere a quelle d'importanza biologica**

FATTORI GEOFISICI: VULCANISMO E FENOMENI TETTONICI

Vulcanismo e fenomeni tettonici possono influenzare il clima in vari modi. L'immissione in atmosfera di gas vulcanici, come il CO₂, altera la composizione chimica atmosferica e pertanto l'intensità dell'effetto serra. La creazione di crosta continentale e la sua subduzione alterano costantemente l'equilibrio chimico e termico della superficie planetaria, creando scambi con l'interno del pianeta. I fenomeni tettonici alterano la frazione di continenti emersi e, di conseguenza, la capacità termica della superficie planetaria. Nel loro insieme, vulcanismo e fenomeni tettonici sembrano dar luogo a meccanismi di stabilizzazione del clima, quantomeno nel caso della Terra.



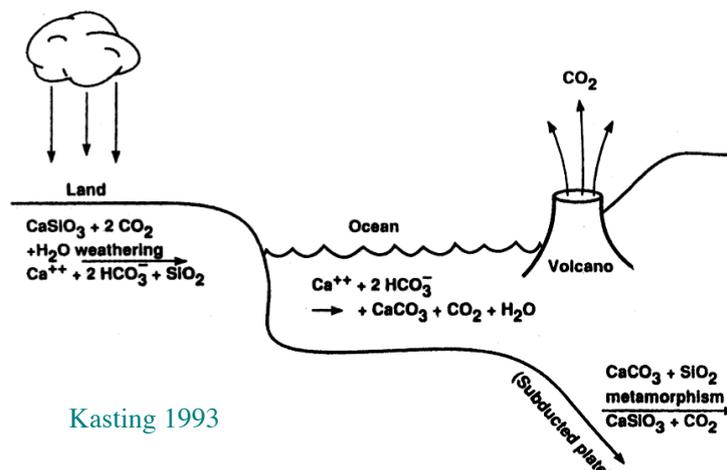
Come abbiamo visto, l'attuale flusso di calore geotermico terrestre, $\epsilon_g = 0.082 \text{ W m}^{-2}$, è completamente trascurabile rispetto a quello in arrivo dal Sole, $S = 1366 \text{ W m}^{-2}$. Non è detto però che il calore interno sia trascurabile in altri pianeti o in altre epoche della storia della Terra. A tal scopo è istruttivo esaminare il bilancio del calore geotermico terrestre [72].

La principale sorgente di calore interno terrestre al momento attuale è il decadimento radioattivo di isotopi con tempi di decadimento molto lunghi (^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th). Tali isotopi sono principalmente concentrati nella crosta continentale, che produce circa il 20% del calore interno. Sono meno concentrati nel mantello terrestre, che comunque, a causa del suo maggiore volume rispetto alla crosta, contribuisce a circa il 55% di questo bilancio. Il nucleo terrestre non contiene quantità significative di elementi radiogenici. Tuttavia, la cristallizzazione del nucleo esterno produce un calore latente che contribuisce per circa il 10% al calore interno. Il rimanente 15% di calore geotermico deriva dalla dissipazione dell'energia fossile di accrescimento della Terra.

Nella Terra primitiva il calore di formazione doveva essere sicuramente maggiore, così pure come il contributo radiogenico, data la maggior disponibilità di isotopi radioattivi che non erano ancora decaduti. Quindi il calore geotermico ϵ_g poteva contribuire significativamente al bilancio energetico nella prime fasi evolutive della Terra.

Esempio di meccanismo di stabilizzazione del clima

- Ciclo stabilizzatore climatico del CO_2 inorganico
 - 1) Rimozione del CO_2 dall'atmosfera mediante reazioni chimiche indotte da agenti atmosferici; i prodotti chimici finiscono sul fondo oceanico e in definitiva nelle zone di subduzione
L'efficienza di questa fase del ciclo aumenta con la temperatura atmosferica della Terra
 - 2) Reimmissione del CO_2 nell'atmosfera dagli strati profondi mediante vulcanismo
L'efficienza di questa fase del ciclo non dipende dalla temperatura atmosferica
 - Tempo scala del ciclo $\sim 5 \times 10^5$ anni
L'esistenza di un mantello convettivo sotto la crosta terrestre gioca un ruolo fondamentale in questo processo



Abitabilità continua

La scala di tempo dell'evoluzione della vita terrestre dai microrganismi agli organismi più complessi è dell'ordine di alcuni miliardi di anni (si veda il Capitolo 4). Tale scala di tempo lunga pone dei vincoli di *abitabilità continua*, o *abitabilità a lungo termine* per pianeti nei quali ci si aspetta di trovare forme di vita evolute. Il requisito di abitabilità continua pone vincoli stridenti sui vari fattori astronomici e geofisici che influenzano l'abitabilità planetaria.

Abitabilità circumstellare continua

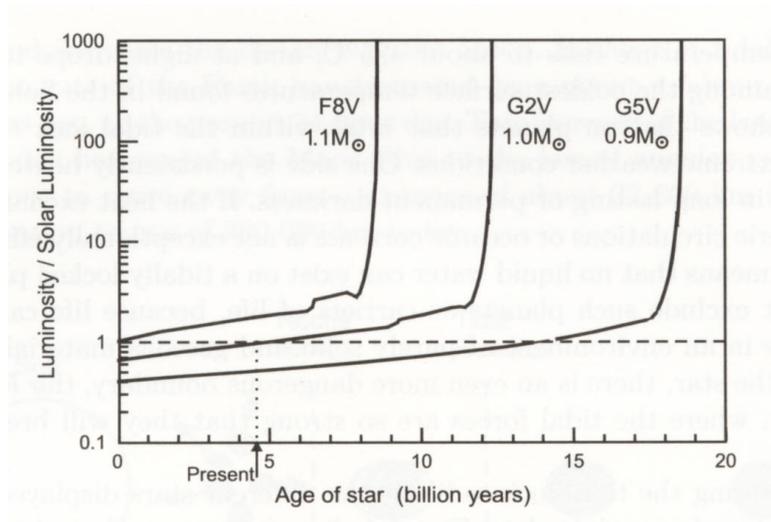
- La stella deve avere un tempo di vita in sequenza principale sufficientemente lungo per consentire l'evoluzione della vita da microrganismi a organismi complessi
 - Tipicamente qualche miliardo di anni, come vedremo più avanti
 $t(H_{\text{burning}}) \geq 10^9$ anni implica $M(\text{stella}) \leq 2 M_{\odot}$ e tipo spettrale $\geq A5$
 - Alcune centinaia di milioni di anni potrebbero bastare per la formazione di microrganismi, ma non sembrano sufficienti per la formazione di organismi complessi
 $t(H_{\text{burning}}) \geq 3 \times 10^8$ anni implica $M(\text{stella}) \leq 3 M_{\odot}$ e tipo spettrale $\geq A0$

TABELLA 16 - Tempi di permanenza nella sequenza principale come funzione della massa stellare (da *Stellar Evolution*, a cura di HONG-YEE CHIU e A. MURIEL, Cambridge, Massachusetts 1972, p. 62).

M (in M_{\odot})	T_{sp} (in anni)	M_{\odot}	T_{sp}
15	$1,010 \times 10^7$	2,25	$4,802 \times 10^8$
9	$2,114 \times 10^7$	1,5	$1,553 \times 10^9$
5	$6,547 \times 10^7$	1,25	$2,803 \times 10^9$
3	$2,212 \times 10^8$	1,0 (Sole)	$7,00 \times 10^9$

Spostamento della zona di abitabilità circumstellare

- **Evoluzione della luminosità della stella**
 - Spostamento graduale della zona di abitabilità nei sistemi planetari

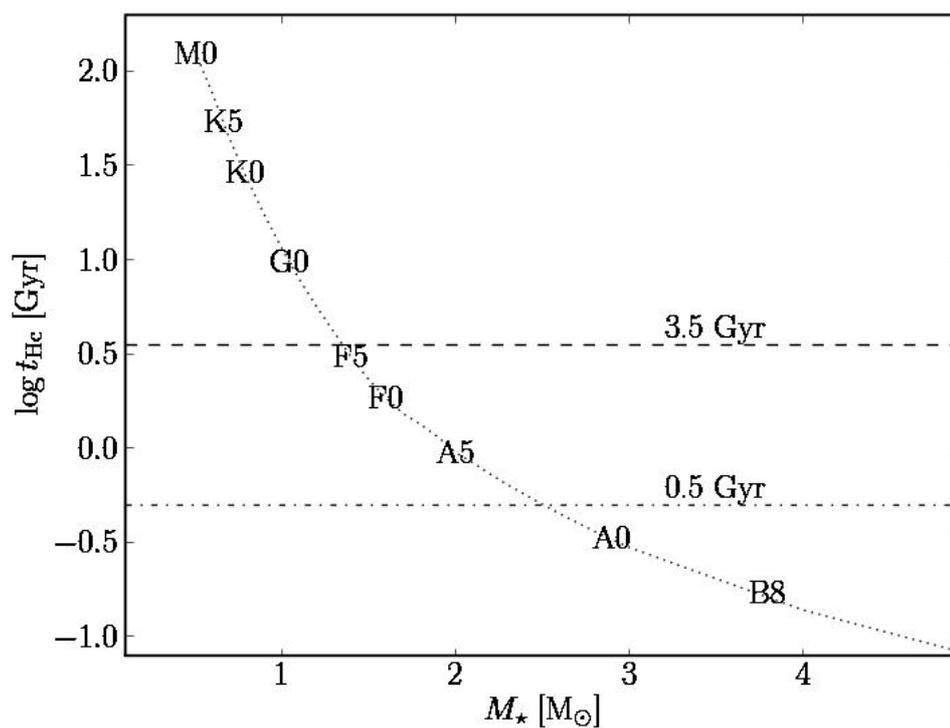


G. Vladilo - Vita e Zone Abitabili nell'Universo
Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

51

51

Tempo di permanenza in sequenza principale



Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

52

Abitabilità continua e stabilità orbitale

- **L'orbita del pianeta attorno alla stella deve essere dinamicamente stabile all'interno della zona abitabile al fine di avere abitabilità continua**
 - Problema di meccanica celeste risolvibile mediante metodi di integrazione numerica
- **Vincolo applicabile in studi di esopianeti**
 - Molti degli esopianeti scoperti finora sono pianeti giganti in orbite molto eccentriche
 - Bisogna capire se in tali condizioni possono esistere delle orbite stabili all'interno della zona abitabile per pianeti terrestri eventualmente presenti in tali sistemi esoplanetari

Altre forme di abitabilità

- **Forme di abitabilità fuori dalla “zona abitabile circumstellare”**
- **Abitabilità sotto la superficie**
 - Rilevante, ad esempio, per l'abitabilità dei satelliti naturali dei pianeti
 - Ad esempio un eventuale oceano di acqua liquida che si trovasse al di sotto di una superficie ghiacciata
- **Abitabilità atmosferica**
 - Generalmente non presa in considerazione, ma non è possibile escluderla completamente



Abitabilità sotto la superficie

- La presenza di gradienti termici negli interni planetari può far sì che ambienti sotto la superficie possano godere di condizioni di abitabilità anche nel caso in cui la superficie stessa non sia abitabile
 - Se c'è una sorgente di calore interno planetario può succedere che sotto a una superficie troppo fredda per essere abitabile vi sia, ad una opportuna profondità, uno strato con temperatura e pressione adeguati perchè possa esistere acqua in fase liquida

Fonti di energia

- **Lezioni tratte dalla vita terrestre**
 - Gli organismi autotrofi terrestri usano principalmente la fotosintesi e reazioni di ossido-riduzione per il loro fabbisogno energetico
 - Le cellule terrestri hanno sistemi di trasduzione di altre forme di energia, utilizzate per interagire con l'ambiente
sono sensibili al calore, al tocco, a stiramenti, convezione di fluidi, a gravità e pressione (Schulze-Makuch & Irwin04)
- **In ambienti non terrestri**
 - I sistemi viventi potrebbero utilizzare le reazioni di ossido-riduzione e la fotosintesi, come sulla Terra, ma, potrebbero anche aver sviluppato sistemi di trasduzione per utilizzare altre forme di energia per il loro fabbisogno energetico
Studi dettagliati suggeriscono che gradienti termici, ionici e osmotici, nonché l'energia cinetica di fluidi in movimento, possano essere valide alternative (Schulze-Makuch & Irwin04)

Protezione da radiazioni ionizzanti

- **Necessità di un'atmosfera planetaria**
 - Protezione da raggi cosmici Galattici e radiazioni ionizzanti stellari
 - L'eventuale presenza di ossigeno atmosferico porterebbe alla formazione di uno strato di ozono protettivo delle radiazioni UV
- **Campo magnetico planetario**
 - Attenua gli effetti delle particelle di alta energia sull'atmosfera planetaria, che tendono ad eroderne gli strati esterni
 - In assenza di atmosfera il campo magnetico sarebbe generalmente insufficiente a proteggere la superficie planetaria da radiazioni ionizzanti
- **In assenza di atmosfera planetaria potrebbero essere presenti degli strati protetti dalle radiazioni al di sotto della superficie**
 - tali strati potrebbero godere di altre condizioni di abitabilità

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

57

Tabella 2.1: Quadro sinottico dei principali fattori che influenzano l'abitabilità planetaria.

Fattore	Implicazione fisica	Implicazione per l'abitabilità
Proprietà della stella		
Luminosità	Flusso in arrivo sul pianeta	Temperatura superficiale
Massa	Tempo di vita in sequenza principale Periodo orbitale del pianeta	Abitabilità continua Frequenza delle stagioni
Tipo spettrale	Albedo	Temperatura media
Proprietà delle orbite planetarie		
Semi-asse maggiore	Flusso in arrivo sul pianeta	Temperatura superficiale
Eccentricità	Variazione stagionale del flusso	Variazione stagionale del clima
Inclinazione	Variazione stagionale del flusso	Variazione stagionale del clima
Periodo orbitale		Frequenza delle stagioni
Proprietà del sistema planetario		
Pianeta gigante	Stabilizzazione delle orbite Cattura di corpi minori	Abitabilità continua Protezione da collisioni
Satellite naturale	Stabilizzazione asse rotazione Cattura di corpi minori <i>Tidal flexing</i>	Stabilità climatica Protezione da collisioni Calore interno planetario

Astronomia Osservativa C, AB Cap. 2, Vladilo (2011)

58

Proprietà del pianeta		
Periodo di rotazione	Campo magnetico planetario Diffusione del calore in superficie	Protezione da "space weather" Clima
Massa e raggio	Velocità di fuga Tempo dissipazione calore interno	Presenza di atmosfera Persistenza di vulcanismo/tettonica
Atmosfera	Effetto serra Diffusione del calore in superficie Filtro ultravioletto Albedo $P_s > 660 \text{ Pa}$	Temperatura superficiale Temperatura superficiale Protezione da radiazioni ionizzanti Temperatura superficiale Possibilità di acqua in fase liquida
Oceani	Capacità termica della superficie Albedo	Stabilizzazione climatica Temperatura superficiale
Biosfera	Composizione chimica atmosferica Albedo	Effetto serra, temperatura sup. Temperatura superficiale
Attività tettonica/vulcanica	Ciclo di silicati e carbonati Sorgenti di energia e composti chimici	Stabilizzazione climatica Sostenibilità organismi autotrofi
Abbondanza di radioisotopi	Calore interno	Temperatura superficiale
Nucleo metallico	Campo magnetico planetario	Protezione da "space weather"