

ABITABILITÀ SU SCALA LOCALE, GALATTICA E COSMOLOGICA (PARTE I)

di Marco Fecchio*, Luigi Secco*, Francesco Marzari*

Obiettivo dell'articolo è quello di sottolineare alcune condizioni necessarie richieste dalla vita per poter sorgere e svilupparsi. Esse sono localizzate: su scala locale planetaria, su scala galattica e all'interno dell'evoluzione cosmologica.

Una zona abitabile circumstellare (CHZ) viene considerata per sistemi solari ed extra-solari (Parte I); viene poi introdotta la zona galattica abitabile (GHZ) e viene evidenziato un set di forti vincoli cosmologici (abitabilità cosmologica, COSH) per avere la vita (Parte II).

Spesso la possibilità che i vincoli si realizzino è legata a un concorso di condizioni speciali che coinvolgono l'evoluzione di strutture inerenti a tutte e tre le scale. La vita appare quindi connessa con tutto il cosmo dentro il quale noi siamo immersi.

* Dipartimento di Fisica
e Astronomia dell'Univer-
sità degli Studi di Padova

Il concetto di «eso-pianeta» o pianeta «extra-solare» è divenuto, ormai, di uso comune. La ricerca di nuovi mondi ha affascinato da sempre il genere umano e grazie alle moderne tecnologie, oggi, è possibile scrutare l'Universo in cerca di pianeti anche simili alla Terra.

Grande risalto ha avuto, per esempio, la recente scoperta di sette pianeti orbitanti attorno a una stella nana rossa, *Trappist-1* [1]. La scoperta di questo ulteriore sistema planetario, con alcuni dei suoi pianeti in grado di avere acqua allo stato liquido ha generato il consueto scalpore mediatico, trascurando vistosamente il fatto che le condizioni di abitabilità per la Terra contemplano la presenza dell'acqua liquida solo come «una» delle condizioni necessarie e che esse in realtà sono estremamente più articolate di quanto una divulgazione approssimativa faccia credere.

Dall'attenta analisi, anche solo su scala planetaria, emerge infatti quale «ricamo» sia necessario attorno a un sito in grado di alloggiare la Vita.

Se poi la ricerca si estende alle locazioni possibili all'interno della Galassia e ai *fine tuning* (accordature fini) a livello cosmologico, il quadro complessivo ci racconta la «cura» che il Creatore ha posto per noi e per tutti gli eventuali altri, alloggiati in probabili altri mondi.

Quale tipo di vita?

Innanzitutto bisogna specificare a quale vita ci stiamo riferendo e non può che trattarsi di quella che conosciamo. Seguono quindi le richieste essenziali perché questa si possa realizzare e le scale astrofisiche principalmente coinvolte.

Possiamo apprendere i vincoli che ci sono per il sorgere e svilupparsi della vita studiando il nostro sistema solare (Ss) in cui appare quanto essa sia da considerarsi come un avvenimento speciale dato che, come vita complessa, si trova in uno solo fra la decina dei pianeti contornati da circa un centinaio di satelliti.

L'introduzione della Teoria Climatica Astronomica diviene indispensabile per poter definire la zona abitabile circumsolare (*Habitable Zone*, HZ). Il passo successivo sarà quello di tradurre le condizioni necessarie per il sistema solare ai sistemi extra-solari, definendo una zona abitabile circumstellare (*Circumstellar Habitable Zone*, CHZ).



Condizioni di abitabilità: nel sistema solare o extra-solare (a destra), nella Galassia (a sinistra), considerando anche gli effetti mareali sulle comete (al centro). Sullo sfondo, l'orizzonte cosmologico (Fecchio M., 2016).

Nella successiva Parte II vedremo come le condizioni per ospitare la vita siano solo parzialmente connesse con la scala planetaria. Come verrà sottolineato, vi è, in generale, una interazione fra il contributo alla vita relativo a una singola scala e ciò che concorre a essa sulle altre scale. In generale il contributo singolo è molto difficile da isolare. Riguarderemo queste interazioni come effetti del secondo ordine limitandoci, in prima approssimazione, alla considerazione degli ingredienti necessari alla vita nella misura in cui essi sono connessi principalmente a una unica scala.

A partire dalle considerazioni iniziali su scala planetaria (Parte I), il problema della quantità di metalli necessari a formare un pianeta come la Terra, le minacce dovute alle esplosioni di supernovae e la possibile iniezione di comete per effetti mareali galattici, ci obbligheranno a prendere in esame una storia più ampia per la vita, che è quella legata alla formazione della nostra galassia, introducendo la zona di abitabilità galattica (*Galactic Habitable Zone*, GHZ).

Da qui poi l'orizzonte si allargherà all'evoluzione cosmologica dentro la quale avviene la costruzione degli elementi chimici a essa indispensabili. Il set di vincoli cosmologici perché la vita possa sbocciare, definirà, dal nostro punto di vista, la abitabilità cosmologica (*Cosmological Habitability*, COSH). In conclusione, la vita con le sue richieste ci porta alla consapevolezza della nostra connessione con l'intero Universo entro cui siamo immersi.

A quale vita ci riferiamo? Naturalmente ci possiamo riferire soltanto a quella sulla Terra, l'unica che conosciamo. Gli ambienti da prendere in considerazione sono quindi quelli adatti a forme di vita complessa aerobica basata sull'ossigeno e sul carbonio, escludendo quindi l'ampio spettro di forme di vita limitato al solo livello di microorganismi. Inoltre tutti gli organismi a noi noti, richiedono la presenza di acqua liquida, almeno durante parte del ciclo della loro vita.

Quindi le richieste essenziali, in ordine di priorità decrescente [2] sono (in parentesi le scale astrofisiche principali di riferimento):

- la presenza dei mattoni, cioè gli elementi chimici di base per formare i composti organici: carbonio, ossigeno, azoto e un po' meno essenziali, fosforo, zolfo, ferro (COSH).
- Un tempo sufficientemente lungo, come ci insegna l'esperienza sulla Terra. Infatti gli organismi unicellulari necessitano di almeno un miliardo di anni per apparire dopo la formazione del pianeta. Inoltre per raggiungere forme di vita complesse, pluricellulari è necessario aggiungere ancora circa 2.7 miliardi di anni (Figura 1) (GHZ, COSH).
- Condizioni planetarie adatte per ospitare la vita, vale a dire stabilità orbitale e di conseguenza ambienti dotati di stabilità in temperatura e in pressione atmosferica (i composti organici devono non solo potersi formare ma rimanere stabili), con valori compatibili con la presenza di acqua liquida sulla superficie (CHZ).
- L'ambiente deve inoltre permettere la formazione di lunghe catene biologiche molecolari (CHZ e GHZ).

La vita umana potrebbe richiedere vincoli ancora più stringenti.

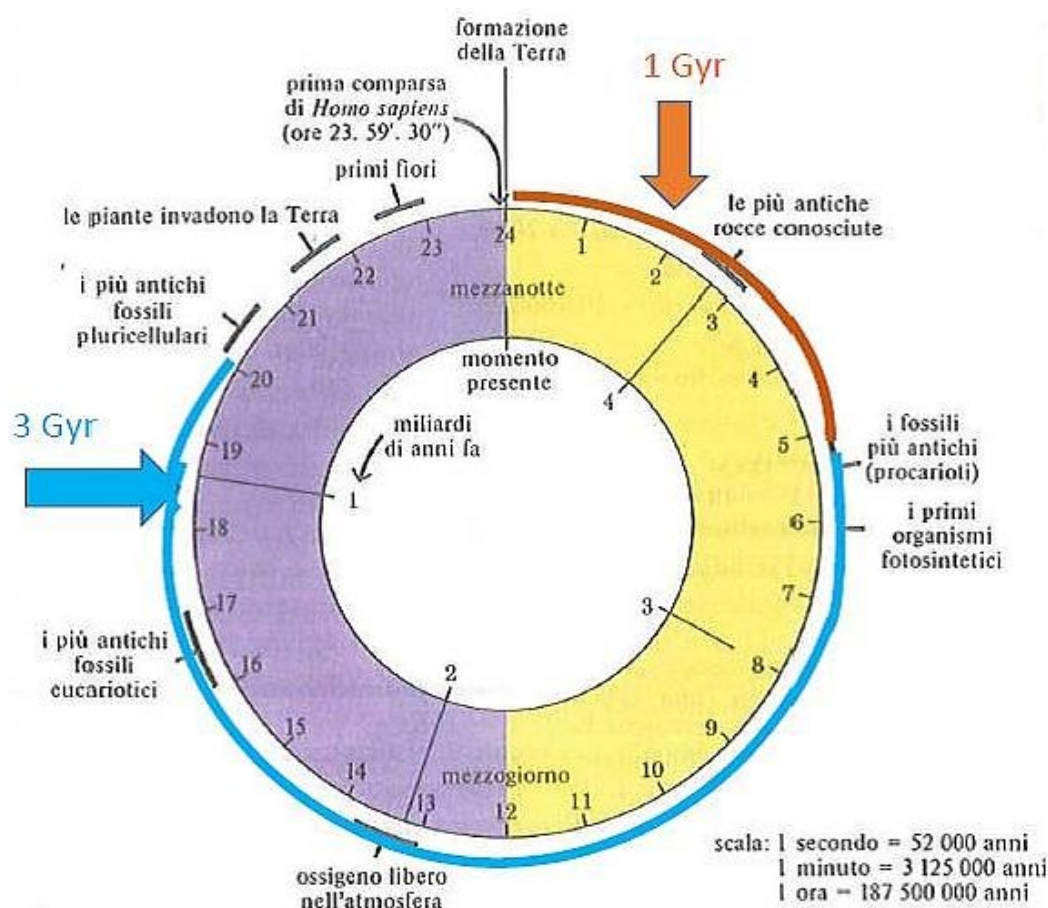


Figura 1— Quadrante del tempo biologico: la vita apparve relativamente presto nella storia della Terra, prima delle sei su una scala di ventiquattro ore (corrispondenti a 4.5 miliardi di anni dalla formazione del sistema solare; minuti e secondi corrispondenti sono dati nella legenda) appaiono i primi organismi unicellulari (linea e freccia rosse corrispondenti circa a un miliardo di anni).

I primi organismi pluricellulari non appaiono però se non la sera circa alle venti (linea e freccia azzurra, corrispondente all'aggiunta ancora di circa 3 miliardi di anni).

L'Homo Sapiens è l'ultimo arrivato, circa trenta secondi prima della mezzanotte [3]

Le diverse scale di abitabilità

Le richieste essenziali viste sono principalmente connesse, attraverso fenomeni fisici, alle tre scale di abitabilità considerate:

- i. quella locale o planetaria, il che significa una richiesta di delimitare una zona abitabile circumstellare (CHZ); l'effetto serra e la presenza di acqua liquida saranno usati come criteri di abitabilità;
- ii. quella galattica, che richiede la definizione di una zona di abitabilità galattica (GHZ); i principali ingredienti da prendere in esame sono: la quantità di metalli per avere un pianeta di tipo terrestre, l'effetto delle esplosioni di supernovae, gli effetti mareali galattici sulle comete e il tempo necessario perché si possa sviluppare una vita complessa;
- iii. quella cosmologica, che coinvolge il legame fra la vita e l'evoluzione dell'Universo. Parleremo in proposito di abitabilità cosmologica (COSH).

Spesso i vincoli speciali richiesti sono in grado di connettere una scala all'altra con a volte una cospirazione fra i fenomeni che in esse avvengono, difficili da sciogliere.

La peculiarità della Terra

Il nostro pianeta possiede varie proprietà molto peculiari che lo rendono idoneo alla vita:

- a. il suo moto di rivoluzione attorno al Sole si svolge a una distanza da esso 1 AU (= $1.496 \cdot 10^{11}$ m) in modo da permettere di avere in superficie l'acqua allo stato liquido, solido e di vapore;
- b. l'atmosfera della Terra è composta principalmente di azoto e ossigeno;
- c. l'intensità del suo campo magnetico (0.3-0.4 Gauss) è la più alta fra quella dei pianeti terrestri e serve a protezione dai raggi cosmici e dal vento solare (*Figura 2*);
- d. fra i pianeti terrestri la Terra possiede la massa maggiore così come la sua dimensione. Questo fa sì che la velocità di fuga (vale a dire la minima velocità per sfuggire al suo campo gravitazionale) sia molto alta (11.2 Km/s). La conseguenza è la stabilità della sua atmosfera, dato che la perdita di molecole atmosferiche per agitazione termica diventa piuttosto difficile;
- e. l'unico satellite che possiede è la Luna che è sufficientemente pesante ($\approx 1/80 M_0$ rapporto più alto nel Ss) e sufficientemente vicina ($\approx 30 d_0$) da stabilizzare l'obliquità della Terra, permettendo il regolare succedersi delle stagioni su lunghi tempi scala.

Il confronto con Venere e Marte è riassunto nella *Tabella 1* (jpl.nasa.gov).

Dati	Venere	Marte
Distanza dal Sole	0,72 UA	1.5 UA
Atmosfera	96,5% di CO ₂	95% di CO ₂
Temperatura al suolo	460 °C (733K)	-60°C (210K)
Pressione al suolo	Come a 1km di profondità negli oceani terrestri	Meno dell'1% di quella terrestre
Satelliti	Nessuno	Phobos e Deimos (non sufficienti a stabilizzare l'orbita)
Campo magnetico	Molto debole	Praticamente assente
Acqua allo stato liquido	Assente	Assente
Velocità di fuga	10.4 km/s	5.04 Km/s
Altezza di scala dell'atmosfera	15 km	11 km

Nelle Figure 2a e 2b, in questa pagina, sono confrontati anche i gradienti di temperatura determinanti per l'effetto serra (per esempio la tendenza del vapore d'acqua a sfuggire dalla Terra è minima).

Non è così per Venere, e Marte [4] come si può vedere alla pagina seguente) nelle Figure 3a e 3b.

Figura 2a
Gradiente di temperatura
per l'atmosfera della Terra

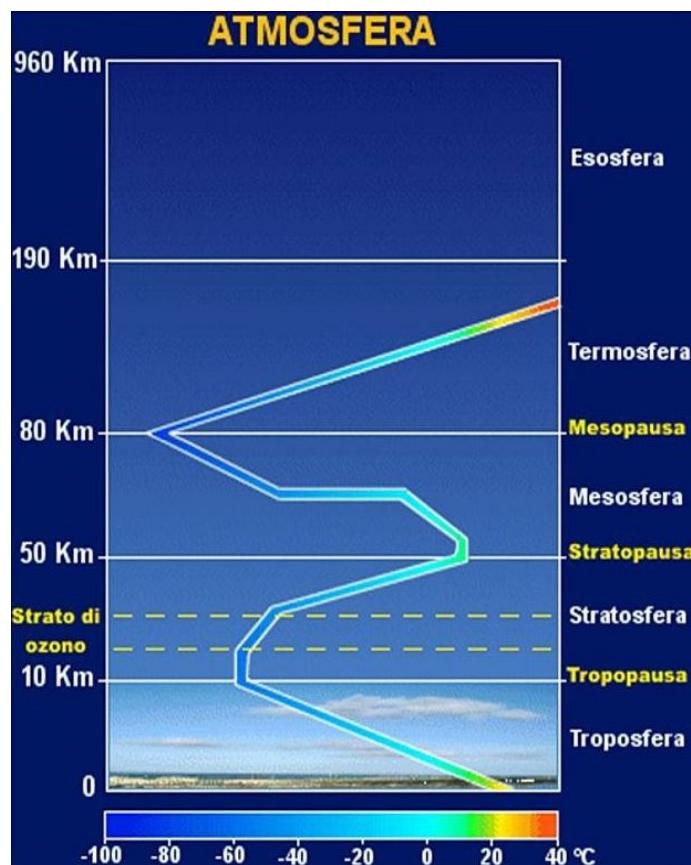
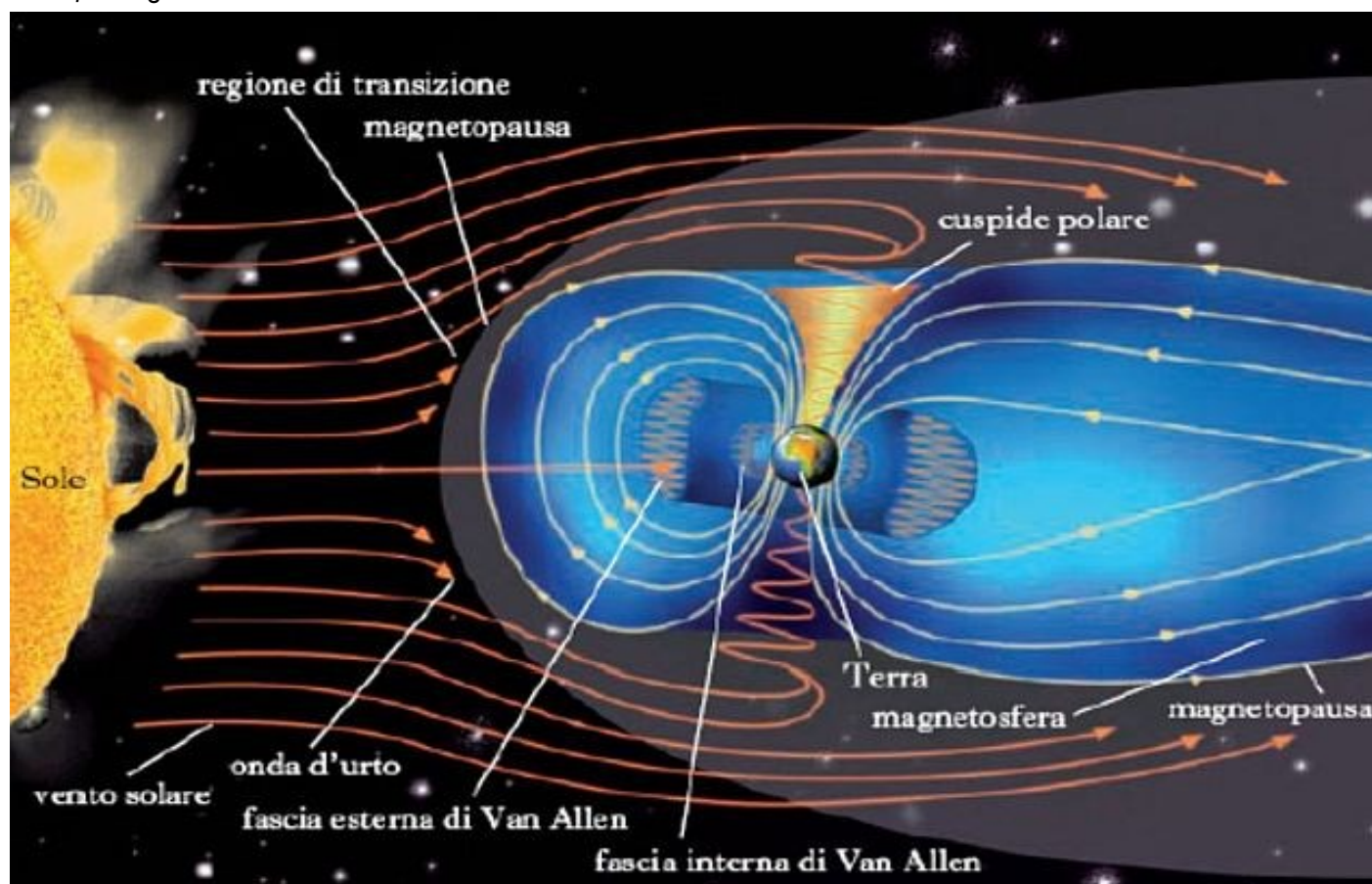


Figura 2 b
Rappresentazione artistica del
campo magnetico della Terra



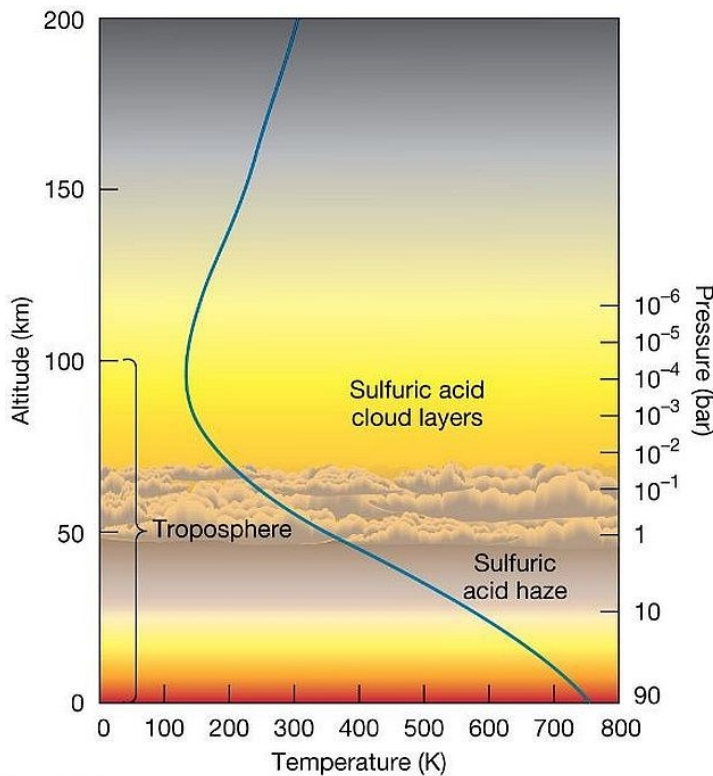


Figura 3a - Gradiente di temperatura per l'atmosfera di Venere

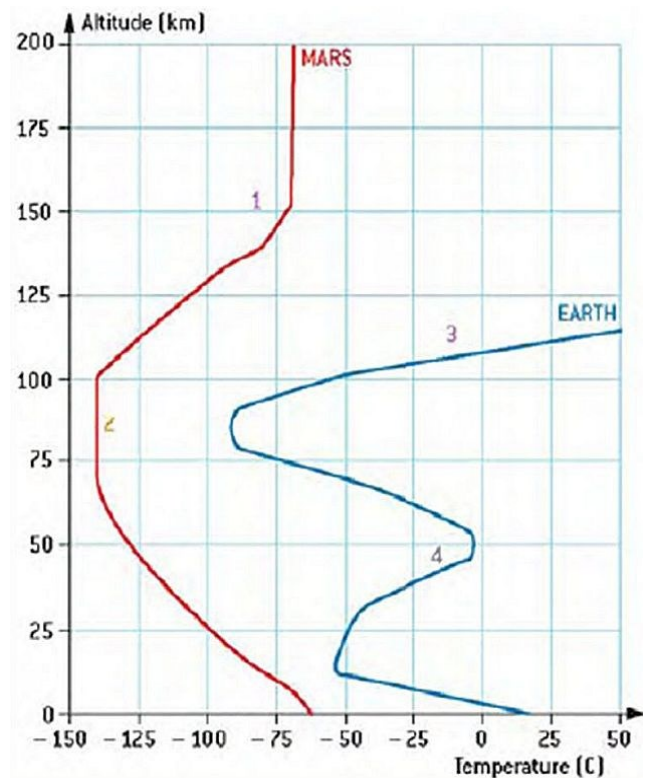


Figura 3b - Gradiente di temperatura per l'atmosfera di Marte (linea rossa), confrontato con quello terrestre (linea blu)

Relazione fra la storia climatica e la dinamica

Fin dall'inizio del Novecento sono stati formulati modelli in grado di legare la storia climatica di un pianeta con la sua dinamica entro il sistema solare. Si tratta della così detta Teoria Climatica Astronomica [5].

Con riferimento alla Terra, la sua temperatura media non è solo dipendente dalla distanza dal Sole (che pure determina il flusso solare che le arriva) ma anche, come vedremo, dalla sua dinamica e dal suo modello di atmosfera [4] e [6].

In generale per un pianeta i principali elementi orbitali per determinare la sua temperatura, sono: l'eccentricità e , la longitudine del perielio ϖ , l'obliquità θ , il semiasse maggiore della sua orbita a . L'insolazione media durante un periodo di rivoluzione, diviene al polo [5]:

$$\langle I \rangle = S \frac{\sin \theta}{\pi} (1 - e^2)^{-1/2} \quad (1)$$

Dove S è la costante solare, S_0 ($= 1360 \text{ W/m}^2$) scalata alla distanza del pianeta in AU.

Sull'obliquità della Terra

A causa della veloce rotazione attorno al suo asse, la forma della Terra diviene sferoidale con un semiasse equatoriale di circa 21 km in eccesso sul semiasse minore.

Questo causa la precessione luni-solare dell'asse di rotazione, con un periodo uguale a circa, $T_{p0} \approx 26000$ anni la più veloce nel S_s (per esempio, per Marte, $T_{pM} \approx 175000$ anni). Con tale precessione la Terra evita l'effetto dinamico dovuto a Giove e ai pianeti più grossi che tenderebbero a piegare il suo asse di rotazione in un tempo scala di circa 100.000 anni.

In Figura 4 si può vedere come cambierebbe l'obliquità della Terra non appena si rimuovesse la Luna spostandola dalla posizione attuale, 60.3 raggi terrestri (linea continua), a 66.5 raggi terrestri (linea tratteggiata).

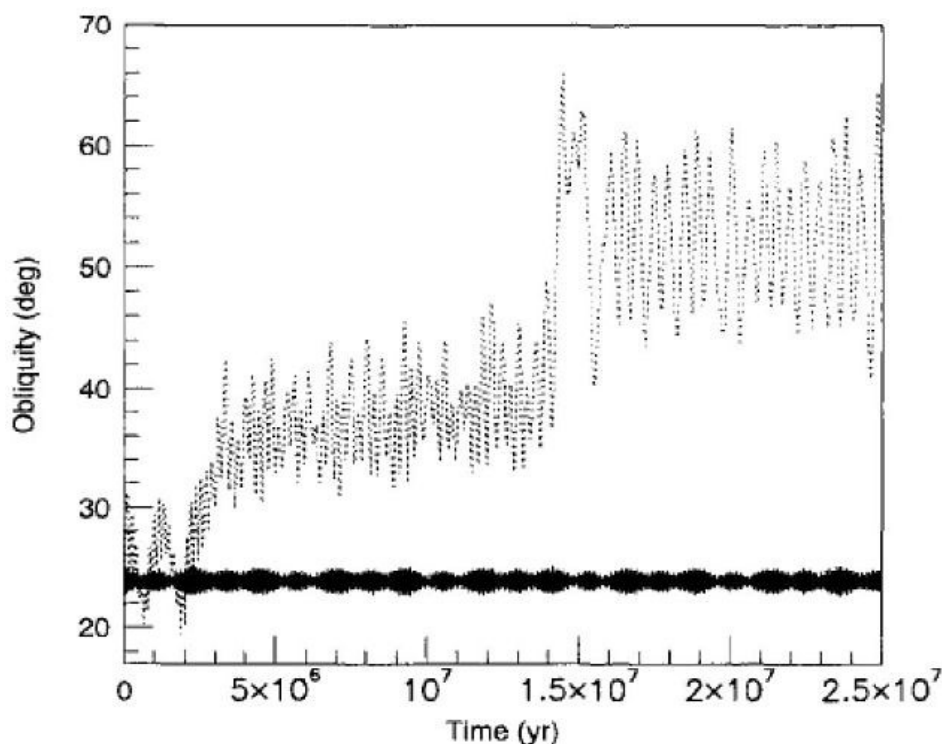


Figura 4 - Confronto obliquità della Terra con la Luna a 60.3 raggi terrestri (attuale, linea continua) e a 66.5 raggi terrestri (linea punteggiata) [7]

In Figura 5 c'è il confronto con l'andamento dell'obliquità per Marte per il quale le due piccole lune Phobos e Deimos non sono in grado di evitare le variazioni del suo asse di rotazione fino a $\pm 15.4^\circ$ attorno al valore medio 23.4° .

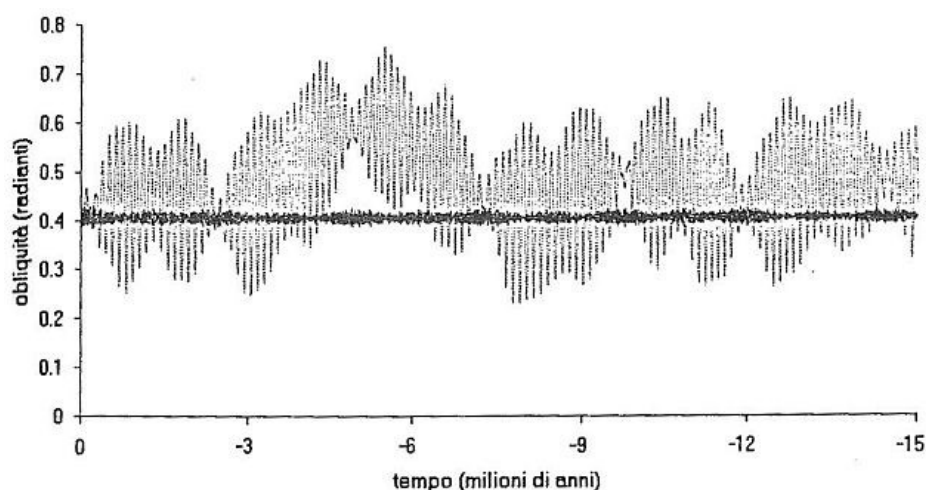


Figura 5 - Confronto dell'andamento dell'obliquità di Marte nel sistema Marte-Phobos-Deimos (linea punteggiata) con quello relativo alla Terra nel sistema Terra-Luna (linea continua) per quindici milioni di anni prima d'ora (superiore) e quindici milioni di anni da ora (inferiore). Le oscillazioni massime di Marte sono di $\pm 15.4^\circ$ attorno al valore medio 23.4° (simulazioni di Tomasella, 1992 [8])

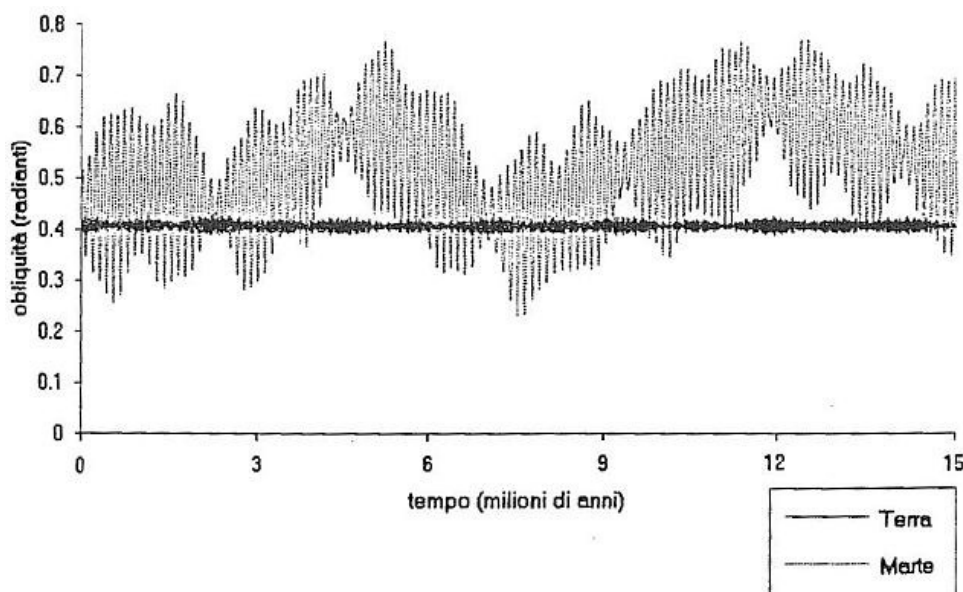


Figura 6 – Lo stesso confronto dell'andamento dell'obliquità di Marte per quindici milioni di anni da ora [simulazioni di Tomasella, 1992 [8]]

Un modello semplificato di atmosfera

Come anticipato, la temperatura superficiale di un pianeta non dipende solo dalla sua distanza dal Sole ma anche dalla atmosfera che esso possiede. Per capire come questa gioca, facciamo uso di un modello molto semplificato, introducendo l'effetto serra.

Schematizziamo l'atmosfera come un corpo semi-opaco costituito da uno strato di gas serra, con coefficiente di emissività ϵ , e temperatura T_a , in grado di emettere egualmente sia verso l'esterno sia verso l'interno.

Se T_e è la temperatura effettiva di un corpo nero che riceve il flusso S_0 dal Sole e ne riflette la frazione A (albedo), il bilancio radiativo, per un pianeta senza atmosfera a esso assimilabile, diviene:

$$(1 - A) S_0 / 4 = \sigma T_e^4 \quad (2)$$

con σ costante di Stefan-Boltzmann.

Al primo termine va aggiunto, in presenza di atmosfera, il termine, $\epsilon \sigma T_a^4$ mentre nel primo termine, T_e va sostituita con la temperatura reale della superficie del pianeta con atmosfera, T_s .

Le due temperature risultano allora essere legate dalla seguente equazione [6]:

$$\frac{T_s^4}{T_e^4} = 1 / (1 - \frac{\epsilon}{2}) \quad (3)$$

Nella Tabella 2 si vede come l'effetto serra aumenti, come ci si aspettava, la temperatura superficiale, rispetto a quella che il pianeta avrebbe avuto senza atmosfera (pari a -18 °C nel caso della Terra).

Pianeta	$S(\text{erg}/\text{cm}^2\text{sec})$	A	ϵ	$T_e(\text{K})$	$T_s(\text{K})$
Terra	$1.37 \cdot 10^6$	0.30	0.6	255	288
Marta	$0.59 \cdot 10^6$	0.24	0.09	213	218

Tabella 2 - Temperature effettive e superficiali per Terra e Marte in base al flusso solare, all'albedo e all'emissività [8].

Sull'effetto serra

Vari elementi intervengono nel determinare l'effetto serra. Una frazione del flusso solare viene riflessa per l'albedo che dipende, con il coefficiente ϵ :

dall'estensione delle terre emerse;

da quella relativa alle sostanze volatili condensate (estensione delle calotte di ghiaccio, dei mari e oceani e dalla conformazione delle nubi).

Nel caso della Terra, la radiazione UV nel range 200-300 nm, è assorbita dall'ozono nella stratosfera mentre la radiazione IR viene assorbita dalla troposfera (Figura 2) ed è a sua volta diffusa verso l'interno, grazie alla presenza del vapor acqueo e della CO_2 , due fattori fondamentali nel determinare l'effetto serra (Figura 8 alla pagina seguente).

La quantità di CO_2 atmosferica, dipende criticamente dal ciclo geochimico carbonati-silicati che ha alla base la reazione di equilibrio di Urey (1952):



Il suo tempo scala è compreso fra 100000 e alcuni milioni di anni [6]. Il senso della reazione è il seguente: cattura di CO_2 da parte delle rocce della crosta terrestre dando luogo a carbonati CaCO_3 con l'acqua come catalizzatore (le rocce possono fissare una quantità di diossido di carbonio fino a 250 volte quello dell'atmosfera).

L'attività tettonica (Figura 7), a sua volta, permette, mediante la subduzione dei sedimenti, la ri-circolazione di CO_2 tramite eruzioni vulcaniche [3]. Altri fattori importanti connessi all'effetto serra, sono il processo di fotolisi e la presenza di aerosol.

Il primo è causato da fotoni energetici nella banda UV che sono in grado di rompere le molecole di acqua causando, di conseguenza, perdita di idrogeno.

Le particelle di aerosol (dimensioni tipiche: 10^{-9} - 10^{-6} m) provengono sia dalle emissioni vulcaniche sia dall'attività umana. Producono una ridistribuzione della radiazione solare e possono causare drastici cambiamenti nella temperatura atmosferica.

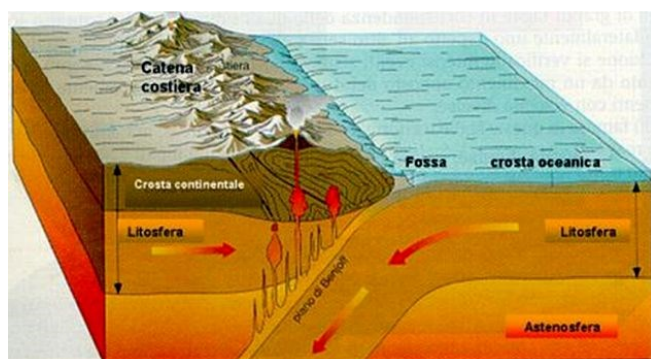


Figura 7 – Tettonica a placche, subduzione dei sedimenti e restituzione di CO_2 tramite eruzioni vulcaniche

Zona abitabile circumstellare per il sistema solare

Viene introdotto innanzi tutto un modello climatico standard per la Terra e pianeti terrestri. L'atmosfera ha come ingredienti: $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$. L'anidride carbonica è governata dal ciclo carbonati-silicati, visto prima con un *feedback* negativo, nel senso che un aumento di temperatura fa diminuire la quantità di anidride carbonica, producendo un raffreddamento della superficie.

L'effetto opposto avviene quando la temperatura si raffredda. La pressione del vapore d'acqua alla superficie è una funzione della temperatura superficiale. In molti calcoli N_2 è a 1 bar di pressione mentre CO_2 ha una pressione parziale variabile. Nubi di vapore d'acqua e di anidride carbonica non vengono considerate data la difficoltà di modellarle.

Il modello radiativo (proposto per la prima volta da Kasting,[4]) funziona nel modo seguente:

- viene fissata una temperatura superficiale, che non è quindi dovuta solo al flusso solare ma anche al concorso di vari fattori climatici che contribuiscono all'effetto serra; il modello calcola il flusso solare F_S incidente e quello infrarosso uscente F_{IR} all'estremità superiore dell'atmosfera (Figura 8).
- Il loro rapporto fornisce l'effettivo flusso solare: $S_{eff} = \frac{F_{IR}}{F_S}$
- Questo scala come: $S_{eff} \sim 1/d^2$, passando da 1 AU a d AU.
- Non appena la stella centrale cambia la sua luminosità L , viene a valere la seguente legge di scala:

$$d = 1 \text{ AU} \left(\frac{(L/L_\odot)}{S_{eff}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

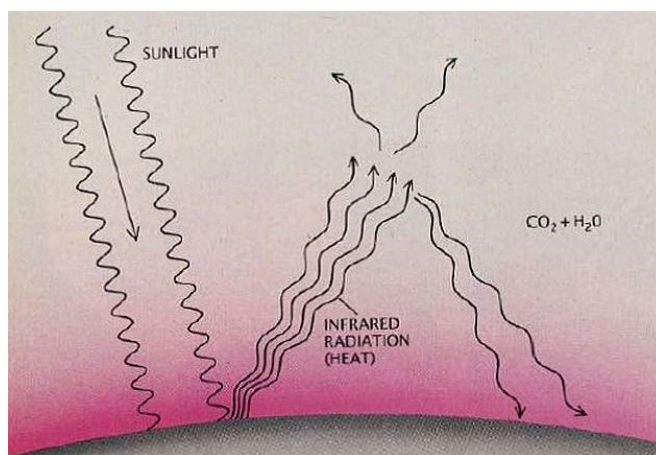


Figura 8 - Rappresentazione qualitativa dell'effetto serra [4]

Limiti Interni

Vengono calcolati due limiti interni per pianeti simili alla Terra (Figure 9a, 9b, 9c):

- il primo è il limite dell'effetto serra umido (moist greenhouse) o limite della perdita d'acqua (water loss). Avviene a una temperatura superficiale di 340 K (circa 67 ° C, quando $S_{eff} = 1,015$ [9]). Il contenuto di vapore d'acqua nella stratosfera cresce drammaticamente, più di un ordine di grandezza. La distanza corrispondente dal Sole è $d = 0.99$ AU (Eq.5);
- il secondo limite è quello della perdita dell'effetto serra (runaway greenhouse). Per tale limite, che corrisponde a $d = 0.97$ AU (Eq.5), gli oceani evaporano completamente. Avviene ad una temperatura superficiale di circa 1800 K (circa 527 ° C) [9].

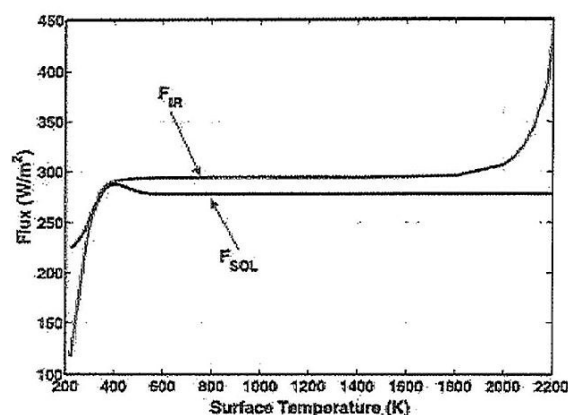


Figura 9a - Andamento dei flussi, $F_S (= F_{SOL}), F_{IR}$ in funzione della temperatura superficiale del pianeta [9].

Figura 9b - Andamento dell'albedo in funzione della temperatura superficiale del pianeta [9].

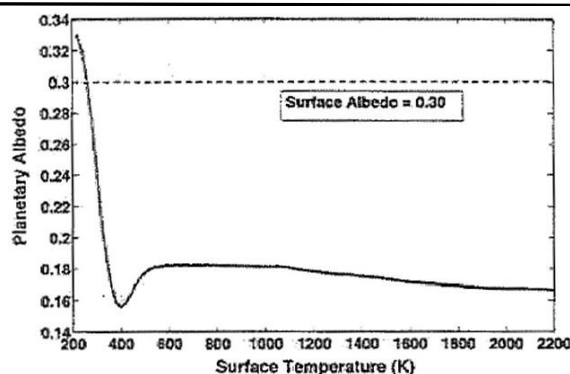
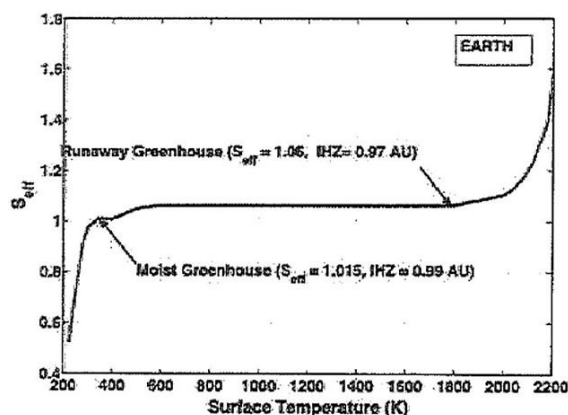


Figura 9c - Andamento di S_{eff} in funzione della temperatura superficiale del pianeta [9].



Limite esterno

La temperatura superficiale di un pianeta simile alla Terra è mantenuta costante e pari a 273 K (circa 0 °C) con una pressione di 1 bar per N_2 e una pressione parziale di CO_2 variabile da 1 a 35 bar [7].

All'aumentare della distanza d dal Sole si giunge a un limite *massimo di effetto serra* (*maximum greenhouse*) dovuto alla cospirazione di due effetti: una diminuzione di F_s a causa del crescere della distanza e un calo contemporaneo anche di F_{IR} dato che l'albedo cresce (Figure 10a, 10b, 10c); tutto ciò in accordo alla legge di Kirchhoff secondo la quale il flusso emesso cala con il calare di quello assorbito.

Si raggiunge tale limite esterno per $d = 1.67$ AU (Eq.5). Oltre questa distanza la temperatura superficiale fissata non è più garantita dall'effetto serra e cala quindi sotto 0 °C.

Figura 10a - Andamento dei flussi, $F_s (=F_{sol}), F_{IR}$ in funzione della pressione parziale di CO_2 [7]

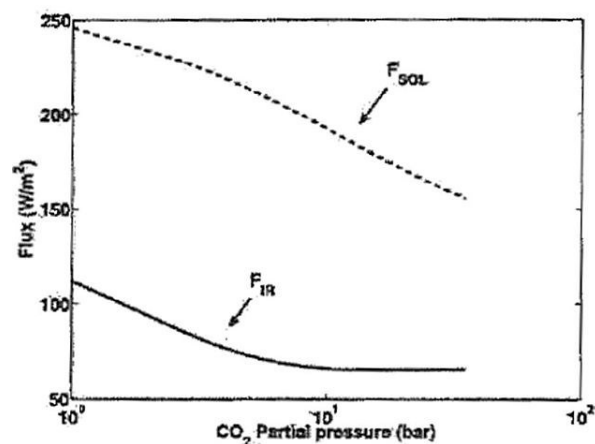
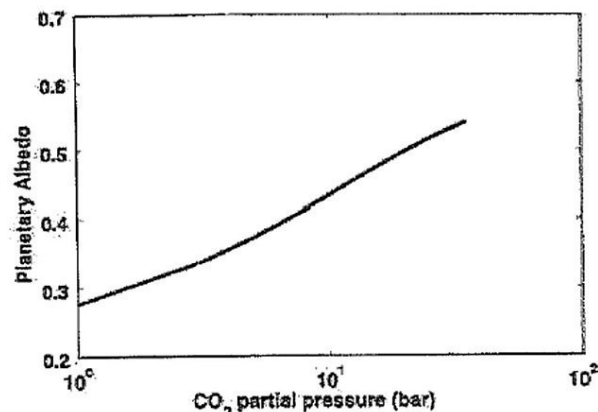


Figura 10b - Andamento dell'albedo in funzione della pressione parziale di CO_2 [7]



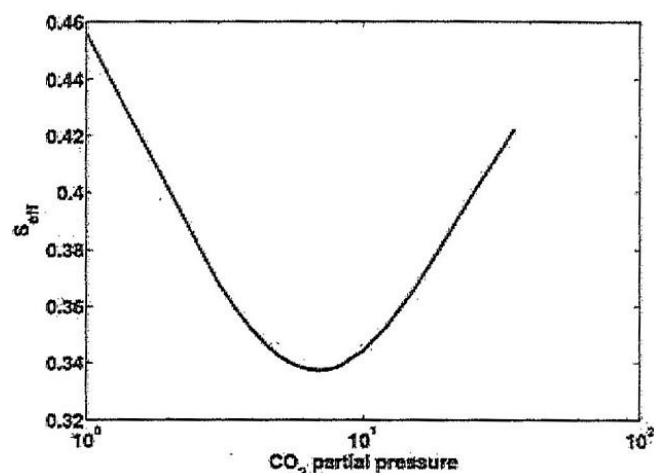


Figura 10c - Andamento di S_{eff} in funzione della pressione parziale di CO_2 [7]

Venere e Marte come limiti

Venere si trova troppo vicina al Sole (0.72 AU) rispetto al limite interno trovato di 0.97 AU. Tuttavia si valuta per essa una distanza di 0.75 AU ([6]; [9]) come il terzo limite interno, tenendo conto che il Sole all'inizio aveva una luminosità minore (circa il 92% di quella attuale). In altre parole si presume che essa fosse al limite del *runaway greenhouse* che ha poi causato l'assenza di acqua per almeno un miliardo d'anni.

Un discorso analogo vale anche per Marte che, pur distando dal Sole di 1.52 AU, deve essere portato, al tempo della sua formazione, a una distanza pari a 1.77 AU, tenendo conto che la sua superficie è vecchia di 3.8 miliardi di anni e che quindi la luminosità solare allora era di circa il 75 % inferiore.

Esce quindi anche Marte dalla fascia di abitabilità. Anche se la questione è ancora aperta, le osservazioni sembrano indicare che *Marte iniziale* (*Early Mars*) fosse sufficientemente caldo da avere acqua liquida che scorreva sulla sua superficie.

Zona abitabile circumstellare per sistemi extra-solari

Il modello climatico considerato viene poi esteso al caso in cui al centro del sistema planetario si trovi una stella di sequenza principale diversa dal Sole, in generale di tipo spettrale F, G, K, M con temperature effettive $T_{eff} = 2600 \div 7200$ K. La relazione fra il rapporto dei flussi (S_{eff}), calcolati al margine superiore dell'atmosfera di un pianeta simile alla Terra e le temperature T_{eff} viene data dallo sviluppo in serie:

$$S_{eff} = S_{eff\odot} + aT_{\star} + bT_{\star}^2 + cT_{\star}^3 + dT_{\star}^4 \quad (6)$$

con

$$T_{\star} = T_{eff} - 5780 \text{ K} \quad (7)$$

In Tabella 3 vengono riportati i coefficienti a , b , c , d (Eq.6,7).

Constant	Recent Venus	Runaway Greenhouse	Moist Greenhouse	Maximum Greenhouse	Early Mars
$S_{eff\odot}$	1.7763	1.0385	1.0146	0.3507	0.3207
a	1.4335×10^{-4}	1.2456×10^{-4}	8.1884×10^{-5}	5.9578×10^{-5}	5.4471×10^{-5}
b	3.3954×10^{-9}	1.4612×10^{-8}	1.9394×10^{-9}	1.6707×10^{-9}	1.5275×10^{-9}
c	-7.6364×10^{-12}	-7.6345×10^{-12}	-4.3618×10^{-12}	-3.0058×10^{-12}	-2.1709×10^{-12}
d	-1.1950×10^{-15}	-1.7511×10^{-15}	-6.8260×10^{-16}	-5.1925×10^{-16}	-3.8282×10^{-16}

Tabella 3 – Dati per lo sviluppo in serie del flusso S_{eff} .

Le distanze limite della HZ (Figure 11 e 12a, 12b, 12c) vengono calcolate mediante la (5) con i valori di S_{eff} per i tre limiti: *runaway greenhouse*, *moist greenhouse* e *maximum greenhouse* calcolati usando i corrispondenti coefficienti, sia per il sistema solare (prima linea) sia per sistemi extra-Solari con al centro una stella di sequenza principale.

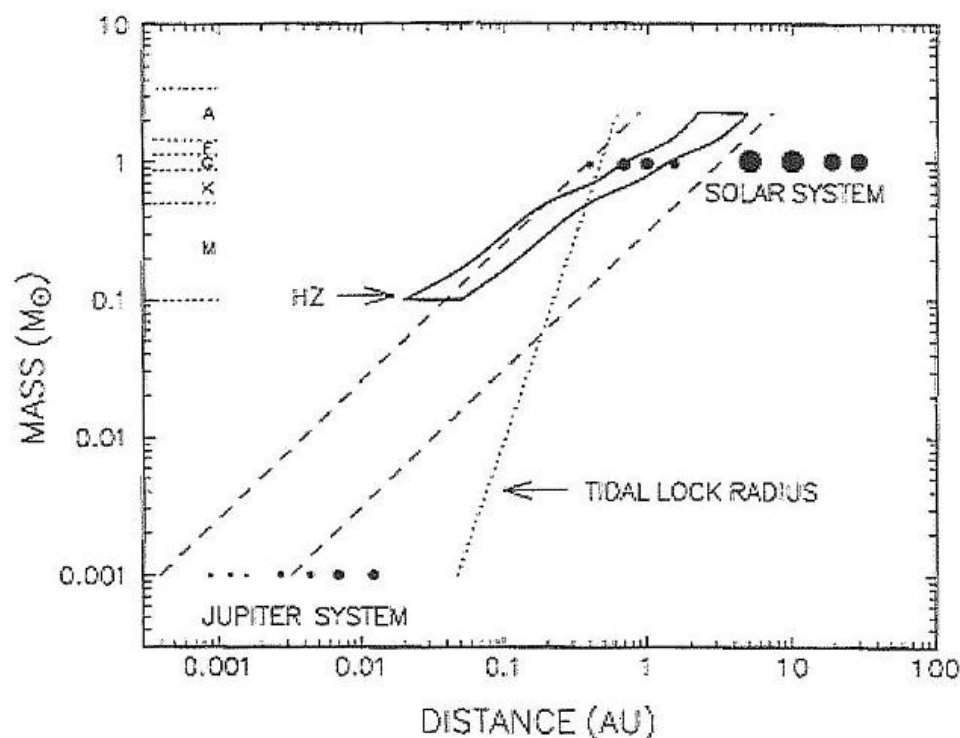


Figura 11 – È mostrata la zona di abitabilità (HZ) (in continuo) per stelle di sequenza principale, in funzione della massa stellare (in masse solari) e della distanza dei pianeti (in AU).

Il limite inferiore di distanza per la rotazione sincrona di un pianeta, è dato dalla linea punteggiata.

Le linee tratteggiate delimitano la probabile regione di formazione di pianeti terrestri attorno alle stelle considerate [4]



Figura 12a — Zona di abitabilità per il sistema solare (0.97-1.67 UA [9] - per Marte iniziale, v.testo).



Figura 12b — Zona di abitabilità per un sistema extra-solare, con al centro una stella tipo M (per esempio Gliese 667 C).

La CHZ (fascia verde) si estende fra 0.1-0.3UA (solstation.com/planets/super-earths.htm), con le posizioni di Venere, Terra e Marte come riferimento.

Da notare come questa si sia avvicinata molto alla stella stessa

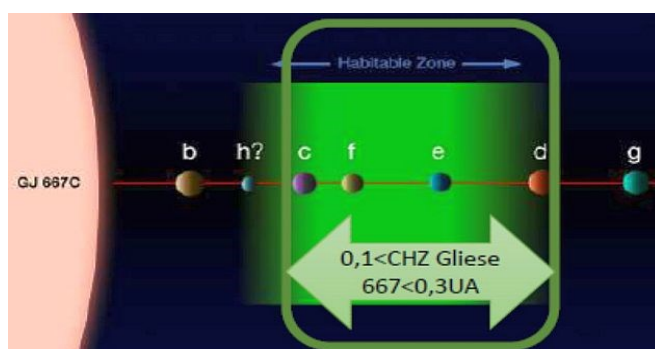


Figura 12c — Rappresentazione artistica dell'ingrandimento della CHZ (in verde) della stella tipo M, immaginando che essa sia Gliese 667 C; ciò rende possibile rappresentare la posizione dei suoi possibili pianeti (dati in Tabella 4) entro la fascia (contorno verde) calcolata mediante i dati di Tabella 3.

Pianeta	Tipo	Massa	Periodo orb.	Sem. maggiore	Eccentricità
b	Super Terra	$\geq 5,94 M_{\oplus}$	7,2 giorni	0,0504 UA	0,112
c	Super Terra	$\geq 3,86 M_{\oplus}$	28,12 giorni	0,125 UA	0,001
f	Super Terra	$\geq 1,94 M_{\oplus}$	39,08 giorni	0,156 UA	0,001
e	Super Terra	$\geq 2,68 M_{\oplus}$	62,266 giorni	0,212 UA	0,001
d	Super Terra	$\geq 5,21 M_{\oplus}$	92,09 giorni	0,276 UA	0,019
g	Super Terra	$\geq 4,41 M_{\oplus}$	251,52 giorni	0,539 UA	0,107

Tabella 4 - Dati del sistema planetario con al centro la stella Gliese 667 C [11]

Conclusione

È importante sottolineare come i criteri per stabilire la fascia di abitabilità individuata, abbiano ruotato intorno a due uniche condizioni (fra loro collegate) necessarie, ma da sole non sufficienti per ospitare la vita: si tratta di garantire sia una temperatura ragionevole sul pianeta (e questa dipende non solo dalla sua distanza dal Sole ma anche da tutti i fattori climatici che contribuiscono all'effetto serra) sia, di conseguenza, la presenza di acqua liquida.

Se si confrontano questi due requisiti con l'elenco delle peculiarità della Terra (alcune) ci si rende conto immediatamente che vengono evasi molti altri requisiti necessari per garantire la vita e come quindi pianeti extra-solari che si trovino entro la fascia di abitabilità possano essere, di fatto, non abitabili.

Tutto ciò a sottolineare, come emergerà anche nella Parte II, la fine architettura entro cui la vita è incastonata.

[Vai al PDF della SECONDA parte dell'articolo](#)

[Vai al PDF della TERZA parte dell'articolo](#)

Marco Fecchio, Luigi Secco, Francesco Marzari

(Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università degli Studi di Padova - marco.fecchio84@libero.it, luigi.secco@unipd.it, francesco.marzari@pd.infn.it)

Indicazioni bibliografiche

- [1] Gillon M. et al. (29 coautori), *Nature*, 542, 456-460, 2017.
- [2] Dallaporta N. e Secco L., *Il Principio Antropico in fisica ed in cosmologia*, Giornale di Fisica, Ed. Compositori Bologna, Vol. 34, N. 3, 163-192, 1993.
- [2] Curtis H. e Barnes N. S., *Invito alla biologia*, Ed. Zanichelli, 1991]
- [4] Kasting J., Toon B. e Pollack J., *L'evoluzione del clima sui pianeti terrestri*, *Le Scienze*, N. 236, 56-67, 1988.
- [5] Ward W. R., *Large-scale variation in the obliquity of Mars*, *Le Scienze*, 181, 260-262, 1974.
- [6] Kasting J., Whitmire D. P. e Reynolds R. T., *Habitable Zones*, *Icarus*, 101, 108-128, 1993.
- [7] Tomasella L., Marzari F. e Vanzani V., *Evolution of the Earth obliquity after the tidal expansion of the Moon orbit*, *Planetary & Space Science*, Vol. 44, N. 5, 427-430, 1995.
- [8] Tomasella L., Tesi di Laurea Specialistica: *Evoluzione dell'obliquità della Terra e Marte*, Relatore: Vanzani V, Correlatore: Marzari F., Dipartimento di Fisica di Padova, 1992.
- [9] Kopparapu R., Kasting J., Ramirez R., Eymet V., Robinson T. D., Mahadevan S., Terrien R. C., Goldman S. D., Meadows V. e Deshpande R., *Habitable Zones Around Main Sequence Stars: New Estimates*, *ApJ*, 765, 16, 2013.
- [10] Ortolani S., *Dispense di Astrofisica Generale Mod. A*, 2012.
- [11] Anglada-Escudé G., Tuomi M., Gerlach E., Barnes R., Heller R., Jenkins J., Wende S., Vogt S., Butler P., Reiners A. & Jones R. H. A., *A&A*, 556, A126, 2013.
- [12] Fecchio M., Tesi Magistrale in Astronomia: *Abitabilità su scala locale, galattica, cosmologica*, Rel. F. Marzari, Corr. L. Secco, Università di Padova, AA. 2015-2016.

