

Quanto durerà la vita sulla Terra?

Adriano Gaspani

I.N.A.F. - Istituto Nazionale di Astrofisica
Osservatorio Astronomico di Brera - Milano
adriano.gaspani@inaf.it

Introduzione

Prima di affrontare qualsiasi speculazione in merito alla durata della vita sulla Terra è necessario fare alcune considerazioni di natura temporale. In primo luogo sappiamo che l'età attuale della Galassia è dell'ordine dei 10 miliardi di anni, mentre l'età dell'Universo è invece dell'ordine dei 13.7 miliardi di anni. Quando una galassia come la nostra si è formata, la sua composizione chimica prevalente era data dall'idrogeno che risulta anche essere il componente fondamentale delle stelle che si formarono all'interno di essa. La formazione delle stelle è un processo continuo che avviene all'interno delle galassie e insieme alle stelle si formano i loro sistemi planetari. I pianeti di tipo terrestre, quelli che più probabilmente possono ospitare la vita, richiedono la disponibilità di metalli pesanti, quali ad esempio il Carbonio, i quali non sono disponibili nelle fasi iniziali di evoluzione delle galassie, ma sono il prodotto finale dell'evoluzione stellare; e quindi necessario che le prime generazioni di stelle si evolvano e distruggendosi disperdano nello spazio rilevanti quantità di materia contenente metalli pesanti. La questione della metallicità delle galassie è quindi fondamentale dal punto di vista dello sviluppo della vita, almeno come noi la intendiamo, sui pianeti adatti che orbitano intorno alle stelle della galassia nella giusta posizione. Il tempo mediamente necessario perché sia disponibile abbastanza materiale contenente metalli pesanti affinché si possano formare pianeti di tipo terrestre è almeno dell'ordine di (6.4 ± 0.9) miliardi di anni. Curiosamente l'età del Sistema Solare (e quindi della Terra) è più bassa tanto che il valore attualmente accettato è pari a (4.5681 ± 0.004) miliardi di anni, quindi la Terra sembra essere di circa 1.8 miliardi di anni più giovane della media. Nel futuro, però, la vita sulla Terra è destinata a sparire completamente tra qualche tempo a causa del processo evolutivo del Sole che lo porterà inizialmente ad espandersi e poi a contrarsi distruggendo ogni forma di vita sulla Terra. La domanda interessante è però "quando questo avverrà?". Nel presente lavoro cercherò di rispondere a questa fondamentale domanda.

Lo sviluppo della vita

Esiste un certo numero di condizioni che un pianeta appartenente ad un sistema planetario deve soddisfare affinché vi si possa sviluppare la vita. Naturalmente se facciamo l'ipotesi, assai probabile, vista la grande uniformità di leggi fisiche e di composizione chimica nell'universo, ma non certa al cento per cento, che la vita non possa

essere troppo dissimile a quella che conosciamo sulla Terra o perlomeno che tale tipologia di vita sia basata sul DNA in una delle sue infinite combinazioni. Esse sono le seguenti. La stella centrale del sistema planetario dovrebbe essere singola, ma questa non è una condizione strettamente necessaria. Un sistema formato da una stella doppia o multipla impedirebbe lo stabilirsi di orbite planetarie stabili che mantengano almeno uno o due pianeti all'interno della zona di abitabilità. Nel caso dei pianeti più prossimi alle stelle le orbite descritte potrebbero essere piuttosto instabili, ma nel caso dei pianeti posti relativamente lontano, la situazione è molto più favorevole, come la recente scoperta di Proxima Centauri b ha confermato. Il sistema planetario dovrebbe contenere pianeti di massa notevolmente inferiore a quella di Giove, affinché la vita possa svilupparsi ed evolvere. La teoria di Cameron e i calcoli di Dole sembrano favorire questa condizione. La stella non dovrebbe appartenere alla prima generazione di stelle galattiche, perché in tal caso la materia da cui essa e i suoi pianeti si sarebbero formati non conterrebbe sufficienti quantità di carbonio, azoto, ossigeno, zolfo, fosforo, ferro, necessari per la formazione di composti biochimici. Infatti prima di potersi formare la vita è necessario che gli elementi pesanti e complessi si debbano essere formati dall'esplosione di parecchie supernove galattiche. Mediamente il tempo richiesto per la sintesi degli elementi pesanti, in una galassia vecchia di 10 miliardi di anni è di circa 5 miliardi di anni. Questo implica che il materiale necessario alla formazione della vita è disponibile solamente dopo 5 miliardi di anni, quindi tutte le galassie più giovani non hanno ancora avuto il tempo di sintetizzare gli elementi chimici necessari allo sviluppo della vita. L'età dell'Universo è stimata essere pari a 13.7 miliardi di anni e l'età della nostra Galassia è stabilita essere pari a 10 miliardi di anni, quindi le possibili civiltà più vecchie in essa presenti non dovrebbero avere più di metà dell'età della nostra Galassia. La massa della stella intorno a cui orbita il sistema planetario dovrebbe essere compresa grosso modo fra 0.5 e 2 masse solari. Stelle di massa maggiore avrebbero una vita troppo breve per permettere l'evoluzione di forme di vita durature. Stelle di massa più piccola non emettono energia sufficiente ad alimentare la vita anche sui pianeti più vicini al proprio Sole. Abbiamo però casi di pianeti orbitanti intorno ad alcune pulsar senza che siano stati distrutti dal catastrofico destino della loro stella. Dati i rispettivi tempi evolutivi, è probabile che nel caso di stelle di piccola massa, dell'ordine di 0.5 masse solari, la vita microbica sia di gran lunga più abbondante delle forme altamente evolute. La massa di un pianeta candidato allo sviluppo della vita dovrebbe essere abbastanza grande da trattenere un'atmosfera contenente gli elementi base della vita, idrogeno, carbonio, azoto, ossigeno, ma non troppo, come è il caso di Giove, perché l'eccesso di idrogeno distruggerebbe le molecole biochimiche. L'orbita del pianeta dovrebbe essere quasi circolare per evitare variazioni troppo forti di temperatura e illuminamento, e ad una distanza tale da mantenere la temperatura media del pianeta a valori accettabili (fra circa -20 °C e +70 °C). In questo caso la regola è che sulla superficie del pianeta possa sussistere acqua allo stato liquido. Affinché questo avvenga, data la temperatura fotosferica della stella T^* ed il suo raggio R^* , la distanza media ideale R_p (in Unità Astronomiche, paria 149.6 milioni di Km ciascuna) a cui il pianeta dovrebbe essere posizionato perché la vita possa svilupparsi è data da:

$$R_p = R^*/R_s \cdot (T^*/T_s)^2$$

In cui R_s è il raggio del Sole e T_s è la sua temperatura fotosferica pari a 5780 °K. La variazione permessa per R_p è pari a $\pm 0.1 \cdot R_p$ quindi al 10% in più o in meno del valore

ottimale. Questo risultato è molto interessante perché permette di valutare la probabilità Pv che un pianeta entro un sistema planetario possa essere caratterizzato da condizioni favorevoli allo sviluppo della vita in relazione alla sua particolare posizione rispetto alla stella intorno a cui orbita:

$$Pv = e^{-50 \cdot \left(\frac{R}{Rp} - 1 \right)^2}$$

Ricordiamo che di fatto il valore R è il semiasse maggiore dell'orbita descritta dal pianeta intorno alla sua stella, espresso in unità astronomiche (UA). La terza legge di Keplero eserciterà dei vincoli sul periodo orbitale P (espresso in anni solari) di quel particolare pianeta; quindi per una data massa M^* (espressa in masse solari) della stella sarà previsto un determinato periodo orbitale perché la vita possa svilupparsi su un determinato pianeta. Tenendo conto che la massa del pianeta può essere trascurata rispetto a quella della stella intorno a cui orbita abbiamo:

$$P = \sqrt{(R^3/M^*)}$$

Nel caso della distanza ottimale Rp per lo sviluppo della vita, la terza legge di Keplero ci fornisce un periodo orbitale Po dato da:

$$Pa = \sqrt{(Rp^3/M^*)}$$

L'atmosfera del pianeta dovrebbe essere tale da permettere la formazione di molecole organiche e da proteggere il suolo dalla radiazione ultravioletta. Il pianeta dovrebbe anche essere dotato di un campo magnetico abbastanza rilevante in modo la sua magnetosfera possa essere in grado di bloccare le particelle cariche provenienti dalla stella centrale. Ci dovrebbe poi essere abbondante quantità di acqua allo stato liquido. Si ritiene che gli oceani forniscano l'ambiente più adatto perché avvenga la sintesi di molecole complesse prebiotiche e anche dei più semplici organismi viventi. È necessaria anche l'esistenza di una superficie solida, ritenuta necessaria perché le complesse molecole dette monomeri si trasformino in polimeri. Tutte queste condizioni sono ricalcate esattamente sulle condizioni riscontrate sulla Terra. Ma non tutti i bioastronomi sono d'accordo poiché sotto queste condizioni, la vita che si svilupperebbe è praticamente quella di tipo terrestre, ma le varietà di vita possibile nell'universo potrebbero essere abbastanza differenziate. Una piccola minoranza pensa che la vita non debba necessariamente avere la stessa origine ed essere ovunque basata su RNA e DNA. Secondo loro, dunque, la vita potrebbe essere molto più diffusa di quanto ritiene la maggioranza, perché non sarebbe necessariamente soggetta a tutte le restrizioni che le nostre forme di vita terrestre richiedono. Essi osservano che conosciamo molto poco a proposito dell'origine della vita; che in base alle nostre conoscenze non è affatto detto che essa sia cominciata con RNA; non abbiamo alcuna informazione su altre basi su cui possa svilupparsi la vita; nessuna delle nostre attuali conoscenze esclude forme di vita basate su sistemi materiali molto diversi. Perciò la nostra ignoranza sui processi chimici che sono stati all'origine delle forme di vita che noi conosciamo, richiede una buona dose di prudenza nel porre restrizioni sull'origine di esseri viventi. Secondo il chimico R. Shapiro e il fisico G. Feinberg, esistono solo tre

condizioni essenziali, e cioè: disponibilità di energia; un sistema di materia capace di interagire con l'energia e di usarla per diventare un sistema ordinato; e infine abbastanza tempo a disposizione per costruire quella complessità che è associata alla vita. Fra l'altro essi non escludono la possibilità di forme di vita in un liquido diverso dall'acqua, come per esempio l'ammoniaca, e una vita basata su altri elementi diversi dal carbonio. A questo punto dobbiamo tener presente che affinché il DNA possa formarsi spontaneamente è richiesto un lasso di tempo dell'ordine di 1 miliardo di anni, quindi la probabilità $P(DNA)$ di formazione casuale del DNA è dell'ordine di $1/1000000000$ e su questa valutazione è possibile costruire un calcolo probabilistico che sia in grado di fornirci una valutazione indipendente della probabilità di sviluppo della vita su almeno un pianeta adatto orbitante intorno ad una stella qualsiasi.

Probabilità di esistenza di vita basata sul DNA

A questo punto, sulla base di questi dati, possiamo eseguire una valutazione indipendente della probabilità dell'esistenza di vita basata sul DNA. Sia Pu la probabilità che esista una forma di vita, basata sul DNA, su un pianeta, posto nella zona di abitabilità di una stella, e con condizioni climatiche adatte affinché l'acqua esista in forma liquida. Tale probabilità sarà definita nel seguente modo:

$$Pu = Pp \cdot Pt \cdot P(DNA)$$

Dove Pp è la probabilità che una generica stella della galassia considerata abbia un sistema planetario, Pt è la probabilità che un generico pianeta di quel sistema planetario si trovi ad orbitare nella zona di abitabilità propria di quella particolare stella. Se calcoliamo la probabilità complementare $(1-Pu)$ avremo la probabilità che su un pianeta posto nella zona di abitabilità di una stella non si sviluppi una forma di vita basata sul DNA. Se ora consideriamo il numero N^* di stelle che compongono una generica galassia e calcoliamo la probabilità che un pianeta adatto allo sviluppo della vita, posto intorno ad una qualsiasi delle N^* stelle, non si sviluppi una forma di vita basata sul DNA, abbiamo:

$$(1-Pu)^{N^*}$$

e quindi, alla fine la probabilità complementare, cioè quella che invece la vita basata sul DNA effettivamente si sviluppi su almeno un pianeta adatto posto in orbita, nella zona di abitabilità, intorno ad una qualsiasi delle N^* stelle di quella particolare galassia è pari a:

$$Po = 1 - (1-Pu)^{N^*}$$

Ora eseguiamo il calcolo nel caso della nostra Galassia. Abbiamo $N^*=(100 \text{ miliardi di stelle})$, $P(DNA)=1/(1 \text{ miliardo})$; adottiamo una stima ottimistica e poniamo $Pp=0.7$ e $Pt=0.1$; allora avremo: $Po = 0.9991$, pari al 99,91%. Se adottiamo una stima pessimistica e poniamo $Pp=0.5$ e $Pt=0.05$ risulterà $Po = 0,9179$ pari al 91.79%. Abbiamo quindi una probabilità compresa tra il 91.8% e il 99.9% che nella nostra Galassia si sia sviluppata

almeno una forma di vita basata sul DNA, e infatti eccoci qui: siamo noi. A questo punto possiamo calcolare quale sia la probabilità $Pv(n)$ che in una galassia composta da N^* stelle possano esistere n pianeti su cui si è sviluppata una varietà di vita basata sul DNA, ammesso che solo un pianeta per ogni sistema planetario si trovi nella posizione orbitale favorevole rispetto alla propria stella. La distribuzione di probabilità pertinente è nuovamente la distribuzione Binomiale o di Bernoulli.

$$Pv(n) = \binom{N^*}{n} P_0^n \cdot (1-P_0)^{(N^* - n)}$$

Nuovamente, siccome il numero N^* di stelle che compongono una galassia è molto elevato, dell'ordine dei 100 miliardi, il calcolo numerico della probabilità $Pv(n)$ diventa molto complicato. Possiamo però ricorrere al teorema di De Moivre - Laplace e ottenere la seguente approssimazione Normale che permette di eseguire il calcolo in maniera più agevole:

$$Pv(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{(n - N^* \cdot P_0)^2}{\sigma^2}}$$

dove:

$$\sigma = \sqrt{N^* \cdot P_0 \cdot (1-P_0)}$$

Questa approssimazione ci mostra che nella nostra galassia dovrebbero esistere tra 92 miliardi e 99,9 miliardi di forme di vita basate sul DNA, con un margine d'errore di ± 86810 , con uno scarto ($1 \cdot \sigma$), quindi sembra che la vita, al minimo quella unicellulare, sia estremamente diffusa nella nostra Galassia. Le civiltà evolute e tecnologiche sono però molto meno frequenti.

La zona di abitabilità intorno alle stelle

Affinché la vita possa svilupparsi su un pianeta roccioso orbitante intorno ad una stella singola è necessario che esso percorra tutta la sua orbita all'interno di una corona circolare centrata nella stella e ampia in modo tale che le condizioni climatiche sul pianeta permettano l'esistenza del solvente naturale più efficace: l'acqua allo stato liquido. Nel caso di un sistema binario la situazione diventa più complessa. Data una stella di sequenza principale che sia caratterizzata da una massa M_s , espressa in masse solari, esiste un guscio sferico posto ad una distanza media $d(ave)$, espressa in unità astronomiche (UA), nel quale un pianeta che vi orbita può contenere acqua allo stato liquido. Tale guscio sferico è denominato Zona di Abitabilità (HZ). Il limite inferiore $d(inf)$ di tale guscio sferico costituirà la distanza minima dalla stella alla quale un pianeta che contiene acqua la vedrà bollire e rapidamente evaporare a causa del calore dovuto all'irraggiamento da parte della stella. Il limite superiore $d(sup)$ sarà la distanza critica alla quale l'acqua

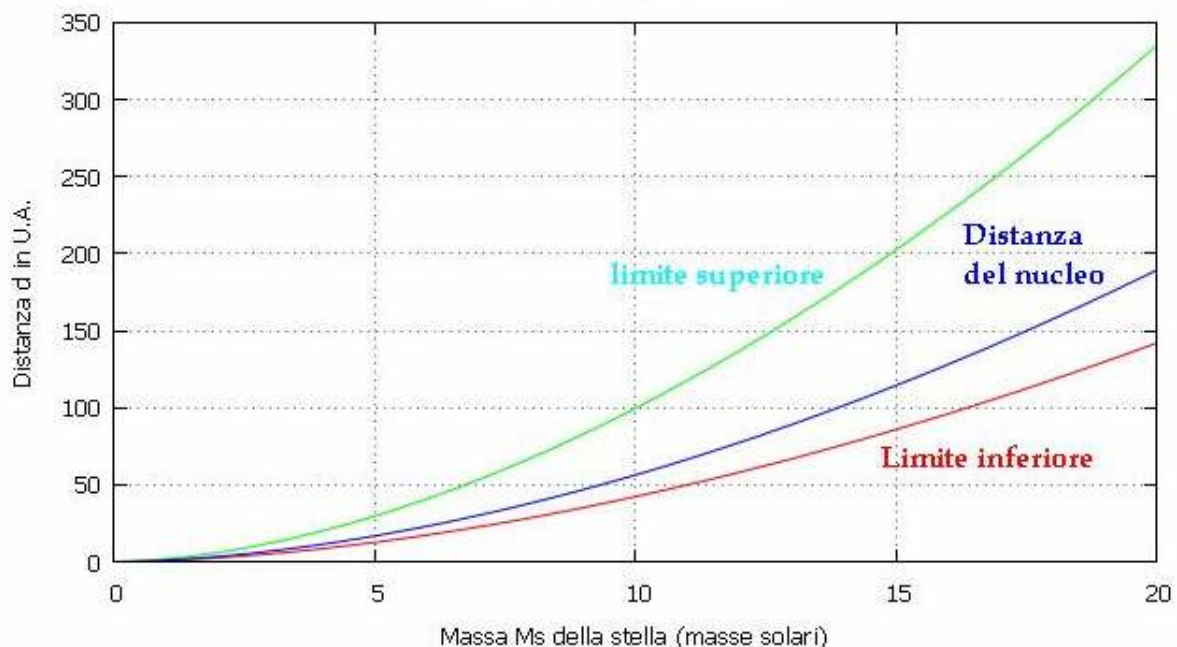
presente su un pianeta orbitante a quella particolare distanza, ghiaccerà a causa della bassa temperatura superficiale del pianeta. Il valore medio $d(ave)$ della distanza della stella del nucleo della zona di abitabilità non corrisponderà alla media di $d(inf)$ e $d(sup)$. I valori numerici delle tre distanze dipenderanno dall'energia emessa dalla stella e irradiata nello spazio e per ragioni astrofisiche, dalla sua particolare massa M_s . Il calcolo analitico delle distanze estreme della HZ sono molto complesso poiché la quantità dei fattori in gioco è rilevante, ma è possibile ottenere alcune formule che descrivono statisticamente i limiti della zona di abitabilità espresse in UA. Esse sono le seguenti:

$$d(inf) = 0.75 \cdot \sqrt{M_s^{3.5}}$$

$$d(sup) = 1.77 \cdot \sqrt{M_s^{3.5}}$$

$$d(ave) = \sqrt{M_s^{3.5}}$$

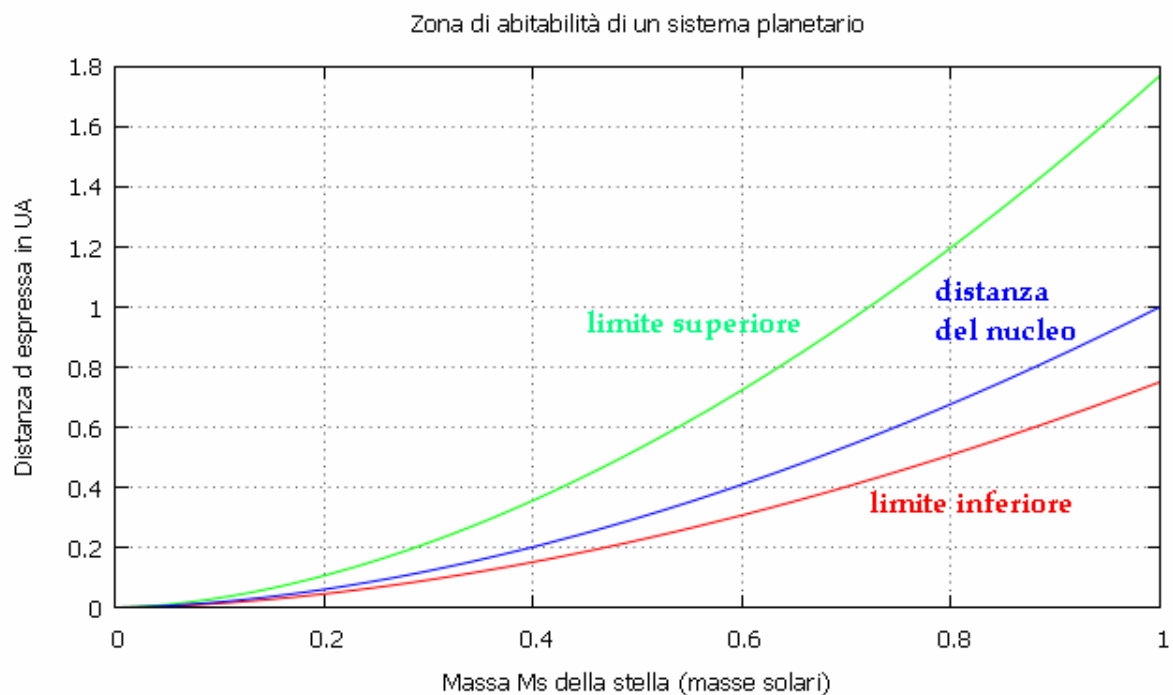
Ovviamente, queste relazioni sono caratterizzate da un certo grado di approssimazione in quanto in realtà i fattori che influiscono sul clima di un pianeta sono molteplici, primo fra tutti, la latitudine geografica. Ad esempio, nel caso della Terra, pur essendo il pianeta nella fascia di abitabilità del Sistema Solare, si verifica che ad alte latitudini geografiche (zone polari), l'acqua sussiste in forma ghiacciata proprio come avverrebbe ad una distanza dal Sole pari a 1.77 UA.



Limiti della zona di abitabilità (HZ), espresso in UA, in funzione della massa M_a della stella espressa in masse solari, con $0 \leq M_s \leq 20$ masse solari.



Limiti della zona di abitabilità (HZ), espresso in UA, in funzione della massa M_a della stella espressa in masse solari, con $0 \leq M_s \leq 5$ masse solari.



Limiti della zona di abitabilità (HZ), espresso in UA, in funzione della massa M_a della stella espressa in masse solari, con $0 \leq M_s \leq 1$ masse solari.

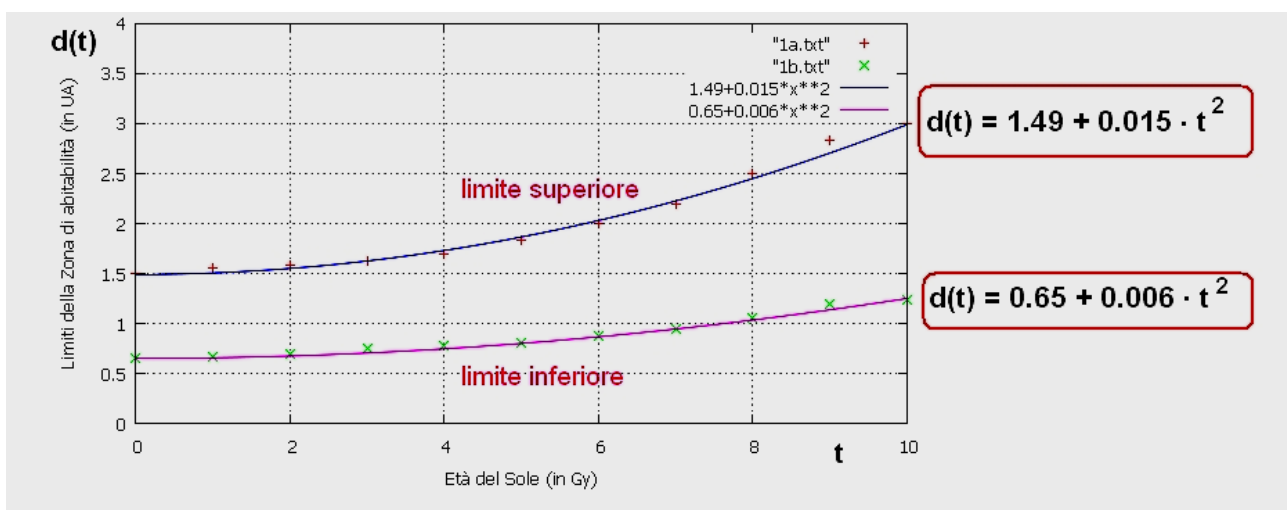
Fintanto che la Terra orbiterà rimanendo ben all'interno della zona di abitabilità solare, la vita sul nostro pianeta potrà sussistere. Se per qualche ragione la Terra ne uscisse, sarebbe la fine e ogni forma di vita come la conosciamo si estinguerebbe rapidamente. E' possibile che questo accada? Sì, ma non sarà la Terra ad uscire, ma sarà la zona di abitabilità del Sole a scappare via dal nostro pianeta, poiché il Sole è una stella giovane e ancora in piena fase evolutiva.

L'evoluzione della zona di abitabilità solare

L'evoluzione di una stella provoca la variazione di alcuni suoi parametri fondamentali. La sua massa rimane pressoché costante, ma la sua temperatura, la sua luminosità e il suo raggio varieranno conformemente ai processi fisici che avvengono al suo interno. Il destino evolutivo immediatamente prossimo del Sole sarà quello di aumentare di temperatura e quindi di espandersi aumentando il suo raggio, ma anche la sua luminosità, cioè la quantità di energia irradiata nello spazio nell'unità di tempo. Questo avrà ripercussione sulla sua zona di abitabilità la quale si sposterà nello spazio allontanandosi dall'orbita della Terra, tanto che il nostro pianeta ritroverà all'esterno e sperimenterà un consistente aumento di temperatura tanto da veder bollire l'acqua degli oceani. Ma andiamo con ordine. L'evoluzione temporale della distanza minima $d(\text{inf})$ (espressa in unità astronomiche, UA) dal Sole della zona di abitabilità è statisticamente esprimibile in maniera semplice dalla seguente formula matematica:

$$d(\text{inf}) = 0.65 + 0.006 \cdot t^2$$

dove: t è l'età evolutiva della stella Sole contata dalla sua formazione avvenuta 4.57 miliardi di anni fa, espressa in miliardi di anni (Gy). Tale formula fornisce valori di distanza approssimati a ± 0.01 UA, corrispondenti a circa ± 1.5 milioni di Km.



Andamento del limite inferiore e superiore della zona di abitabilità del Sistema Solare. Le croci (+) indicano i dati ottenuti dalle simulazioni al computer e le linee continue sono le funzioni approssimanti i dati. L'errore complessivo di approssimazione dei dati è dell'ordine di 0.01 UA.

Osservando la figura precedente che riporta l'andamento del limite inferiore e superiore della zona di abitabilità del Sistema Solare si nota che la Terra, posta per definizione ad una distanza media di 1 UA dal Sole, rimane entro la zona di abitabilità (HZ) del Sistema Solare per alcuni miliardi di anni di vita solare e poi, a causa dello spostamento nello spazio del limite inferiore della HZ, essa si troverà ad uscirne con risultati catastrofici per la vita sul nostro pianeta. Ma quando avverrà? Per determinare questa epoca basta porre $d(t)=1 \text{ UA}$ e risolvere l'equazione del limite inferiore della HZ. Il risultato che si ottiene è un'età solare t_0 pari a:

$$t_0 = 7.64 \text{ miliardi di anni}$$

e tenendo conto che il valore più accurato conosciuto per l'età τ del Sistema Solare che è pari a $\tau=4.5691\pm 0.0004$ miliardi di anni, tra 3.1 Gy la vita sulla Terra inizierà ad estinguersi a causa di un insopportabile aumento di temperatura dovuto all'espansione evolutiva del Sole. Quando questo avverrà, il Sole si sarà espanso solamente del 14% in più rispetto alle attuali dimensioni, ma la sua luminosità complessiva sarà aumentata del 77% rispetto alla luminosità attuale.

Conclusione

Da questa analisi emerge chiaramente che il destino di ogni forma di vita sulla Terra è segnato e anche il genere umano, se nel frattempo non avrà imparato a viaggiare nello spazio in cerca di altri mondi dove stabilirsi e prosperare, (o se già non si sarà estinto grazie alla sua stupidità) terminerà inevitabilmente la sua esistenza.

Bibliografia

Dole S. 1972, "Habitable Planets for Man", Rand Corporation Editions.