

Chapter 8

Potenzialita' degli studi di transito. Pianeti abitabili e vita nell'Universo.

8.1 Potenzialita' degli studi di transito.

I risultati degli studi da terra e delle recenti missioni spaziali dedicate ai transiti planetari (in particolare la *Kepler*) hanno di molto ampliato le conoscenze e le prospettive di analisi sui sistemi planetari extrasolari. Non solo sono stati scoperti molti nuovi sistemi. Le osservazioni dallo spazio hanno permesso di arrivare ad una precisione fotometrica molto alta, e hanno reso' cosi' visibili anche transiti da parte di pianeti terrestri, non possibili da terra (la precisione e' migliore dallo spazio di circa due ordini di grandezza). Inoltre le osservazioni combinate transiti+velocita' radiali (legate anche alla necessita' di convalidare misure fotometriche e di eliminare il rischio di falsi positivi) permettono di avere una buona stima dell'inclinazione orbitale (ricordiamo che le misure di massa legate a velocita' radiale sono sempre date a meno di un fattore $\sin(I)$) e di stimare i raggi dei pianeti transitanti, confrontando le osservazioni con i modelli teorici. Una ulteriore informazione interessante ottenibile dai transiti e' data dall'effetto **Rossiter-Mc Laughlin**.

8.1.1 L'effetto Rossiter-Mc Laughlin

Durante un transito (stiamo parlando dell'eclisse primaria, quando il pianeta passa davanti alla stella) una parte della superficie stellare viene occultata. Se la stella ruota, la regione che viene occultata puo' corrispondere ad una parte in cui la superficie stellare si avvicina (tutto e' ovviamente riferito al centro di massa) oppure si allontana. Lo spettro integrato della stella rotante sara' caratterizzato da righe allargate (simmetricamente) dalla rotazione. In presenza di un transito ci sara' una distorsione della riga, che perdera' la sua simmetria. Se l'asse di rotazione e' perpendicolare al piano orbitale del pianeta questa distorsione sara' uguale e opposta in due fasi diverse del transito. Se invece l'asse di rotazione e' inclinato la distorsione sara' asimmetrica. Similmente si potra' osservare un effetto Doppler asimmetrico.

Osservativamente l'effetto e' stato studiato su un certo numero di sistemi transitanti. Si e' visto che l'asse di rotazione e' spesso inclinato rispetto al piano dell'orbita planetaria, con una forte prevalenza di assi inclinati per le stelle piu' calde. Si veda per es. Winn (2011, Proc. IAU Symp. 276, 230–237).

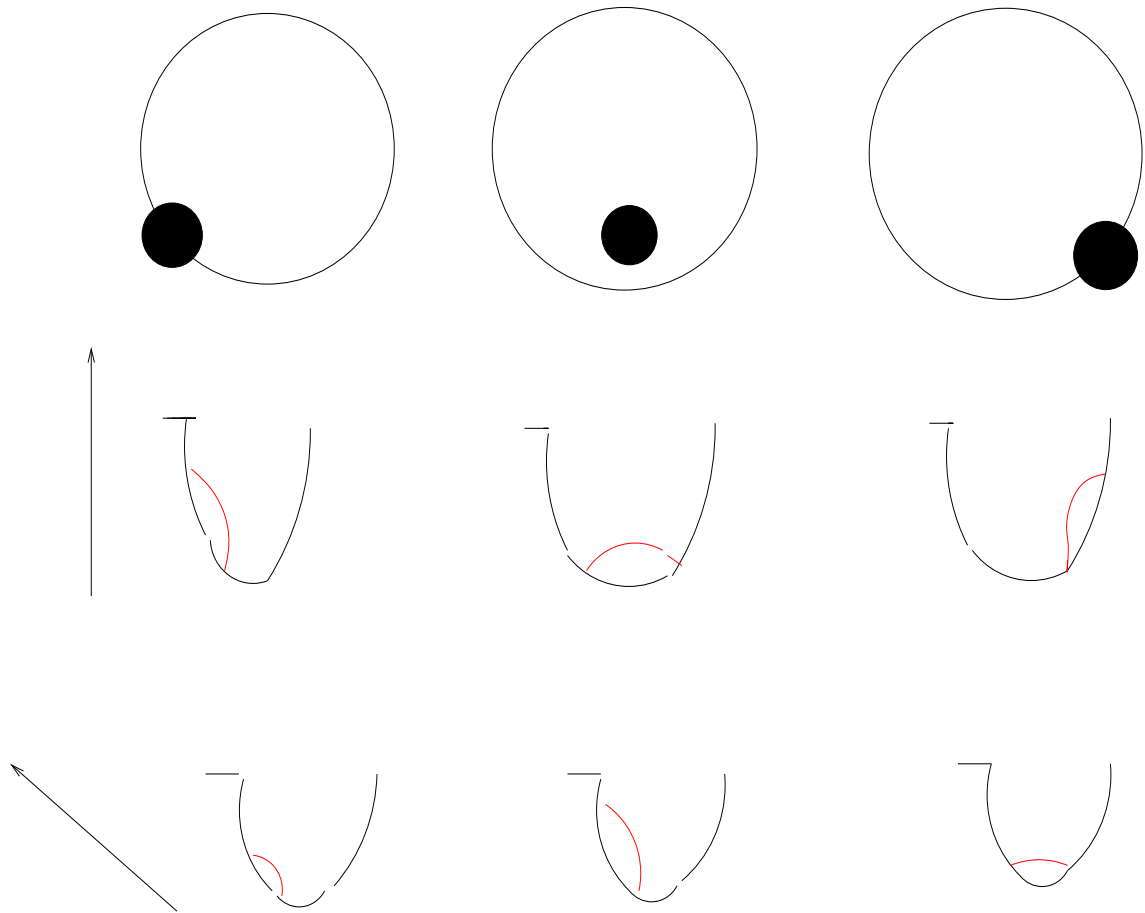


Figure 8.1: L'effetto Rossiter-Mc Laughlin come distorsione di una riga spettrale (figura schematica); durante il transito (parte in alto) la riga viene diversamente distorta se l'asse di rotazione e' perpendicolare al piano orbitale (parte al centro) o fortemente inclinato (parte in basso). Adattata da Winn (2011).

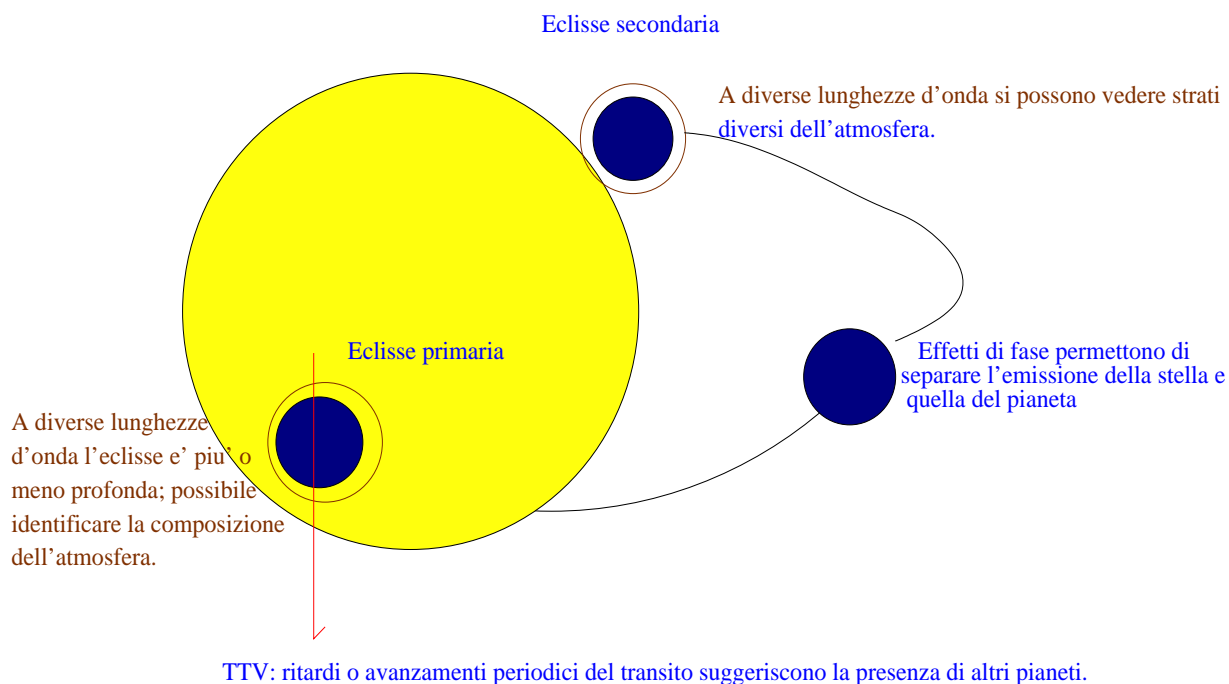


Figure 8.2: Vengono schematicamente rappresentate le varie osservazioni utili per la scoperta e lo studio dei pianeti, durante un transito. I dettagli, le potenzialità e le problematiche sono illustrate nel testo di questo e dei paragrafi seguenti. Adattata da Brogi (2014).

Le implicazioni di queste osservazioni sono rilevanti. L'allineamento rotazione-piano orbitale dovrebbe essere naturale in caso di forti effetti mareali. La differenza fra stelle più o meno calde potrebbe essere legata ad una diversa efficienza delle interazioni mareali, forse legata alle differenti caratteristiche delle zone convettive. In generale, comunque, la abbondante presenza di assi non allineati getta qualche dubbio sulla prevalenza della migrazione di tipo I/II (che dovrebbe produrre un buon allineamento) sulla migrazione dovuta a effetti di scattering fra corpi planetari.

8.1.2 Osservazione dell'eclisse primaria; possibili misure dell'atmosfera planetaria

Le osservazioni legate ad un transito planetario possono essere diverse e dare diverse informazioni, come illustrato dalla figura 8.2.

La luce stellare occultata dal pianeta può in parte essere occultata anche dall'atmosfera del pianeta. Questo rende possibile ottenere, da misure fatte a diverse lunghezze d'onda, risultati diversi dipendenti dalla diversa trasmissione della luce nell'atmosfera planetaria. Gli effetti sono modesti (la quantità di luce trasmessa può variare al più di qualche millesimo), ma può essere misurata almeno nel caso di pianeti abbastanza grandi, e dare informazioni -seppur grossolane- sulla composizione dell'atmosfera del pianeta. Anche acqua e CO sono stati identificati. Lo spettro di trasmissione, in linea di massima, può anche fornire informazioni sulla presenza di nubi o di foschia. Estendere le misure a transiti di pianeti terrestri è ovviamente un ambizioso obiettivo per un futuro non troppo remoto.

8.1.3 Osservazione dell'eclisse secondaria; difficoltà osservative e Hot-Jupiters

Le osservazioni dell'eclisse secondaria sono più difficili. Per un pianeta di raggio R_p in orbita con un semiasse maggiore a_p il contrasto di luminosità fra luce **totale** emessa dal pianeta e luce emessa dalla stella è (si vedano anche le Eq. 3.1 e 7.1):

$$L_p/L_* \simeq (R_p/2a_p)^2 \quad (8.1)$$

Per osservazioni nel visibile questo valore va inoltre diminuito di un fattore uguale all'albedo A . Si vede che anche per un *Hot-Jupiter* (con $a_p \simeq 10r_* \simeq 100r_p$) questo rapporto risulta sempre inferiore a 10^{-4} ; l'eclisse secondaria è quindi molto più debole di quella primaria (nello stesso caso la profondità dell'eclisse primaria è cento volte maggiore). La situazione può essere migliore se le osservazioni sono spostate nell'infrarosso (che per un Hot-Jupiter non è infrarosso molto lontano). Se il pianeta ha una temperatura quattro o cinque volte minore di quella della stella, e se si fa l'osservazione a lunghezze d'onda vicino al picco del pianeta, si guadagna un ordine di grandezza nel contrasto, e si arriva a livelli dell'ordine di 10^{-3} , non irraggiungibili. Ovviamente, per pianeti terrestri, la situazione è molto meno promettente (v. seguito).

8.1.4 Effetti di fase e TTV

Misurando la dipendenza della luce complessiva raccolta dalla fase orbitale del pianeta è in linea di principio possibile valutare la luminosità del pianeta dal lato giorno e dal lato notte, con possibili informazioni anche sull'atmosfera e sulla circolazione. Si tratta ovviamente di misure molto difficili. Inoltre la eventuale presenza di un altro pianeta nel sistema causa un ritardo/anticipo periodico dei momenti di transito. da essi è possibile (e in alcuni casi "è stato fatto con successo) arguire la presenza e le caratteristiche di altri pianeti, anche di taglia terrestre (metodo **TTV**, *Transit Timing Variation*).

8.2 Pianeti extrasolari terrestri e zone abitabili

8.2.1 Introduzione

Il problema della vita nell'Universo è molto complesso; una prima complessità riguarda la definizione stessa di vita, sulla quale abbiamo certamente idee non troppo precise. In genere, anche per mancanza di alternative, si pensa a forme di vita non troppo dissimili da quelle terrestri, basate sulla chimica del carbonio, sugli amminoacidi ecc.. Una definizione di vita più generale, basata magari su considerazioni di tipo entropico, non potrebbe essere facilmente confrontata con risultati di osservazioni ed analisi – al limite, anche in loco. La vita basata sulla chimica del carbonio è invece comprensibile e, in linea teorica, la sua presenza può fornire prove sperimentali o osservabili.

Tuttavia anche entro questi limiti si pongono problemi di definizione. Anche sulla Terra ci sono forme di vita molto diverse, compatibili con condizioni ambientali molto differenti, e caratterizzate da una complessità e una capacità di differenziazione molto variegata. Il problema della vita nell'Universo si divide, al minimo, in due problemi più specifici e potenzialmente con

soluzioni molto diverse, quello della vita in forme elementari (batteri, virus, organismi semplici) e della vita che implica anche lo sviluppo dell'intelligenza, connessa tipicamente ad una lunga e articolata catena evolutiva. A volte si pensa che lo sviluppo di forme di vita su un pianeta implichi un successivo nascere di forme di vita intelligenti e quindi di una vera e propria civiltà simile a quella umana. Tuttavia non è ovvio che sia così. Anzi, alcuni autori (si veda [7] e nel seguito) sostengono una ipotesi opposta, che cioè la formazione della vita al livello più elementare sia estremamente frequente, ma che lo sviluppo dell'intelligenza sia estremamente raro.

8.2.2 Ricerca della vita fuori dalla Terra

La prima ricerca di forme di vita extraterrestri ha, ovviamente, luogo nel resto del Sistema Solare. Sembrano ormai fuori discussione le ipotesi, molto popolari fino a non molti decenni fa, relative alla esistenza di civiltà extraterrestri su alcuni pianeti del Sistema Solare, in particolare Marte. I “canali” visti da Lowell e Schiaparelli non sono stati confermati dalle immagini di miglior qualità prese successivamente da terra, e tantomeno da quelle prese dallo spazio o sulla superficie marziana. Né ci sono motivi per pensare che una popolazione evoluta si possa nascondere sotto il suolo di Marte o, magari, negli oceani sotterranei di Europa.

La possibilità di forme di vita elementari presenti, oggi o nel passato, su altri corpi del Sistema Solare non è invece da escludere. Per quanto riguarda Marte ci sono evidenze della presenza, in passato, di corsi d'acqua superficiali, il che avrebbe reso molto più favorevoli le condizioni di abitabilità (il tutto forse legato alla evoluzione temporale dell'asse di rotazione marziano). Alcuni anni fa una meteorite di origine marziana aveva fatto parlare di tracce indirette di vita (a livello di microorganismi). La cosa si è poi parzialmente ridimensionata, ma non può ancora dirsi conclusa.

In generale la possibilità di forme di vita extraterrestri nel Sistema Solare non può essere ancora esclusa.

8.2.3 Ricerca di pianeti terrestri e di markers spettroscopici

Molto più interessante la ricerca di vita fuori dal Sistema Solare. In base alle considerazioni generali esposte in precedenza, si cercano in prima istanza pianeti che abbiano condizioni ambientali simili a quelle terrestri. Devono essere pianeti con una superficie solida, e in grado di ospitare anche mari o comunque distese di acqua allo stato liquido. La richiesta limita la massa dei candidati, che non può essere troppo piccola (per consentire la presenza di una atmosfera significativa), nè troppo grande (altrimenti la pressione atmosferica supererebbe quella del punto critico dell'acqua). In realtà una ragionevole stabilità climatica è assicurata dal ciclo dell'anidride carbonica CO_2 (v. il paragrafo seguente) che a sua volta richiede l'effettività dei processi di tettonica a placche, che richiedono una massa minima di poco inferiore alla massa terrestre. In definitiva la massa deve essere compresa fra una metà e una decina di masse terrestri.

La condizione più critica è comunque quella sulla temperatura (v. il par. seguente). I pianeti, di taglia adeguata, debbono stare nella **zona abitabile**. È da capire se la loro stabilità (o addirittura l'esistenza) possa essere messa in discussione dalla vicinanza orbitale di pianeti giganti. Probabilmente per più di metà dei sistemi planetari extrasolari finora osservati questo

problema è reale. La percentuale dei casi negativi potrebbe crescere molto se si considera il possibile effetto distruttivo di una migrazione di pianeti giganti dalla regione di formazione (esterna alla zona abitabile) verso le parti più interne del sistema. Se l'effetto non viene attenuato da altre considerazioni (per es., la formazione dei pianeti terrestri potrebbe completarsi dopo la fase di migrazione più intensa) può procurare la riduzione di almeno un ordine di grandezza dei sistemi planetari candidabili a ospitare pianeti terrestri. Missioni spaziali recenti (in particolare la Kepler) hanno nel complesso garantito l'esistenza di un certo numero di pianeti con caratteristiche non troppo diverse da quelle della Terra, e orbitanti in zone abitabili (una ventina a maggio 2016). Questo dovrebbe incoraggiare progetti futuri più ambiziosi, come quello del "Terrestrial Planet Finder" (TPF) che dovrebbe, mediante un coronografo e un interferometro infrarosso nello spazio, studiare i possibili pianeti abitabili intorno a stelle vicine, e trovare anche le prime possibili segnature spettroscopiche.

La presenza di CO_2 e vapor d'acqua rappresenta una segnatura (accessibile al TPF) della abitabilità di un pianeta, e apre la strada alla ricerca di markers biologici più espliciti. Essi possono consistere nell'ossigeno, nel metano, o nel protossido di azoto (N_2O), che vengono prodotti da organismi viventi (piante, animali, batteri). Ovviamente c'è sempre il rischio del falso positivo: il metano, per esempio, è una componente abbondante dell'atmosfera di Titano, e la cosa non ha alcun significato biologico. Sono più convincenti le osservazioni combinate, per esempio di ossigeno e metano.

Misure di questo tipo su potenziali altre Terre sono però al momento impossibili.

Abbiamo già visto in precedenza che il rapporto di luminosità fra una stella come il Sole e una Terra, nel visibile, è di poco superiore a 10^{-10} , corrispondente a 25 magnitudini di differenza. Questo limita molto la possibilità di osservazioni del pianeta, sia per imaging diretto, sia studiando le eclissi secondarie. Anche le informazioni ricavabili dalla trasmissione del segnale stellare in atmosfera, durante l'eclisse primaria, sono limitate (l'atmosfera di un pianeta come la Terra non è sufficientemente estesa).

La situazione potrebbe migliorare studiando i pianeti intorno a stelle di piccola massa, come discuteremo in seguito.

8.2.4 Definizione di zone abitabili e criteri; l'effetto serra

Come abbiamo già accennato, si definisce "zona abitabile" di un sistema planetario quella in cui è possibile avere pianeti che abbiano acqua allo stato liquido. La definizione non tiene ovviamente conto della possibilità (in genere non osservabile) di oceani sotterranei, e ci si limita ad indagare le condizioni superficiali.

Come è noto la possibilità di avere acqua liquida richiede una temperatura superiore a quella del punto triplo dell'acqua ($T \simeq 273K$). In queste condizioni la pressione definisce l'intervallo di temperature in cui lo stato liquido è possibile, un range che si allarga a circa $100K$ alla pressione atmosferica terrestre ($p \simeq 10^5 Pa$), e cresce ulteriormente almeno finché la pressione non diventa ancora maggiore di un paio di ordini di grandezza (punto critico).

Il calcolo della temperatura alla superficie di un pianeta non è semplicissimo. Come visto nel Cap.3, una stima può essere fatta mediante l'ipotesi dell'equilibrio termico (l'energia ricevuta dalla stella è uguale alla somma di quella riflessa e di quella reirraggiata). Si ottiene (v. Eq. 3.11) una definizione di $T_{eff,p}$ che corrisponde alla temperatura di corpo nero che riproduce l'intensità dell'energia reirraggiata. Se si applica la definizione alla Terra, viene un valore di poco

superiore a $250K$; la Terra **non** sarebbe abitabile. L'assurdità del risultato ci mette in evidenza l'importanza dell'**effetto serra**, dovuto alla presenza dell'atmosfera. L'atmosfera terrestre è sostanzialmente trasparente alla radiazione nelle lunghezze d'onda del visibile. Nell'infrarosso, invece, specie per la presenza di bande di assorbimento dovute a vapore acqueo e anidride carbonica (ma anche di ossidi di azoto e metano), l'atmosfera non è più trasparente, e per certe lunghezze d'onda la sua profondità ottica diventa molto grande. La radiazione infrarossa reirraggiata dalla superficie viene quindi in gran parte riassorbita dall'atmosfera, e solo parzialmente riemessa verso l'esterno. Si ha quindi un processo di riscaldamento planetario. Si può dimostrare, mediante l'integrazione dell'equazione del trasporto radiativo, che, se la profondità ottica dell'atmosfera, dall'esterno alla superficie, mediata sullo spettro di emissione, è τ_s , la temperatura superficiale T_s è legata alla temperatura $T_{eff,p}$ da una relazione del tipo:

$$T_s = T_{eff,p}(3\tau_s - 2)^{1/4} \quad (8.2)$$

Per la Terra questo porta la temperatura superficiale a valori intorno a $290K$, che consentono la presenza di acqua allo stato liquido. Cambiando la costante solare (ossia cambiando la distanza della Terra dal Sole) si può facilmente definire il limite esterno risultante della zona abitabile, intorno a $1.15AU$.

In realtà anche questa stima non è molto sensata. Il cambiamento dell'insolazione altera la temperatura superficiale in modo complesso, a causa di diversi effetti collaterali. Una diminuzione di insolazione diminuisce la abbondanza di vapore acqueo, e diminuisce l'opacità dell'atmosfera; aumenta inoltre la presenza di regioni ghiacciate, che aumentano l'albedo. Questi effetti di "feedback positivo" sembrerebbero restringere la zona abitabile, ma sono presenti anche effetti di contrasto. Fra di essi il più importante prende il nome di "ciclo carbonati-silicati". Il ciclo è basato sulla caduta, legata alla pioggia, di CO_2 e del conseguente acido carbonico H_2CO_3 . L'acido corrode le rocce e prodotti di reazione vengono trasportati a sedimentarsi in fondo agli oceani. In presenza del moto delle placche continentali questi sedimenti possono finire al di sotto della crosta terrestre. Finalmente si crea di nuovo anidride carbonica, che viene riemessa nell'atmosfera durante l'attività vulcanica. Il ciclo ha effetti stabilizzanti: se aumenta la temperatura aumentano le piogge e quindi la perdita di anidride carbonica; di conseguenza la Terra si raffredda. Se la Terra si raffredda le piogge diminuiscono e il bilancio della CO_2 ridiventa positivo a causa delle emissioni dei vulcani, riportando in su l'opacità atmosferica e, di conseguenza, la temperatura. Si noti che il ciclo richiede la presenza di "tettonica a placche". Questa, a sua volta, limita inferiormente la massa planetaria accettabile (v. sopra). In presenza del ciclo la zona abitabile diventa più estesa. Sempre restando al caso del Sistema Solare, la zona abitabile si può estendere all'esterno, raggiungendo, per una stima un po' ottimistica, anche l'orbita di Marte. All'interno è necessario evitare che gli oceani possano evaporare. Questo limita la zona abitabile interna a circa $0.9AU$. Il problema si complica quando si passa a considerare che, anche durante la fase di sequenza principale, una stella subisce una significativa variazione di luminosità, in aumento con il passar del tempo. Se si considera questo aspetto, la zona abitabile si sposta, nel tempo, verso l'esterno. Poiché, di norma, un pianeta mantiene la sua orbita, la condizione di abitabilità può essere rispettata solo fino a un certo istante, o da un certo momento in poi. La "zona continuamente abitabile" è l'intersezione delle zone abitabili calcolate a momenti diversi. Il calcolo porterebbe a definire, nel caso del Sistema Solare, una striscia piuttosto sottile (qualche centesimo di AU) intorno all'orbita terrestre. In generale ci si potrebbe aspettare la diminuzione di almeno un ordine

di grandezza dei pianeti candidabili. La situazione però non è completamente chiara. Ci sono evidenze secondo le quali la temperatura sulla Terra era più alta in passato, quando la luminosità solare era minore. Questo apparente paradosso richiede una spiegazione, forse legata all'evoluzione di qualche altro parametro (atmosfera, processi geologici...), e dimostra come sia necessario andare con i piedi di piombo prima di generalizzare troppo le conclusioni. Analoga cautela è certamente opportuna nell'estendere il modello a stelle diverse dal Sole. Una stella diversa (in particolare di massa diversa) è più o meno luminosa. La costante stellare è diversa, e la zona abitabile si sposta. Sulla base di considerazioni elementari di tipo dimensionale è abbastanza chiaro che una stella meno luminosa avrà tipicamente una zona abitabile più interna, e più stretta; una stella più luminosa avrà una zona più lontana e più ampia. Nell'elaborare il modello va però anche tenuto in conto la diversa trasparenza dell'atmosfera per spettri stellari differenti, e va inoltre considerato anche il rilevante fattore tempo. Nell'unico caso a nostra disposizione di evoluzione biologica la vita è nata sulla Terra abbastanza presto, ma prima di evolvere (quasi all'improvviso) verso esseri viventi superiori (mammiferi, e poi l'uomo) ha passato una lunga fase (due o tre miliardi di anni) di transizione. Se questo timing corrisponde ad una regola generale, e non è frutto del caso, pianeti intorno a stelle relativamente massicce, che vivono in sequenza pochi miliardi di anni, non sono candidati a sviluppare forme di vita avanzate. Diventano più interessanti i pianeti intorno a stelle di piccola massa (K, M) che hanno a disposizione tutto il tempo possibile. Come si capisce, però, la situazione è complessa e lo scenario tutt'altro che definitivo.

8.2.5 Osservazione dettagliata di pianeti abitabili

Come è chiaro da quanto detto in precedenza, un pianeta abitabile deve avere dimensioni e temperature non troppo diverse da quelle della Terra. Osservazioni rilevanti dovrebbero permettere di identificare markers biologici, come sopra definiti. In teoria, nell'era dell'ELT, sarebbe possibile anche ottenere risultati interessanti anche mediante misure di trasmissione, ma solo in casi particolarissimi e con osservazioni molto lunghe. Difficili sono anche imaging e osservazioni di eclissi secondarie, per le quali un problema centrale è il contrasto di luminosità con la stella centrale, da mitigare con tecniche speciali (interferometria, ottiche adattive, coronografia ecc.) ed eventualmente anche spostando le osservazioni nella banda più adatta, ossia nell'infrarosso. Purtroppo si parla di infrarosso lontano, e quindi accessibile solo dallo spazio.

Alcune stime possono chiarire la situazione in termini generali, e indirizzare i programmi di ricerca.

Se ricordiamo che la temperatura di un pianeta $T_p \simeq T_*(R_*/a_p)^{1/2}$ (dove i suffissi p e $*$ sono ovviamente relativi al pianeta e alla stella centrale), si ha (come già discusso anche nella Eq. 8.1):

$$L_p/L_* = R_p^2 T_p^4 / (R_*^2 T_*^4) \simeq R_p^2 / a_p^2 \quad (8.3)$$

In sostanza il contrasto di luminosità dipende dalle dimensioni del pianeta e dalla distanza. Ma le dimensioni del pianeta **abitabile** non possono essere molto diverse da quelle della Terra, e la distanza dalla stella deve assicurare una temperatura di equilibrio idonea alla vita. In sostanza la luminosità del pianeta è quasi fissata, e $L_p/L_* \propto 1/L_*$.

Le stelle più adatte a cercare pianeti abitabili, da un punto di vista osservativo, sono quelle poco luminose. Al limite una stella di piccolissima massa $\simeq 0.1M_\odot$ potrebbe diminuire il

contrasto di quattro ordini di grandezza. Anche in casi meno patologici un guadagno di due ordini di grandezza, per una stella M, è sicuro, e può rendere osservabile anche via imaging (con telescopi della generazione ELT) un pianeta terrestre intorno a una stella molto vicina. Teoricamente, andando nell'infrarosso termico tipico del pianeta, si possono guadagnare più di tre ordini di grandezza per una stella come il Sole (alle lunghezze d'onda tipiche dell'emissione del pianeta la luminosità del Sole scende di tanto) e di due per una stella di tipo M (con temperature intorno ai 3000K). Al limite uno studio fotometrico su diverse lunghezze d'onda o (meglio) spettroscopico potrebbe darci le informazioni necessarie per passare dalla definizione di abitabile a quella di "potenzialmente abitato". Peraltro questo tipo di analisi sembrano possibili solo estendendo all'infrarosso gli studi, e quindi, sostanzialmente, nell'ambito di future missioni spaziali.

8.3 La vita e la vita intelligente

8.3.1 L'equazione di Drake

Il primo approccio quantitativo al problema dell'intelligenza nell'Universo risale al 1961, quando venne enunciata l'**equazione di Drake**. Essa mirava a stimare il numero di civiltà presenti nella nostra Galassia e in grado di inviare segnali (radio?) riconoscibili, ed era inquadrata nella logica del "Progetto SETI" (**S**earch of **E**xtra**T**errestrial **I**ntelligence), partito in quegli anni e che non ha poi dato risultati significativi. Secondo Drake:

$$N = R_* f_{pl} n_E f_{life} f_{intell} f_{civ} L \quad (8.4)$$

dove N è il numero delle civiltà in grado di farsi identificare, R_* il numero di stelle, adatte ad ospitare pianeti vivi, formate nell'unità di tempo, le varie f indicano:

- La frazione di stelle con sistemi planetari: f_{pl} ; mentre n_E è il numero medio di pianeti abitabili per ognuno di questi sistemi.
- La frazione di tali pianeti in cui la vita effettivamente si sviluppa: f_{life} .
- La frazione tra questi in cui si sviluppano vita intelligente (f_{intell}) e, fra questi, civiltà evolute tecnologicamente (f_{civ}).

Infine L esprime la durata media di tali civiltà.

Un esame della equazione ci mostra come attualmente si sia in grado di stimare sensatamente il primo e il secondo fattore. Il rate di formazione stellare (sia nel presente sia nel passato) è presumibilmente ben conosciuto. Si comincia ad avere una stima grossolana della frequenza di sistemi planetari intorno alle stelle (almeno 5 – 10%, e forse molto di più). Sugli altri parametri le informazioni –e anche la possibilità di fare ipotesi ragionevoli– sono molto più scarse. Si può pensare che il numero dei pianeti abitabili presenti in media nei vari sistemi non sia molto diverso dall'unità. Tuttavia la presenza di pianeti grossi a moderata distanza dalla stella centrale, anche per le implicazioni relative a un passato processo di migrazione, può limitare o inibire la formazione e/o la stabilità dinamica di pianeti terrestri nelle zone abitabili. Per il resto siamo nella nebbia. Forse la probabilità di un sviluppo effettivo di qualche forma di vita non è bassa, ma quella di avere poi uno sviluppo dell'intelligenza e addirittura di una

civiltà tecnologicamente progredita non sono assolutamente conosciute. E c'è infine l'incognita più grossa, quella sulla *durata* di una civiltà progredita: per alcuni pochi decenni (basti pensare alle armi atomiche, all'effetto serra, all'esaurimento delle risorse naturali), per altri un tempo che potrebbe essere anche di milioni o miliardi di anni.

Con queste incertezze non meraviglia che il numero risultante dall'equazione possa essere per alcuni molto maggiore, e per altri molto minore di uno. La mancata evidenza (finora) di contatti alieni potrebbe rafforzare la versione "pessimistica"; ma è tutto da vedere.

8.3.2 L'ipotesi della "Rare Earth": altre condizioni

Alcuni autori hanno lanciato in anni recenti l'ipotesi della della "Rare Earth", approfonditamente spiegata nel libro omonimo di Ward e Brownlee. L'ipotesi parte da una premessa apparentemente contraddittoria con la tesi generale: la formazione e la sopravvivenza della vita è molto probabile anche al di fuori delle usuali condizioni ritenute necessarie per l'abitabilità. La scoperta di forme di vita elementari sulla Terra anche in condizioni estreme (*extremophiles*) ha ampliato le condizioni in cui la vita (in qualche forma) può sopravvivere. La presenza di acqua allo stato liquido non è più strettamente necessaria; le zone potenzialmente abitabili diventano molto più grandi. Anche nel Sistema Solare i corpi su cui è pensabile di poter trovare forme di vita elementari sono decisamente più d'uno.

Questo discorso però riguarda solo la nascita della vita. Considerazioni opposte si rivolgono invece al problema dello sviluppo di forme di vita superiori e quindi anche dell'intelligenza.

Abbiamo già visto come alcuni requisiti, di non immediata rilevanza, siano invece necessari: per esempio, la presenza di tettonica a placche, che garantisce il funzionamento del ciclo stabilizzante dell'anidride carbonica. Ma altri aspetti potrebbero essere essenziali: per esempio la presenza di un pianeta come Giove, nella sua zona, a filtrare in misura rilevante i possibili proiettili destinati a colpire la Terra. Collisioni rare possono anche avere un effetto evolutivo, causando estinzioni massicce che implicano anche una sorta di refresh biologico, e forse favoriscono l'evoluzione mediante selezione naturale; ma se gli eventi fossero stati più frequenti le specie viventi non avrebbero avuto il tempo per ricostituirsi dopo una catastrofe. Altro esempio: la Luna ha un effetto di stabilizzazione sull'asse di rotazione terrestre, la cui oscillazione è molto contenuta. Al contrario, come succede a Marte, un asse molto oscillante implicherebbe anche drammatici cambiamenti climatici, che renderebbero inabitabili vaste regioni del pianeta, e potrebbero causare la scomparsa di specie viventi. Naturalmente gli stessi argomenti potrebbero anche essere ribaltati: può una forte evoluzione climatica favorire la selezione naturale? Domande cui non siamo ancora in grado di dare una risposta. Molti parametri dell'equazione di Drake aspettano una stima attendibile a livello di ordine di grandezza. La probabilità di avere contatti (diretti, o mediante comunicazioni remote come quelle cercate dal progetto SETI) non è definibile. Vale comunque ancora l'acuta osservazione di Enrico Fermi: se la galassia fosse piena di civiltà aliene avanzate, dovremmo averle già incontrate.

Ringraziamenti

Ringrazio tutti coloro che hanno contribuito con consigli o osservazioni a migliorare il testo. In particolare ringrazio Andrea Caleo per una attenta lettura del testo (in una versione precedente), che gli ha permesso di trovare alcuni errori e di indicarmi alcune frasi non molto chiare.

Bibliografia essenziale

- 1 Bertotti, Farinella, Vokrouhlicky: “Physics of the Solar System”, 2003, Kluwer
- 2 Paolicchi “Dispense di Astrofisica” e Penco “Meccanica Celeste” (da Fabri/Penco, Dispense di Astronomia); online sul sito www.df.unipi.it
- 3 Landau, Lifchitz “Mechanique” Ed. MIR
- 4 Goldstein: “Classical Mechanics” Addison–Wesley
- 5 AA.VV. “Asteroids III”, 2002, Arizona University Press
- 6 Melosh: “Impact cratering”, 1989, Oxford
- 7 Ward, Brownlee: “Rare Earth”, 2000, Copernicus/Springer Verlag
- 8 Landau, Lifchitz “Theorie de l’elasticité” Ed. MIR

Contents

1	Richiami di meccanica celeste: il problema dei due corpi.	4
1.1	Fondamenti del problema dei due corpi	4
1.2	Orbite chiuse	6
1.3	Risoluzione del problema dei due corpi: orbite kepleriane.	7
1.4	L'equazione di Keplero.	9
1.5	Gli elementi orbitali.	10
2	Richiami di meccanica celeste: il problema dei tre corpi.	12
2.1	La costante di Jacobi	12
2.2	Punti lagrangiani: L_4 e L_5	14
2.3	Gli altri punti lagrangiani e le superfici di Hill	15
2.4	L'invariante di Tisserand	17
3	Il Sistema Solare.	21
3.1	Riconoscimento di un pianeta.	21
3.2	Luminosità di un pianeta; emissione nel visibile e nell'infrarosso.	22
3.3	I pianeti maggiori.	27
3.3.1	Struttura dei pianeti	30
3.3.2	Pianeti e pianeti nani	31
3.4	Corpi minori del sistema solare: i satelliti.	32
3.4.1	I satelliti; presentazione generale	32
3.4.2	Processi fisici rilevanti per i satelliti: la corotazione	38
3.4.3	Processi fisici rilevanti per i satelliti: il limite di Roche	39
3.5	Gli anelli planetari	42
3.5.1	Processi fisici rilevanti per gli anelli: allargamento dissipativo e tempi scala	42
3.5.2	Altri processi fisici rilevanti per gli anelli	47
3.6	Gli asteroidi	48
3.6.1	Introduzione	48
3.6.2	Classificazione delle orbite	49
3.6.3	Risonanze	50
3.6.4	Famiglie dinamiche	53
3.6.5	La distribuzione di massa degli asteroidi	54
3.6.6	I NEO	57
3.6.7	Trasferimento di asteroidi dalla Fascia Principale ai NEO	58
3.6.8	Caratteristiche fisiche e classificazione degli asteroidi	59

3.6.9	Proprietà rotazionali e caratteristiche fotometriche	60
3.7	La fascia di Kuiper-Edgeworth	67
3.8	Le comete	71
4	Evoluzione dinamica del Sistema Solare	74
4.1	Teoria delle perturbazioni: equazioni di Gauss	74
4.2	Equazioni di Lagrange (cenni)	78
4.3	Metodi di approssimazioni; sviluppo in serie di Fourier	79
4.4	Risonanze e fenomeni caotici	81
4.5	Evoluzione dinamica del Sistema Solare	85
4.6	Elementi propri	86
4.7	Effetti dinamici non legati alla gravitazione: pressione di radiazione e Poynting–Robertson	88
4.8	Effetto Yarkovsky	89
4.9	Effetto YORP ed evoluzione dinamica delle famiglie	92
5	Evoluzione collisionale nel Sistema Solare.	95
5.1	Caratteristiche generali dell’evoluzione collisionale.	95
5.2	Fenomenologia sperimentale e astronomica (craterizzazione).	97
5.3	La strength.	99
5.3.1	Collisioni catastrofiche.	100
5.4	Fenomenologia: effetti osservabili delle collisioni catastrofiche.	102
5.4.1	Riaccumulazione di satelliti e asteroidi.	102
5.4.2	Problematiche relative alle famiglie dinamiche di asteroidi.	103
5.5	Impatti con la Terra: rischi e strategie di difesa.	104
5.6	Strumenti teorici: la legge di Hooke.	105
5.7	Strumenti di base: propagazione delle onde nei solidi.	110
5.8	Problemi di scaling, strength statica e dinamica, teoria del danno	113
5.9	Conclusioni: problemi aperti.	115
6	Formazione dei sistemi planetari.	116
6.1	Introduzione.	116
6.2	La formazione stellare.	117
6.2.1	L’inizio del collasso.	117
6.2.2	Fissione per rotazione.	121
6.2.3	La fase “adiabatica”.	123
6.3	Formazione di sistemi planetari: scenario generale.	125
6.3.1	Introduzione.	125
6.3.2	Le caratteristiche primarie del Sistema Solare.	126
6.3.3	Il problema del momento angolare e ipotesi di soluzione.	127
6.3.4	Cenni storici; teorie monistiche (Kant–Laplace) e dualistiche (Jeans).	127
6.3.5	Modello nebulare moderno	128
6.4	Strumenti di analisi teorica dei processi di formazione: I- Le equazioni di Eulero e di Navier-Stokes.	131
6.5	Strumenti II: Il criterio di Jeans.	133

6.5.1	Il criterio semplice.	133
6.5.2	Interpretazione elementare del criterio di Jeans.	137
6.5.3	Generalizzazioni: l'effetto della turbolenza.	137
6.5.4	L'effetto dei campi magnetici.	138
6.5.5	L'effetto della rotazione uniforme.	139
6.5.6	L'effetto della rotazione non uniforme.	140
6.6	Strumenti III– Instabilità in un disco sottile.	142
6.6.1	Dal criterio di Jeans: caso di disco sottile	142
6.6.2	Modello semplice: leggi di conservazione in un disco molto sottile	143
6.6.3	Il criterio di Toomre.	145
6.7	Strumenti IV: Corpi autogravitanti in rotazione.	146
6.8	Inizio dei processi di formazione planetaria: il disco primordiale e i planetesimi.	148
6.8.1	Il disco “minimale”.	148
6.8.2	Struttura verticale del disco.	149
6.8.3	Instabilità gravitazionali	150
6.8.4	Schema alla Safronov:sedimentazione della componente polverosa in disco di piccola massa ed instabilità nella polvere	150
6.8.5	Il ruolo “costruttivo” della turbolenza.	151
6.9	Crescita dei protopianeti.	152
6.10	Formazione dei pianeti giganti e dei corpi minori.	155
6.10.1	La legge di Titius–Bode:formulazione alla Armellini e legame con lo schema alla Safronov.	156
6.10.2	Caratteristiche dei sistemi planetari; scaling–laws e problematiche aperte	158
6.11	La migrazione planetaria	159
6.11.1	Interazione disco–pianeta: la migrazione di tipo I	160
6.11.2	Interazione disco–pianeta: la migrazione di tipo II; altri meccanismi per rallentare o fermare la migrazione	161
6.11.3	La migrazione dovuta a scattering di planetesimi. Il “modello di Nizza” per il Sistema Solare	161
6.11.4	Un'altra possibile causa evolutiva per i sistemi extrasolari: il modello dei “Jumping Jupiters”	162
7	Sistemi planetari extrasolari: scoperta e caratteristiche.	165
7.1	Introduzione. Metodi per la scoperta	165
7.1.1	Imaging; tecniche indirette “esotiche”: pianeti di pulsar, microlensing	166
7.1.2	Scoperta mediante tecniche astrometriche, spettroscopiche e transiti	170
7.2	Caratteristiche dei sistemi planetari extrasolari e problemi interpretativi	175
8	Potenzialita' degli studi di transito. Pianeti abitabili e vita nell'Universo.	184
8.1	Potenzialita' degli studi di transito.	184
8.1.1	L'effetto Rossiter-Mc Laughlin	184
8.1.2	Osservazione dell'eclisse primaria; possibili misure dell'atmosfera planetaria	186
8.1.3	Osservazione dell'eclisse secondaria; difficoltà osservative e Hot-Jupiters	187
8.1.4	Effetti di fase e TTV	187
8.2	Pianeti extrasolari terrestri e zone abitabili	187

8.2.1	Introduzione	187
8.2.2	Ricerca della vita fuori dalla Terra	188
8.2.3	Ricerca di pianeti terrestri e di markers spettroscopici	188
8.2.4	Definizione di zone abitabili e criteri; l'effetto serra	189
8.2.5	Osservazione dettagliata di pianeti abitabili	191
8.3	La vita e la vita intelligente	192
8.3.1	L'equazione di Drake	192
8.3.2	L'ipotesi della "Rare Earth": altre condizioni	193