Chapter 8

Pianeti abitabili e vita nell'Universo – VERSIONE PRELIMINARE

8.1 Pianeti extrasolari terrestri e zone abitabili

8.1.1 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 terrrestri, 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 variegate. 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.

8.1.2 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. 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.

8.1.3 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. È sperabile che missioni spaziali in corso (Kepler) o di prossima attuazione possano dare in merito una risposta convincente, anche per incoraggiare, o meno, 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 saranno però possibili solo in un futuro non troppo prossimo.

8.1.4 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 finchè 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. 3.1) una definizione di $T_{eff,p}$ che corriponde 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 ($\tau = 1$) 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:

$$T_s = T_{eff,p}(3\tau_s - 2)^{1/4} \tag{8.1}$$

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 vapor acqueo, e diminuisce la 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 pedita 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 $0.9 AU$. 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. Poichè, 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 trasnizione. 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 La vita e la vita intelligente

8.2.1 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:

$$N = R_* f_{pl} n_E f_{life} f_{intell} f_{civ} L \tag{8.2}$$

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 della frequenza di sistemi planetari intorno alle stelle ($5-10\%$). 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 una 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.

8.2.2 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 difuori 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 funzionamente 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 favorisce 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, 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 I" 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'elasticitè" 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 Pianeti e pianeti nani 30
3.4 Corpi minori del sistema solare: i satelliti. 31
3.4.1 I satelliti; presentazione generale 31
3.4.2 Processi fisici rilevanti per i satelliti: la corotazione 37
3.4.3 Processi fisici rilevanti per i satelliti: il limite di Roche 38
3.5 Gli anelli planetari 41
3.5.1 Processi fisici rilevanti per gli anelli: allargamento dissipativo e tempi scala 41
3.5.2 Altri processi fisici rilevanti per gli anelli 46
3.6 Gli asteroidi 47
3.6.1 Introduzione 47
3.6.2 Classificazione delle orbite 48
3.6.3 Risonanze 49
3.6.4 Famiglie dinamiche 52
3.6.5 La distribuzione di massa degli asteroidi 53
3.6.6 I NEO 56
3.6.7 Trasferimento di asteroidi dalla Fascia Principale ai NEO 57
3.6.8 Caratteristiche fisiche e classificazione degli asteroidi 58

3.6.9 Proprietà rotazionali e caratteristiche fotometriche 59
3.7 La fascia di Kuiper-Edgeworth 66
3.8 Le comete 70

4 Evoluzione dinamica del Sistema Solare 73
4.1 Teoria delle perturbazioni: equazioni di Gauss 73
4.2 Equazioni di Lagrange (cenni) 77
4.3 Metodi di approssimazioni; sviluppo in serie di Fourier 78
4.4 Risonanze e fenomeni caotici 80
4.5 Evoluzione dinamica del Sistema Solare 84
4.6 Elementi propri 85
4.7 Effetti dinamici non legati alla gravitazione: pressione di radiazione e Poynting–Robertson 87
4.8 Effetto Yarkovsky 88
4.9 Effetto YORP ed evoluzione dinamica delle famiglie 91

5 Evoluzione collisionale nel Sistema Solare. 94
5.1 Caratteristiche generali dell'evoluzione collisionale. 94
5.2 Fenomenologia sperimentale e astronomica (craterizzazione). 96
5.3 La strength. 98
5.3.1 Collisioni catastrofiche. 99
5.4 Fenomenologia: effetti osservabili delle collisioni catastrofiche. 101
5.4.1 Riaccumulazione di satelliti e asteroidi. 101
5.4.2 Problematiche relative alle famiglie dinamiche di asteroidi. 102
5.5 Impatti con la Terra: rischi e strategie di difesa. 103
5.6 Strumenti teorici: la legge di Hooke. 104
5.7 Strumenti di base: propagazione delle onde nei solidi. 109
5.8 Problemi di scaling, strength statica e dinamica, teoria del danno 112
5.9 Conclusioni: problemi aperti. 114

6 Formazione dei sistemi planetari. 115
6.1 Introduzione. 115
6.2 La formazione stellare. 116
6.2.1 L'inizio del collasso. 116
6.2.2 Fissione per rotazione. 120
6.2.3 La fase "adiabatica". 122
6.3 Formazione di sistemi planetari: scenario generale. 124
6.3.1 Introduzione. 124
6.3.2 Le caratteristiche primarie del Sistema Solare. 125
6.3.3 Il problema del momento angolare e ipotesi di soluzione. 126
6.3.4 Cenni storici; teorie monistiche (Kant–Laplace) e dualistiche (Jeans). . . 126
6.3.5 Modello nebulare moderno 127
6.4 Strumenti di analisi teorica dei processi di formazione: I- Le equazioni di Eulero e di Navier-Stokes. 130
6.5 Strumenti II: Il criterio di Jeans. 132

6.5.1 Il criterio semplice. 132
6.5.2 Interpretazione elementare del criterio di Jeans. 136
6.5.3 Generalizzazioni: l'effetto della turbolenza. 136
6.5.4 L'effetto dei campi magnetici. 137
6.5.5 L'effetto della rotazione uniforme. 138
6.5.6 L'effetto della rotazione non uniforme. 139
6.6 Strumenti III– Instabilità in un disco sottile. 141
6.6.1 Dal criterio di Jeans: caso di disco sottile 141
6.6.2 Modello semplice: leggi di conservazione in un disco molto sottile 142
6.6.3 Il criterio di Toomre. 144
6.7 Strumenti IV: Corpi autogravitanti in rotazione. 145
6.8 Inizio dei processi di formazione planetaria: il disco primordiale e i planetesimi. . 147
6.8.1 Il disco "minimale". 147
6.8.2 Struttura verticale del disco. 148
6.8.3 Instabilità gravitazionali 149
6.8.4 Schema alla Safronov:sedimentazione della componente polverosa in disco di piccola massa ed instabilità nella polvere 149
6.8.5 Il ruolo "costruttivo" della turbolenza. 150
6.9 Crescita dei protopianeti. 151
6.10 Formazione dei pianeti giganti e dei corpi minori. 154
6.10.1 La legge di Titius–Bode:formulazione alla Armellini e legame con lo schema alla Safronov. 155
6.10.2 Caratteristiche dei sistemi planetari; scaling–laws e problematiche aperte 157
6.11 La migrazione planetaria 158
6.11.1 Interazione disco–pianeta: la migrazione di tipo I 159
6.11.2 Interazione disco–pianeta: la migrazione di tipo II; altri meccanismi per rallentare o fermare la migrazione 160
6.11.3 La migrazione dovuta a scattering di planetesimi. Il "modello di Nizza" per il Sistema Solare 160
6.11.4 Un'altra possibile causa evolutiva per i sistemi extrasolari: il modello dei "Jumping Jupiters" 161

7 Sistemi planetari extrasolari:scoperta e caratteristiche. 164
7.1 Introduzione. Metodi per la scoperta 164
7.1.1 Imaging; tecniche indirette "esotiche": pianeti di pulsar, microlensing . . 165
7.1.2 Scoperta mediante tecniche astrometriche, spettroscopiche e transiti . . . 169
7.2 Caratteristiche dei sistemi planetari extrasolari e problemi interpretativi 173

8 Pianeti abitabili e vita nell'Universo – VERSIONE PRELIMINARE 182
8.1 Pianeti extrasolari terrestri e zone abitabili 182
8.1.1 Introduzione 182
8.1.2 Ricerca della vita fuori dalla Terra 182
8.1.3 Ricerca di pianeti terrestri e di markers spettroscopici 183
8.1.4 Definizione di zone abitabili e criteri; l'effetto serra 184
8.2 La vita e la vita intelligente 186

8.2.1 L'equazione di Drake 186
8.2.2 L'ipotesi della "Rare Earth": altre condizioni 186

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 luminosita' del Sole scende di tanto) e di due per una stella di tipo M (con temperature intorno ai 3000). Al limite uno studio fotometrico su diverse lunghezze d'onda o (meglio) spettroscopico potrebbe darci le informazioni necessrie per passara dalle 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' . 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" (earch of xtra errestrial ntelligence), partito in quegli anni e che non ha poi dato risultati significativi. Secondo Drake:

$$= \quad f \quad f \quad f \quad f \qquad (8.4)$$

dove è il numero delle civiltà in grado di farsi identificare, 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 ; mentre 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 .
- La frazione tra questi in cui si sviluppano vita intelligente (f) e, fra questi, civiltà evolute tecnologicamente (f).

Infine 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 una 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 difuori 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 funzionamente 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 favorisce 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’elasticitè” Ed. MIR

Contents

1 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 12

2.1 La costante di Jacobi 12
2.2 Punti lagrangiani: e 14
2.3 Gli altri punti lagrangiani e le superfici di Hill 15
2.4 L'invariante di Tisserand 17

3 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 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 5
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

6 116
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

7 165

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

1 4

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; difficolta' 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