

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia Galileo Galilei

Corso di Laurea Magistrale in

Astronomia



Abitabilità su scala locale, Galattica, cosmologica.

Laureando: Marco Fecchio

Relatore: Professor FRANCESCO MARZARI

Correlatore: Professor LUIGI SECCO

Anno Accademico 2015-2016

A Dario, Giovanna, Sergio, Luca, Matteo,  
Anna, Luana, Samantha, Leonardo e Francesca,  
luci preziose nelle notti più buie.



# Indice

<b>1</b>	<b>Abitabilità e CHZ</b>	<b>3</b>
1.1	Generalità sul Sistema Solare . . . . .	3
1.1.1	Regolarità del Sistema Solare e Famiglie di Pianeti . . . . .	8
1.2	Teoria Astronomica Climatica . . . . .	9
1.2.1	Fattori Climatici da variabili esterne . . . . .	10
1.2.2	Fattori climatici da variabili interne e Albedo . . . . .	11
1.2.3	Velocità di Fuga e la Reazione di Urey . . . . .	19
1.3	Venere, Marte e le peculiarità della Terra . . . . .	21
1.3.1	Venere . . . . .	22
1.3.2	Marte . . . . .	24
1.3.3	Peculiarità della Terra . . . . .	27
1.3.4	Sistema Terra-Luna . . . . .	33
1.4	La CHZ . . . . .	38
1.4.1	CHZ del Sistema Solare: definizioni e limiti . . . . .	39
1.4.2	Zone abitabili per altre stelle . . . . .	41
1.4.3	Condizioni su Pressione, Temperatura e orbita planetaria . . . . .	46
1.4.4	Evoluzione Stellare: variazione della CHZ. . . . .	49
1.4.5	Esopianeti e Missioni Spaziali . . . . .	50
1.5	Conclusioni su Abitabilità e CHZ . . . . .	53
<b>2</b>	<b>La GHZ</b>	<b>55</b>
2.1	Definizione di GHZ . . . . .	55
2.1.1	Un giusto tempo per la vita . . . . .	63
2.1.2	Limiti per la GHZ . . . . .	64
2.2	Maree galattiche planari sulla nube di Oort e sistemi analoghi . . . . .	67
2.2.1	Limiti del lavoro sulla marea . . . . .	68
2.2.2	Estensione della Nube di Oort e Potenziali galattici . . . . .	69
2.2.3	Sistema corotante in approssimazione di Hill . . . . .	75
2.2.4	Effetto della marea Galattica su un ammasso globulare . . . . .	79
2.2.5	Discussioni e osservazioni sugli effetti di marea a diverse distanze . . . . .	81
2.2.6	Conclusioni sugli effetti mareali . . . . .	85
2.3	Conclusioni sulla GHZ . . . . .	88



<b>3</b>	<b>Metallicità della Galassia</b>	<b>90</b>
3.1	Il modello di Naab e Ostriker (2006)	92
3.1.1	La fase cosmologica	93
3.1.2	Modello per l'evoluzione del disco	94
3.2	Metallicità e GHZ	105
3.2.1	Posizione iniziale del Sole	106
3.2.2	Migrazione del Sole e GHZ	108
3.3	Da dove proviene l'acqua del nostro pianeta?	110
3.3.1	Problemi non risolti	112
3.4	Conclusioni sulla metallicità e la migrazione solare	114
<b>4</b>	<b>Abitabilità cosmologica</b>	<b>116</b>
4.1	Abitabilità cosmologica (COSH)	116
4.1.1	"Interplay" fra settori e requisiti	117
4.2	Sui Principi della Cosmologia	118
4.2.1	Principio Cosmologico Perfetto	118
4.2.2	Principio Cosmologico	118
4.2.3	Cosmologia Moderna e Centro dell'Universo	119
4.2.4	L'enigma dei Grandi Numeri	120
4.2.5	Principio Antropico	121
4.3	A ) I valori delle varie costanti fisiche fondamentali.	122
4.3.1	L'importanza delle costanti della fisica fondamentale per la Vita	125
4.4	B) Le proprietà globali dell'universo e della sua storia	126
4.4.1	Crescita della complessità	126
4.4.2	La sintonia fine (fine tuning) dell'espansione	127
4.4.3	Nucleosintesi del Carbonio e dell'Ossigeno	128
4.4.4	Ciclo CNO e la rarità del Fosforo	129
4.5	Conclusione all'abitabilità cosmologica	132
	<b>Conclusioni sull'abitabilità</b>	<b>134</b>
<b>A</b>	<b>Sulle orbite</b>	<b>138</b>
A.1	Tutorial di dinamica delle orbite	138
A.1.1	Leggi di Keplero per il moto dei pianeti	138
A.1.2	La legge della gravitazione di Newton.	139
A.1.3	Problema a due corpi	140
A.2	Elementi Orbitali	144
A.3	Problema a tre corpi ristretto	147
<b>B</b>	<b>Approssimazione di Hill</b>	<b>151</b>
B.1	Approssimazione di Hill in 3D del potenziale assisimmetrico	151
B.1.1	Contributo di marea	154

<b>C Dati sul Sistema Solare</b>	<b>155</b>
C.1 Dati fisici . . . . .	155
C.2 Cenni sulla teoria delle perturbazioni . . . . .	161
C.3 Obliquità e Costante di Precessione . . . . .	162
<b>Bibliografia</b>	<b>166</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>179</b>

# Elenco delle figure

1.1	Posizione dei bracci della Galassia [a]. . . . .	5
1.2	Disposizione del Sistema Solare, della fascia di Kuiper e della Nube di Oort (Google Immagini). . . . .	7
1.3	Spettro della radiazione solare per illuminazione diretta sia all'inizio che alla fine dell'atmosfera terrestre. Il Sole produce una luce con una distribuzione simile a quella che ci si attenderebbe da un corpo nero a 5525 K (5250 °C), che è approssimativamente la temperatura superficiale del Sole (5777 K). Mano a mano che la luce passa attraverso l'atmosfera, parte della radiazione è assorbita dai gas in specifiche bande di assorbimento. Un contributo additivo è dovuto allo scattering Raleigh, che è responsabile per il colore blu dell'atmosfera. Le curve sono basate sugli spettri di riferimento dell' <i>American Society for Testing and Materials (ASTM)</i> . Sono indicate le regioni per l'ultravioletto, il visibile e la luce infrarossa [f1]. . . . .	13
1.4	Struttura interna del globo terrestre. La struttura della Terra può essere definita in due modi: chimicamente o tramite proprietà meccaniche (di equilibrio). Dal punto di vista chimico la Terra può essere divisa in <i>crosta</i> , <i>mantello superiore</i> , <i>mantello inferiore</i> , <i>nucleo esterno</i> e <i>nucleo interno</i> . Meccanicamente, si può suddividere in <i>litosfera</i> , <i>astenosfera</i> , <i>mesosfera</i> , <i>nucleo esterno</i> e <i>nucleo interno</i> [u]. . . . .	19
1.5	Confronto delle dimensioni da sinistra a destra di Mercurio, Venere, Terra e Marte. . . . .	20
1.6	Gradiente di temperatura nell'atmosfera di Venere [a]. . . . .	22
1.7	Confronto tra il gradiente di temperatura nell'atmosfera di Marte e della Terra [a]. . . . .	22
1.8	Il vulcano Monte Olimpo su Marte [o]. . . . .	25
1.9	Curva di insolazione di Milankovitch dal presente fino a 600000 anni fa, ed identificazione dei picchi con i periodi glaciali del Pleistocene conosciuti; in ordinata l'insolazione media estiva ad una latitudine di 65°N, $I_0 \equiv I(t = 0)$ (Tomasella, 1992). . . . .	28

1.10	Variazione dell'eccentricità dell'orbita. Sono rappresentate delle ellissi di diversa eccentricità. In tempi millenari, l'orbita della Terra si comporta quasi in questo modo, anche se il disegno mostra una situazione volutamente esagerata e il Sole in effetti non si sposta [t].	29
1.11	Meccanismo di <i>subduzione</i> della <i>tettonica a placche</i> e di riemissione delle particelle da parte dei vulcani durante le loro eruzioni [b].	31
1.12	Raffigurazione del campo magnetico terrestre e sue caratteristiche ( <i>Goole Immagini</i> ).	32
1.13	Gradiente di temperatura nell'atmosfera della Terra [a].	33
1.14	Evoluzione dell'obliquità dell'attuale configurazione del sistema Terra-Luna (linea continua) e per una configurazione nella quale l'orbita lunare si è espansa da 60.3 a circa 66.5 raggi terrestri (linea con i punti) (v. <i>Tomasella et al., 1995</i> ).	34
1.15	Evoluzione della Terra con la Luna a 68 raggi terrestri senza le frequenze $S_3, S_4, S_6$ (v. <i>Tomasella et al., 1995</i> ).	35
1.16	Evoluzione dell'obliquità della Terra (linea nera) e di Marte (linea grigia) per 15 milioni di anni nel passato (in alto) e nel futuro (in basso) (v. <i>Tomasella et al., 1995</i> ).	36
1.17	Flusso di energia solare ai poli per Terra e Marte, nel passato (in alto) e nel futuro (in basso) (v. <i>Tomasella et al., 1995</i> ).	37
1.18	Confronto tra la zona abitabile del Sistema Solare (a sinistra) con quelle di altri sistemi planetari (in centro e a destra) ( <i>Goole Immagini</i> ).	40
1.19	Zona Abitabile per stelle con diversa temperatura superficiale ( <i>Kasting &amp; Harman, 2013</i> ).	42
1.20	Estensione della HZ (in verde), per stelle di diversi tipi spettrali (pallini blu a sinistra, stelle in sequenza principale); si riportano i pianeti del Sistema Solare (pallini blu in orizzontale), la zona di ricerca della missione Kepler (scritta in nero) e il periodo orbitale dei pianeti nella parte superiore del grafico, in anni. L'asse x riporta le distanze dalle stelle in UA, l'asse y la massa delle stelle in $M_{\odot}$ ( <i>Kaltenegger et al., 2010; [r]</i> ).	44
1.21	Confronto visivo con la CHZ del Sistema Solare (in alto) (0.95-1.37 UA da <i>Kasting et al., 1993</i> ) con quella di una stella tipo M (in centro) (0.17-0.33 UA), lasciando in entrambe le immagini Venere, Terra e Marte come riferimento (v. Tab 1.1); la CHZ della stella M è molto più vicina alla stella stessa. L'immagine in basso rappresenta artisticamente l'ingrandimento della CHZ in verde della stella tipo M, immaginando che essa sia Gliese 667C ( <i>Goole Immagini</i> ); ciò rende possibile rappresentare i suoi pianeti (v. Tab. 1.6).	45

- 1.22 Il punto triplo e il punto critico. Il punto triplo rappresenta un particolare stato termodinamico determinato dai valori di temperatura e pressione in cui coesistono in condizioni di equilibrio fra loro tre fasi di aggregazione di una sostanza; il punto critico di una sostanza, invece, è l'insieme di particolari condizioni di massima temperatura e massima pressione (dette temperatura critica e pressione critica) in corrispondenza delle quali una sostanza può esistere come miscela bifase gas-liquido. Quando durante il riscaldamento una miscela bifase gas-liquido giunge alla temperatura critica si nota visivamente la scomparsa del cosiddetto "menisco", che costituisce l'interfaccia di separazione tra la fase liquida e la fase gassosa. Oltre tale punto non si parla più di gas e liquido, bensì di fluido supercritico [*v1; a*]. . . . . 47
- 1.23 Diagramma delle fasi dell'acqua [*v*]. . . . . 47
- 1.24 Confronto tra la CHZ di *Kepler-22* e la CHZ del Sistema Solare (*Google Immagini*). . . . . 53
- 2.1 In alto, distribuzione spazio-tempo di metalli da *Lineweaver et al. (2004)*. Metallicità a diversa distanza Galattocentrica (da 2,5 kpc, curva superiore, a 20,5 kpc, curva inferiore, con incrementi di 2 kpc) in funzione del tempo e confronto con la probabilità di ospitare pianeti terrestri in funzione della metallicità della stella ospite (pannello a destra). L'epoca a cui il Sole si forma è evidenziato da un punto bianco. In basso, frazione di pianeti attorno ad una stella di una massa solare come funzione delle loro masse dalle simulazioni di *Mordasini et al. (2006)*. Ci sono tre risultati per tre diversi valori della metallicità della stella e per il corrispondente disco proto-planetario. . . . . 57
- 2.2 La GHZ nel disco della Galassia ottenuta usando i requisiti basati sull'ospitare la presenza di stelle, con adatta metallicità (parte blu), con sufficiente tempo per l'evoluzione (parte grigia) e libera dal fattore di estinzione della vita a causa di esplosioni da supernova (parte rossa). I bordi in bianco corrispondono al 68% (interno) e il 95% (esterno) della  $P_{GHZ}$ , quindi alle stelle originate con il più alto potenziale per ospitare la vita complessa. La linea verde a destra mostra la distribuzione dell'età necessaria per la vita complessa, ottenuta integrando  $P_{GHZ}(r, t)$  su  $r$  (*Lineweaver et al., 2004*). . . . . 59
- 2.3 La GHZ nel disco della Galassia senza il requisito temporale ( $4 \pm 1$  Gyr) per la vita complessa (*Lineweaver et al., 2004*). . . . . 60

- 2.4 La probabilità degli eventi che limitano la dimensione della GHZ fornita da *Prantzos (2006)* per 5 differenti epoche (1, 2, 4, 8 e 13 Gyr) nella storia della Galassia. La probabilità complessiva di pianeti simili alla Terra con la Vita viene mostrata nel pannello in basso a destra e definisce un anello nel disco della Via Lattea estremamente stretto all’inizio della storia Galattica, ma che progressivamente raggiunge l’estensione della quasi totalità del disco Galattico al momento attuale, con un picco a circa 10 kpc. . . . . 61
- 2.5 La GHZ nel disco fornito da *Gowanlock et al. (2011)*. Il numero di pianeti abitabili per parsec (numero fornito dalla barra verticale nel codice colore) è tracciato in funzione della distanza radiale e data di nascita. In questo studio gli effetti negativi dell’azione di supernovae sono ridotti, ottenendo in tal modo che i pianeti abitabili sono prevalentemente nella parte interna della Galassia. . . . . 63
- 2.6 Quadrante del tempo biologico: la vita apparve relativamente presto nella storia della Terra, prima delle sei su una scala di ventiquattro ore (1 Gyr, dalle mezzanotte alle 5.00 circa, linea e freccia rosse). I primi organismi pluricellulari non appaiono però se non alla sera (line e freccia azzurra, altri 3 Gyr, dalle 5.00 circa alle 20.00 circa) e l’ Homo Sapiens è l’ultimo arrivato, circa trenta secondi prima della mezzanotte (*Curtis & Barnes, 1999*). . . . . 64
- 2.7 Fig. 1(a, b) di *Gonzalez et al. (2001)* (v. testo). . . . . 66
- 2.8 Sopra: struttura della Nube di Oort e il suo collocamento rispetto al Sistema Solare (e  $\alpha - Centauri$  come riferimento), si vedono anche: l’*eliosfera*, dove il vento stellare è supersonico, e la *termination shock*, dove il vento stellare diventa subsonico e poi passa a velocità circa nulla nell’*eliopausa*; si rappresenta anche il muro di idrogeno ipotetico (che si pensa sia presente dopo l’eliopausa) e il *bow shock*, dove il vento stellare cala bruscamente a contatto con la magnetopausa del Sole, che collega l’eliopausa con il mezzo interstellare (tali zone sono ancora soggette a vari studi, specialmente grazie alla sonda della *Nasa Voyager 1 (1977)* [e]; la sonda era a circa 134.7 UA dalla Terra all’inizio del 2016). Sotto: la distribuzione dell’inverso del semiasse maggiore ( $a$ ) delle comete della Nube di Oort con l’evidente picco attorno a  $3.7 \cdot 10^{-5} UA^{-1}$  corrispondente ad un afelio di circa 54000 UA (*De Biasi, 2010*). . . . . 70
- 2.9 Contributi alla velocità circolare plottati contro  $r$  per le differenti componenti Galattiche. L’alone di DM ha un profilo MPI. . . . . 74
- 2.10 Contributi alla distribuzione di massa plottati contro  $r$  per differenti componenti Galattiche. L’alone di DM ha profilo MPI. . . . . 75

2.11 Immagine della posizione iniziale per un' orbita della cometa con longitudine galattica $3\pi/2$ nel sistema di riferimento con l'origine sul centro Galattico (X, Y). Sotto si evidenziano le coordinate rotanti (x,y) eliocentriche del sistema di riferimento sinodico usato in approssimazione di Hill ( <i>De Biasi, 2010</i> ). . . . .	76
2.12 L'effetto della marea della Galassia su un ammsso globulare, v. Tab. 2.3. . . . .	79
2.13 Zoom della zona del perielio per l'orbita della cometa a 8 kpc dal centro Galattico (approssimazione di Hill). Sono mostrati i diversi contributi delle componenti Galattiche alla variazione del perielio. L'ordine di sequenza-tempo è caratterizzato da numeri nel caso "Total" ( <i>De Biasi et al., 2015</i> ). . . . .	83
2.14 Zoom della zona perielio per l'orbita della cometa a 4 kpc dal centro Galattico (approssimazione di Hill). Sono mostrati i diversi contributi delle componenti Galattiche alla variazione del perielio. L'ordine di sequenza-tempo è contrassegnato da numeri nel caso "Total" ( <i>De Biasi et al., 2015</i> ). . . . .	84
2.15 Componenti di marea Galattica: da bulge (rosso), disco (blu), alone di DM (grigio), in funzione della distanza dal centro Galattico (in kpc). Il bulge domina fino a circa 7 kpc, il disco nel range di 7-15 kpc, l' alone DM oltre 15 kpc. Un fattore di amplificazione di $10^3$ è stato utilizzato sull' asse y ( <i>De Biasi et al., 2015</i> ). . . . .	84
2.16 Andamento medio del perielio per le diverse distanze ( $R_0 = 4, 8$ kpc) dal centro Galattico in funzione della longitudine per le due diverse direzioni di movimento; vengono evidenziate anche le differenze dei risultati fra i sistemi di riferimento (v. <i>De Biasi et al., 2015</i> ). . . . .	85
2.17 Sovrapposizione delle immagini in Fig. 2.15 e con quelle Fig. 2.2: si evidenzia l'immediato contributo sulla GHZ di ogni componente di marea Galattica in funzione della distanza dal centro Galattico, bulge (linea rossa) fino a 7 kpc, disco (linea blu) da 7 a 15 kpc e alone di DM (linea grigio scura) da 15 kpc in su. . . . .	86
2.18 Velocità circolare dovuta al bulge Galattico. . . . .	87
2.19 Velocità circolare dovuta al disco Galattico. . . . .	87
2.20 Velocità circolare dovuta all'alone Galattico. . . . .	87
2.21 Riproduzione delle componenti di marea della Galassia della Fig. 2.15: disco (blu), bulge (verde acqua), alone (verde scuro), a partire dai <i>trend</i> di velocità circolari delle Fig.re (2.18, 2.19, 2.20). . . . .	88
2.22 Marea del bulge (verde) e del disco (blu) riscalata per i nostri scopi fra 3-6 kpc. . . . .	88

- 3.1 Abbondanze chimiche nelle regioni galattiche HII, in funzione della distanza Galattocentrica, con il Sole mostrato per il confronto. Adattato da *Shaver et al. (1983)*, *Fitch & Silkey (1991)* e *Vilchez & Esteban (1996)* (v. *Pagel, 1997*). . . . . 91
- 3.2 Abbondanza di Ferro in ammassi aperti di età intermedia come funzione della distanza Galattocentrica, con il Sole come confronto. La linea corrisponde ad un gradiente di  $-0.1 \text{ dex kpc}^{-1}$ ; adattato da *Friel & Janes (1993)* (v. *Pagel, 1997*). . . . . 91
- 3.3 Curve di velocità circolare per: disco esponenziale (linea continua nera), un punto con la stessa massa totale (linea punteggiata), corpo sferico con  $M$  data dall' Eq. (3.12) (curva tratteggiata) (*Binney & Tremaine, 1987, Cap. 2, pag. 78*). . . . . 96
- 3.4 Pannello superiore: velocità circolare  $v_c$  del modello della Galassia in funzione del tempo cosmico (linea continua). La linea tratteggiata indica la velocità circolare di un comune alone ad ogni epoca. L'alone della Galassia raggiunge la sua velocità circolare finale ( $\approx 190 \text{ kms}^{-1}$ ) al tempo di formazione  $t_{form} \approx 2.5 \text{ Gyr}$  (indicato da una freccia nel pannello più basso;  $z_f$  è in accordo con  $z_f$  del nostro MPI). Successivamente,  $v_c$  aumenta a causa della crescita del disco fino al suo valore finale  $v_c = 210 \text{ Kms}^{-1}$ . Secondo pannello: evoluzione della lunghezza di scala con il tempo cosmico secondo l'Eq. (3.9) e l'Eq. (3.10), assumendo  $f_r = 1/70$  (linea continua). La linea tratteggiata, per confronto, mostra l'evoluzione per  $r \propto H^{-1}$ . Terzo pannello: densità superficie centrale totale del disco in funzione del tempo secondo l'Eq. (3.20) e l'Eq. (3.22) scalata al valore  $t = t_{form}$  per la Via Lattea e mantenuta costante successivamente. Pannello in basso: evoluzione temporale di  $f_v$  secondo l'Eq. (3.21) e l'Eq. (3.23). . . . . 97
- 3.5 La linea continua mostra l'evoluzione globale della SFR e, con la linea punteggiata, è rappresentata la *rate* di *infall* totale (per la scala temporale, v. Fig. 3.4). . . . . 101
- 3.6 Distribuzione radiale della metallicità del gas dopo 2, 4, 6, 8, 10, 12 Gyr (linea punteggiata) e 13,6 Gyr (linea spessa). Le due rette tratteggiate indicano pendenza massima del gradiente (nel passato) di  $-0.07$  e minima (al presente) di  $-0.04 \text{ dex kpc}^{-1}$ . Il gradiente di metallicità è più ripido nel passato. La pendenza attuale della metallicità delle stelle è indicata dalla linea (punto-tratto indicata dalla freccia) che coincide con quella attuale del gas (linea spessa). . . . . 102
- 3.7 Confronto con la IMF di Scalo (linea continua) e la IMF di Salpeter (linea tratteggiata) (*Mo et al., 2010, pag. 442*). . . . . 104



3.8	Distribuzione radiale attuale della metallicità del gas per la IMF di Salpeter (sottile linea punteggiata) e la IMF di Chabrier (linea continua spessa). Le due rette tratteggiate indicano, al solito, pendenze di $-0.07$ e $-0.04 \text{ dex kpc}^{-1}$ . . . . .	105
3.9	Sopra: distanza Galattocentrica in funzione del tempo per due casi analoghi al Sole nella simulazione eseguita da <i>Kaib et al. (2011)</i> . Entrambe le simulazioni mostrano un cambiamento della posizione del Sole durante la sua storia: uno oscillante tra 6 e 10 kpc (percorso A), mentre l'altro presenta una variazione più forte da una posizione più interna (3 kpc) all'inizio della storia del Sole fino alla posizione Solare corrente (percorso B). L'origine nell'asse dei tempi corrisponde alla nascita del Sole. Sotto: confronto tra le proprietà cinematiche del Sole e dei criteri di selezione per l'analogo Solare nella Galassia simulata a $t = 10 \text{ Gyr}$ . Le colonne sono (da sinistra a destra): nome delle stelle della categoria, età stellare, la distanza dal centro Galattico, la distanza dal piano mediano del disco, la velocità peculiare radiale, tangenziale e verticale. Le distanze Solari dal centro Galattico e al di sopra del piano mediano sono tratte da <i>Reid et al. (2009)</i> e <i>Juric et al. (2008)</i> , rispettivamente. I dati delle velocità solari sono presi da <i>Mc Millan &amp; Binney (2010)</i> . . . . .	109
3.10	Percorsi solari per <i>Kaib et al. (2011)</i> , Fig. 3.9, sovrapposti alla GHZ <i>Lineweaver et al. (2004)</i> , Fig. 2.2. Nel lato destro è mostrata un'evoluzione Solare in disaccordo con le condizioni di abitabilità, mentre il percorso Solare sul pannello di sinistra è compatibile con il sorgere della Vita, anche se la posizione iniziale non tiene conto della sovrametallicità Solare ( <i>De Biasi et al., 2015</i> ). . . . .	110
3.11	Rapporto D/H (deuterio su idrogeno) degli oceani terrestri (linea orizzontale), confrontato con quello di asteroidi, comete della Nube di Oort e della famiglia di Giove [ <i>z1, fonte ESA</i> ]. . . . .	113
4.1	Percorso dell'unificazione delle quattro forze fondamentali in funzione del logaritmo dell'energia e del logaritmo del tempo ( <i>Secco, Galaxy Dynamics, 2016</i> ). . . . .	124
A.1	Geometria della prima e seconda legge di Keplero. . . . .	139
A.2	Diagramma vettoriale delle forze agenti su due copri $m_1$ e $m_2$ con posizione dei vettori $\vec{r}_1$ e $\vec{r}_2$ da $O$ . . . . .	140
A.3	Area $\delta A$ spazzata nel $\delta t$ come un vettore posizione che si muove attraverso un $\delta\theta$ . . . . .	142
A.4	Intersezioni di piani con la superficie di un cono ad angoli diversi originano la famiglia delle curve delle coniche. . . . .	143

A.5	Elementi orbitali $a$ , $E$ , $e$ ( <i>Morbidelli, 2005</i> ). . . . .	145
A.6	Definizione degli elementi orbitali $i$ , $\Omega$ , $\omega$ ( <i>Morbidelli, 2005</i> ). . . . .	146
A.7	Contorni di equal potenziale effettivo $\Phi_{eff}$ per due masse puntiformi in orbite circolari, ( <i>Binney &amp; Tremaine, 2008</i> ). . . . .	149
C.1	Sistema Solare [ $a$ ]. . . . .	155

# Elenco delle tabelle

1.1	Confronto tra i valori della relazione di Titius-Bode (colonne 2 e 3) e quelli ricavati dalle osservazioni per le distanze dei pianeti del Sistema Solare (colonna 4) [a]. . . . .	4
1.2	Dati fisici di Terra e Marte per A, S, $\varepsilon$ , $T_e$ , $T_s$ (Tomasella, 1992). . .	16
1.3	Masse a confronto di Mercurio, Venere, Terra e Luna. . . . .	30
1.4	Eccentricità dei pianeti del Sistema Solare e loro rapporto assiale. . .	30
1.5	Coefficienti per calcolare flussi stellari normalizzati $S_{eff}$ e le corrispondenti zone abitabili ricavate dalla Eq. 1.13 (per stelle con $2600 < T_{eff} < 7200$ K) (Kopparapu et al., 2013). . . . .	42
1.6	Dati dei pianeti possibili (b-g) orbitanti attorno a <i>Gliese 667C</i> (Anglada, 2013; [a]). . . . .	44
2.1	Limiti delle zone di abitabilità Galattica per i vari autori (v. sottosezione seguente per i limiti di <i>Gonzalez et al., 2001</i> ). . . . .	64
2.2	Valori dei parametri per ogni componente Galattica. . . . .	73
2.3	Legenda della Fig. 2.12. . . . .	79
3.1	Parametri di input per il modello del disco della Via Lattea. . . . .	100
3.2	Gradienti di abbondanza osservati per vari elementi. $\Delta r$ (in kpc) è la <i>range</i> della distanza radiale Galattocentrica, per ogni rispettivo contributo (in kpc). I gradienti sono espressi in <i>dex/kpc</i> . La nota (1) in tabella si riferisce al fatto che l'autore ha riscalato la distanza a $R_\odot = 8.5$ kpc; la nota (2) ricorda che <i>Rudolph et al. (1997)</i> includono i dati di <i>Simpson et al. (1995)</i> (v. <i>Portinari &amp; Chiosi, Tab. 1, pg. 4</i> ). . . . .	106
4.1	Costante di accoppiamento, caratteristiche del mediatore (massa a riposo, Spin) e <i>range</i> d'azione per la Forza Gravitazionale. . . . .	123
4.2	Come Tab. 4.1 per la Forza Elettromagnetica. . . . .	123
4.3	Come Tab. 4.1 per la Forza Debole responsabile, ad es., del decadimento $\beta : n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ , con $n$ neutrone, $p$ protone, $e^-$ elettrone, $\tilde{\nu}_e$ antineutrino elettronico. . . . .	123
4.4	Come Tab. 4.1 per la Forza Forte. . . . .	124

4.5	Valori di tempo, energia e temperatura alla fine delle Fasi 0, 1, 2, 3 rispettivamente, TOE, GUT, Unificazione Elettrodebole (UE), confinamento dei quarks. Si ricorda che alla fine della GUT vi è asimmetria materia antimateria, <i>Inflazione</i> ; alla fine della Fase 3 vi è il confinamento dei <i>quarks</i> nei nucleoni: $p, n$ . . . . .	125
C.1	Dati del Sole [ $a$ ]. . . . .	156
C.2	Dati di Venere [ $a$ ]. . . . .	157
C.3	Dati della Terra [ $a$ ]. . . . .	158
C.4	Dati di Marte [ $a$ ]. . . . .	159
C.5	Dati di Phobos [ $a$ ]. Nota: il piano di Laplace, in astronomia, è definito come il piano medio su cui si situa l'orbita di un satellite naturale durante un ciclo di precessione (ovvero, in termini più rigorosi, il piano perpendicolare al polo di precessione orbitale del corpo). . . . .	160
C.6	Dati di Luna [ $a$ ]. . . . .	161

# Introduzione

*In principio Dio creò il cielo e la Terra. Ora la Terra era informe e deserta e le tenebre ricoprivano l'abisso e lo spirito di Dio aleggiava sulle acque. Dio disse: «Sia la luce!». E la luce fu. Dio vide che la luce era cosa buona e separò la luce dalle tenebre e chiamò la luce giorno e le tenebre notte. E fu sera e fu mattina: primo giorno (La Bibbia: Genesi, 1-5).*

L'uomo è un essere cosciente ed immerso nell'infinità del Cosmo. Quando all'alba dell'umanità, per la prima volta, alzò lo sguardo verso il cielo notturno e vide il firmamento, i suoi occhi accolsero le luci antiche di miliardi di stelle. Forse proprio in quel momento un nuovo desiderio di conoscere, scoprire ed esplorare, al di là di un mero istinto di sopravvivenza, stimolò i grandi interrogativi del genere umano: *"Chi siamo? Perché esistiamo? e ... Siamo soli in questo infinito spazio-tempo che ci ospita?"*. Appare come bisogno ancestrale la ricerca delle risposte a queste domande, necessità che, in tutte le epoche e in tutti gli aspetti della cultura, ha accompagnato la storia dell'uomo: filosofia, arte, letteratura, religione e scienza sono binari del *sapere* che, sempre più, rischiano di correre parallelamente a loro stessi e di perdersi nell'oblio del tempo moderno, frenetico ed effimero, divenendo inconsistenti, fini a loro stessi, ma se come *archetipi* convergono in un centro di *verità*, ascendendo ad una *causa comune dell'esistere*, allora è possibile raggiungere una sorta di contemplazione di un *disegno cosmico* nel quale il *tutto* non è solo somma delle parti e dove i singoli risultati, nelle varie discipline e arti, confluiscono in una *visone d'insieme* che forse, un giorno, potrà definire meglio il *nostro posto* nell'universo.

Da sempre il desiderio di scoprire ed esplorare mondi lontani ha accompagnato i sogni e le fantasie degli uomini e delle donne del nostro meraviglioso pianeta, la Terra; la scienza ha sempre cercato di comprendere se ci fosse uno *scopo* nella *bellezza* che adorna il nostro mondo e negli ultimi tempi ha investito molte risorse per vedere oltre i nostri confini più prossimi fino a rubare gli *echi più antichi della creazione*. Il lungo ed affascinante cammino che ha portato alle scoperte più recenti della scienza ha radici profonde nella storia dell'umanità. Trattare il concetto di *abitabilità* è un onore ed un onere; molti sono i vincoli e gli aspetti fisici-cosmologici e biologici da considerare. E' un lavoro assai complesso, ma di estremo interesse per cercare risposta al *perché dell'esistenza*. Casualità o *Progetto*? Domanda antica tanto

quanto la nostra coscienza. Dalle visioni antropocentriche del passato sull'unicità dell'uomo, alle scoperte recenti di altri mondi, questo interrogativo rimane sempre attuale. Cercheremo di trattare le condizioni di abitabilità sfruttando le conoscenze esistenti per tentare di costruire vincoli più stringenti di quelli attuali e per capire dove e come la *Vita* può fiorire e svilupparsi nel nostro vasto e bellissimo universo.

Nel primo capitolo parleremo delle condizioni e delle nozioni generali dell' *abitabilità*. Cercheremo di capire il significato di *Zona Abitabile Circumstellare (CHZ)* nel nostro Sistema Solare e in altri sistemi analoghi, specificando la situazione della Terra, di Venere e di Marte, discutendo l'importanza di vari aspetti, tra i quali: acqua liquida in superficie, relazione massa-raggio del pianeta per ricavare la velocità di fuga e l'altezza di scala dell'atmosfera, i moti dei pianeti, la presenza di satelliti naturali, da *Tomasella et al. (1992 e 1995)*, e del campo magnetico. In *Appendice C* troviamo alcune importanti caratteristiche del Sistema Solare. Nel secondo capitolo sviluppiamo le definizioni della *Zona Abitabile Galattica (GHZ)* e la sua costruzione fornita da *Prantzos (2006)* e da *Lineweaver et. al (2004)*. Si introdurrà, inoltre, l'effetto della marea Galattica planare sulla Nube di Oort e nubi analoghe per capirne il possibile effetto di iniezione cometaria verso il sistema planetario interno, evento indispensabile per definire l'abitabilità in una determinata zona (e in un dato tempo). A tal proposito si considera, con particolare attenzione, il sistema di Hill, seguendo il lavoro di *De Biasi et al. (2015)*; in *Appendice A* vi è un tutorial delle orbite, in *Appendice B* lo sviluppo dell' approssimazione di Hill per potenziali 3D. Nel terzo capitolo analizzeremo l'argomento assai controverso della metallicità nella nostra galassia, la Via Lattea (Milky Way), da un lavoro di *Naab & Ostriker (2006)*, anche nel contesto di una possibile migrazione solare, con i rispettivi contributi di marea a seconda della posizione che il Sole si è trovato ad occupare nella sua storia evolutiva. Nel quarto capitolo cercheremo di estendere il concetto di abitabilità a *livello cosmologico*, seguendo il lavoro di *Secco (2009)*: vedremo le tappe fondamentali che l'Universo stesso ha dovuto percorrere perchè fosse possibile la *Vita*<sup>1</sup>.

Le fonti bibliografiche da testi, articoli, tesi e dispense vengono citate di volta in volta in riferimento all'elenco presentato in ordine alfabetico nella *Bibliografia*; le fonti *on-line*, invece, verranno citate con una lettera tra parentesi quadra riferita all'elenco delle *fonti on-line* presente alla fine della *Bibliografia*.

---

<sup>1</sup>Quando ci riferiamo ad uno sviluppo complesso dell' *vita*, useremo la "V" maiuscola.

# Capitolo 1

## Abitabilità e CHZ

In questo primo capitolo trattiamo le nozioni generali per comprendere il concetto di abitabilità, arrivando a definire prima di tutto l'abitabilità attorno ad una stella (*CHZ: circumstellar habitable zone*) per poi passare a quella nella Galassia (*GHZ: galactic habitable zone*) (Cap. 2) ed in fine a quella nell'universo, (Cap. 4). Il percorso per generare vita biologica nell'universo appare assai tortuoso, con molteplici ostacoli, alcuni dei quali verranno di seguito discussi. Tra le varie fonti a disposizione, che verranno di volta in volta specificate, prenderemo spunto principalmente da testi e dispense per il corso di Astronomia e da siti *on-line* (v. *Bibliografia*). Cominciamo descrivendo alcune caratteristiche del nostro sistema planetario, luogo meraviglioso che ospita un *Pianeta Azzurro* molto speciale, la Terra, unica *culla* conosciuta per la Vita complessa. Caratteristiche del Sole, dei pianeti e dei satelliti presi in considerazione si trovano in *Appendice C*. Discuteremo poi la Teoria Astronomica Climatica ed evidenzieremo come alcuni fattori, sia interni che esterni al pianeta, siano essenziali per definire il concetto di *abitabilità*. Si analizzeranno, inoltre, le caratteristiche dei pianeti Venere, Marte e Terra, nonché l'importanza della stabilità dinamica del nostro pianeta dovuta alla presenza della Luna (note sulla dinamica planetaria e suoi parametri si trovano in *Appendice C*). Definiremo, infine, la fascia di abitabilità, la CHZ del nostro Sistema Solare e di altri sistemi planetari.

### 1.1 Generalità sul Sistema Solare

Il Sistema Solare si presenta costituito dal Sole, dai corpi ad esso gravitazionalmente legati, otto pianeti (Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno) più il pianeta nano Plutone, da un insieme di corpi minori come asteroidi e comete, da polveri interplanetarie e da un vento solare composto da elettroni, protoni e in piccola percentuale da nuclei di elio. Lo spettro di massa di questi corpi minori ricopre un intervallo di ben 40 ordini di grandezza in massa. Una formula empirica interessante, che descrive con buona approssimazione i semiassi maggiori

delle orbite dei pianeti del Sistema Solare, è la legge di *Titius-Bode*. *Johann Daniel Titius* e *Johann Elert Bode (1772)* [c] diedero la seguente formulazione originaria:  $a = (n + 4)/10$ , dove  $a$  è espressa in UA (Unità Astronomica) e  $n$  assume valori 0, 3, 12, 24, 48. Una formulazione più moderna può essere presentata definendo  $d_i$  i semiassi maggiori delle orbite di ciascun pianeta, in UA, come:  $d_i = 0,4 + 0,3 \times 2^i$ , con  $i = -\infty, 0, 1, 2, \dots$ , assumendo la distanza Terra-Sole pari ad 1 UA [a]. Ripor-tiamo alcuni esempi per confrontare i valori forniti dalle osservazioni con quelli della relazione (teorici) per le distanze dei pianeti nel Sistema Solare:

Pianeta	$2^i$	Distanza Teorica (UA)	Distanza Osservata (UA)
Mercurio	0	0.4	0.39
Venere	1	0.7	0.72
Terra	2	1.0	1.00
Marte	4	1.6	1.52
Cerere	8	2.8	2.77
Giove	16	5.2	5.20
Saturno	32	10.0	9.54
Urano	64	19.6	19.2
Nettuno	128	38.8	30.1
Plutone	128	38.8	39.5
Eris	256	77.2	67.7

Tabella 1.1: Confronto tra i valori della relazione di Titius-Bode (colonne 2 e 3) e quelli ricavati dalle osservazioni per le distanze dei pianeti del Sistema Solare (colonna 4) [a].

Fra gli otto pianeti, Nettuno è l'unico a discostarsi in maniera rilevante dal valore aspettato; l'ordine di successione corrisponde, invece, al semiasse maggiore dell'orbita di Plutone. Non esistono teorie confermate che giustifichino la legge di Titius-Bode; la spiegazione attualmente più accreditata per la legge è che la risonanza orbitale dei pianeti esterni crei regioni attorno al Sole prive di orbite stabili a lungo termine. Simulazioni della formazione ed evoluzione del Sistema Solare sembrano accreditare l'ipotesi che la legge di Titius-Bode possa derivare direttamente dai meccanismi di formazione planetaria.

Il Sole, assieme al Sistema Solare, si trova alla periferia del sistema dinamico al quale appartiene, la Galassia o Via Lattea, alla distanza di circa 8 kpc dal centro Galattico, a solo una decina di parsec dal piano di simmetria all'interno del frammento di braccio a spirale noto come il braccio di Orione, a circa 2 kpc dal braccio di Perseo, come mostrato nella Fig. 1.1:





la *fascia principale degli asteroidi*, la *fascia di Kuiper*, il *disco diffuso* e la *Nube di Oort* (v. Fig. 1.2).

La *fascia principale degli asteroidi* è la regione del Sistema Solare situata grossomodo tra le orbite di Marte e di Giove. È occupata da numerosi corpi di forma irregolare chiamati asteroidi o pianeti minori. Circa metà della massa della fascia è contenuta nei quattro asteroidi più grandi, Cerere, Vesta, Pallade e Igea. Questi hanno diametri medi di oltre 400 km, mentre Cerere, l'unico pianeta nano della fascia, ha un diametro medio di circa 950 km. I restanti corpi hanno dimensioni più ridotte, fino a quelle di un granello di polvere. La fascia degli asteroidi si è formata dalla nebulosa solare primordiale durante l'aggregazione di planetesimi, che a loro volta hanno formato i protopianeti (Marzari, 2012). Tra Marte e Giove, le perturbazioni gravitazionali causate da Giove avevano dotato i protopianeti di troppa energia orbitale perché potessero accrescersi in pianeti. Le collisioni diventarono troppo violente, così, invece di aggregarsi, i planetesimi e la maggior parte dei protopianeti si frantumarono. Di conseguenza, il 99,9% della massa iniziale della fascia degli asteroidi andò persa nei primi 100 milioni di anni di vita del Sistema Solare. Alla fine, alcuni frammenti si fecero strada verso il Sistema Solare interno, causando impatti meteoritici con i pianeti interni (Yeomans D. K., 2006); [a]).

La *fascia di Kuiper* o fascia di Edgeworth-Kuiper è una regione del Sistema Solare che si estende dall'orbita di Nettuno (alla distanza di 30 UA) fino a circa 50 UA dal Sole. Si tratta di una fascia costituita da corpi minori del Sistema Solare, esterna rispetto all'orbita dei pianeti maggiori, simile alla *fascia principale degli asteroidi*, ma più estesa; inoltre, mentre la *fascia principale* è costituita in gran parte da asteroidi di natura rocciosa, gli oggetti della *fascia di Kuiper* sono composti principalmente da sostanze volatili congelate, come ammoniaca, metano e acqua. Nella fascia sono stati scoperti oltre 1000 oggetti (*Kuiper belt objects*, o *KBO*), e si pensa che ne possano esistere oltre 100000 con diametro superiore ai 100 km. La maggior parte dei KBO, come si è visto usando la spettroscopia, sono costituiti da ghiaccio ed hanno la stessa composizione chimica delle comete e, così come nelle comete, è evidente in essi la presenza di composti organici. Molti astronomi hanno pensato che tali oggetti siano appunto comete periodiche con periodo orbitale inferiore ai 200 anni che, non avvicinandosi mai al Sole, non emettono la loro coda. Tuttavia, gli studi, a partire dalla metà degli anni '90, hanno dimostrato che la *fascia di Kuiper* è dinamicamente stabile, e che il vero luogo di origine delle comete sia da ricercarsi nel *disco diffuso* (Delsanti & Peixinho, 2015; [a]). Il più grande tra i KBO è Plutone e il più massiccio è il pianeta nano Eris, scoperto nel 2005 (anche se parte degli scienziati considerano Eris facente parte del *disco diffuso* piuttosto che della *fascia di Kuiper*).

Il *disco diffuso* (più raramente detto anche *disco sparso*, dall'inglese *scattered disc*) è una regione periferica del Sistema Solare ricca di planetoidi ghiacciati noti

come *oggetti del disco diffuso* (*scattered disc objects*), una particolare categoria di oggetti *transnettuniani* (numerosi piccoli corpi, appartenenti al Sistema Solare, ma la cui orbita si trova interamente o per la maggior parte oltre a quella di Nettuno). Tale popolazione solitamente è suddivisa in due sotto-popolazioni, quella, appunto, del *disco diffuso o sparso* e quella della *fascia di Kuiper*: la parte più interna del *disco diffuso* sfuma gradualmente nella fascia di *Edgeworth-Kuiper*, anche se la sua estensione è assai maggiore e raggiunge regioni di spazio situate ben al di sopra e al di sotto dell'eclittica [a]. Le attuali teorie sull'origine e sulla composizione del *disco diffuso* sono ancora incerte, sebbene si ritenga che esso sia formato da oggetti della *fascia di Kuiper* gradualmente deviati dalle proprie orbite a causa dell'interazione gravitazionale con i corpi maggiori del Sistema Solare esterno, in particolare Nettuno, e sospinti verso traiettorie fortemente eccentriche ed inclinate. Mentre la *fascia di Kuiper* ricorda, infatti, una corona circolare relativamente piatta, che ospita oggetti in orbita circolare o leggermente eccentrica, il *disco diffuso* presenta oggetti con parametri orbitali assai più disomogenei, che spesso, come nel caso di Eris, raggiungono inclinazioni anche maggiori di  $45^\circ$  rispetto all'eclittica. Si ritiene che molte di queste orbite siano instabili, e che gli oggetti del *disco diffuso* siano generalmente destinati ad allontanarsi progressivamente dal centro del Sistema Solare e a raggiungere la Nube di Oort o lo spazio interstellare (v. *De Biasi, 2014*).

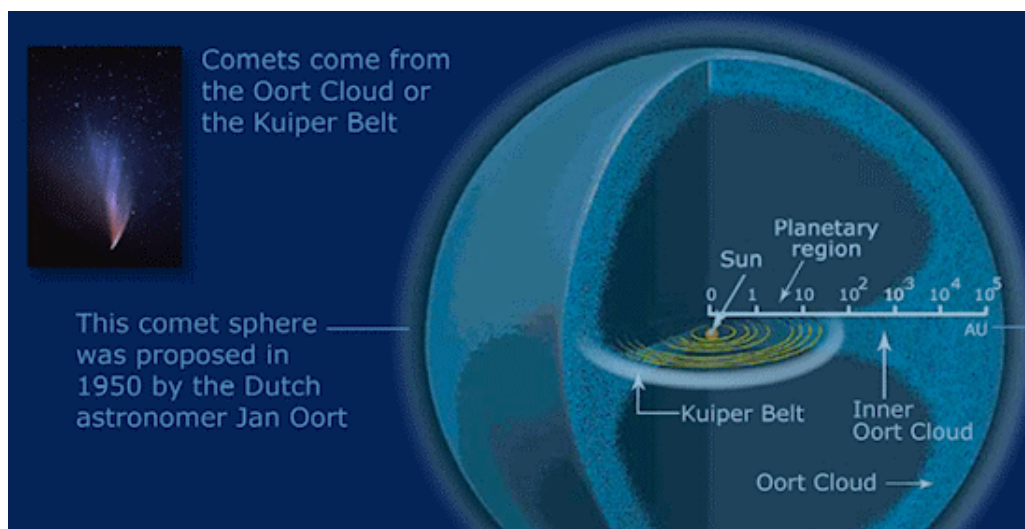


Figura 1.2: Disposizione del Sistema Solare, della fascia di Kuiper e della Nube di Oort (*Google Immagini*).

In fine, la *Nube di Oort* è un'ipotetica nube sferica di comete posta tra 20000 e 100000 *UA* (0,3 e 1,5 anni luce (a.l.)) dal Sole; come riferimento ricordiamo che Proxima Centauri, la stella più vicina al Sole, dista 4,5 a.l.. Questa nube non è mai stata osservata perché troppo lontana e buia perfino per i telescopi odierni, ma si ritiene che sia il luogo da cui provengono le comete di lungo periodo (come la Hale-Bopp e la Hyakutake, avvistate alla fine del XX secolo) che attraversano la parte interna del Sistema Solare. Nel 1932 Ernst Öpik, un astronomo proveniente

dall'Estonia, ipotizzò che le comete avessero origine da una nube situata al bordo esterno del Sistema Solare. Nel 1950 l'idea fu ripresa dall'astronomo olandese Jan Oort (*Bergia et al., 1999*) per spiegare un'apparente contraddizione: le comete vengono periodicamente distrutte dopo numerosi passaggi nel Sistema Solare interno, perciò, se le comete si fossero originate alla formazione del sistema, oggi sarebbero tutte distrutte. Il fatto che le vediamo ancora implica che abbiano un'origine diversa. Secondo la teoria (*Rigutti, 1997*), la nube di Oort conterrebbe milioni di nuclei di comete, che sarebbero stabili perché la radiazione solare è troppo debole per avere un effetto a quelle distanze. La nube fornirebbe una provvista continua di nuove comete, che rimpiazzerebbero quelle distrutte. La teoria sembrerebbe essere stata confermata dalle osservazioni successive, che ci mostrano come le comete provengano da ogni direzione, con simmetria sferica. La nube di Oort sarebbe un residuo della nebulosa originale dalla quale si formarono il Sole e i pianeti, circa cinque miliardi di anni fa e sarebbe debolmente legata al Sistema Solare (*Morbidelli, 2005 e 2008; [a]*).

### 1.1.1 Regolarità del Sistema Solare e Famiglie di Pianeti

Il Sistema Solare presenta importanti regolarità, solo in parte spiegate in termini di processi di formazione generali dei sistemi planetari. Una regolarità importante è la netta separazione dei pianeti in due famiglie principali, con distanze dal Sole e proprietà fisiche distinte. I quattro pianeti più vicini al Sole (Mercurio, Venere, Terra e Marte), detti anche pianeti terrestri, si trovano tutti entro circa 250 milioni di chilometri dal Sole, mentre il successivo, Giove, è già ad una distanza di quasi un miliardo di chilometri. I pianeti esterni (Giove, Saturno, Urano, Nettuno) vengono chiamati anche pianeti gioviani e si distinguono non solo per la distanza, ma anche per la più bassa temperatura che ne consegue, per la grande dimensione e per la densità media notevolmente inferiore (paragonabile a quella dell'acqua, circa  $1g/cm^3$ , a  $4^{\circ}C$ ) rispetto a quella dei pianeti terrestri (3 ÷ 5 volte la densità dell'acqua). I valori superficiali di temperatura media dei pianeti misurabili da Terra vanno da circa  $300^{\circ}C$  di Mercurio<sup>1</sup>, nella parte rivolta al Sole, a circa  $-250^{\circ}C$  di Plutone. Mentre l'interpretazione delle temperature è abbastanza ovvia, non c'è ancora una spiegazione concorde per quanto riguarda la distribuzione delle masse. Questa segue un andamento caratteristico, con piccole masse, paragonabili a quella terrestre, per i quattro pianeti più vicini al Sole, mentre i pianeti più lontani hanno tutti masse di diversi ordini di grandezza superiori<sup>2</sup>. Plutone è considerato un caso

---

<sup>1</sup>In realtà, Venere ha la temperatura superficiale più alta tra i pianeti del Sistema Solare, a causa di un potente effetto serra che lo porta a raggiungere temperature di circa  $460^{\circ}C$ , come vedremo nella Sez. 1.3.

<sup>2</sup>Questa sequenza non sempre viene rispettata nei sistemi planetari orbitanti in stelle differenti dal Sole; accade spesso che i giganti gassosi siano vicini alle loro rispettive stelle e, a causa delle loro alte temperature, vengono anche detti *Gioviani Caldi* (*Hot Jupiter*) (*Fecchio, 2011*); questo fatto può essere causato dai limiti negli strumenti di osservazione usati in quanto non riescono a

a parte e definito pianeta nano nel 2006 dall' *Unione Astronomica Internazionale*. Si ritiene oggi che possa aver avuto un'origine diversa, forse da collegare ai numerosi corpi minori che sono stati recentemente scoperti oltre l'orbita di Plutone (pianetini transnettuniani). La maggior parte dei pianeti del Sistema Solare possiede satelliti naturali. Nel caso dei pianeti terrestri: la Terra, ne possiede uno solo (la Luna) e Marte due (Fobos e Deimos), mentre Mercurio e Venere, i più vicini al Sole, non ne possiedono. Non è chiaro se questo sia legato al processo di formazione dei pianeti o se il campo gravitazionale del Sole ne abbia impedito la formazione. I pianeti giganti invece ne possiedono molti e di dimensioni considerevoli. Giove ha quattro satelliti principali (satelliti galileiani: Io, Europa, Ganimede e Callisto), di dimensioni paragonabili a Mercurio, e alcune decine di satelliti minori. Numerosi sono anche i satelliti di Saturno: il più grande, Titano, è anche l'unico satellite del Sistema Solare a possedere un'estesa atmosfera. Anche Urano e Nettuno possiedono molti satelliti. Plutone possiede un satellite (Caronte), di dimensioni non molto inferiori al pianeta stesso. In questo quadro la Terra rappresenta comunque un caso raro perchè la Luna ha una dimensione di quasi un terzo rispetto alla Terra (*Ortolani, 2012; Marzari, 2012*); può essere considerato, quindi, un sistema doppio (v. Sez. 1.3.4).

## 1.2 Teoria Astronomica Climatica

Un argomento affascinante e complesso è la comprensione delle cause che stanno alla base dei cambiamenti climatici globali della Terra e, in generale, di un pianeta. A tal proposito, di estrema importanza è il ruolo svolto dalle variazioni orbitali e rotazionali del pianeta stesso; infatti, ad esempio per la Terra, tra i vari cicli astronomici che potrebbero influenzare il clima, solo quelli che coinvolgono le mutazioni degli elementi orbitali appaiono collegati, in modo significativo, con i dati climatici a lungo termine, dedotti dalle testimonianze geologiche. Lo scopo della *teoria astronomica climatica* è proprio lo studio delle relazioni esistenti tra evoluzione orbitale e clima planetario, studio che si è esteso anche al caso di Marte, a partire dal lancio della sonda *Viking* nel 1975. Esso comprende diversi argomenti: l'evoluzione dinamica del pianeta, le variazioni del flusso solare sulla superficie del pianeta, la costruzione di un modello climatico. Di seguito ne diamo una breve trattazione da *Tomasella (1992)* dividendo in due parti l'analisi:

- Fattori climatici da variabili esterne al pianeta (e quindi legati alla zona nella quale il pianeta orbita);
- Fattori climatici da variabili interne al pianeta.

---

percepire le piccole diminuzioni di luce della stella causate dal transito di pianeti troppo piccoli. Il miglioramento continuo delle tecniche di osservazione sta portando alla scoperta di molte *super terre* (v. Sez. 1.4.5).

### 1.2.1 Fattori Climatici da variabili esterne

Gli elementi orbitali sono le variabili esterne del sistema climatico. In corrispondenza all'evoluzione dinamica dei pianeti varia non solo la quantità di energia Solare che incide sulla superficie, ma anche la distribuzione del flusso. L'ulteriore presenza di un'atmosfera causa variazioni di entrambe che possono costituire un importante elemento del sistema climatico (v. Sez 1.2.2). L'*insolazione* è la misura della quantità di radiazione emessa dal Sole che raggiunge una data superficie per unità di tempo e di superficie. È espressa in watt al metro quadro ( $W/m^2$ ) o kilowattora al metro quadro al giorno [ $kW \cdot h/(m^2 \cdot day)$ ]. Man mano che incrementa l'angolo compreso tra la normale alla superficie e la direzione dei raggi luminosi, l'insolazione si riduce in proporzione al coseno dell'angolo secondo la *legge del coseno di Lambert*. Mediamente, nel corso dell'anno, i poli geografici ricevono un'insolazione minore rispetto a quella dell'equatore, poiché la superficie terrestre, ai poli, risulta più angolata ai raggi del Sole rispetto all'equatore.

I parametri di *eccentricità* ( $e$ ), *obliquità* ( $\theta$ ), *longitudine del perielio* ( $\varpi$ ) e il *semiasse maggiore dell'orbita* ( $a$ ), condizionano il clima planetario, ma il loro ruolo è molto diverso:

- Se indichiamo con  $F$  il flusso di energia solare nell'intero spettro elettromagnetico, incidente sul pianeta, in funzione della sua distanza  $r$  dal Sole, otteniamo:

$$F(r) = S\pi R^2/4\pi R^2 = \frac{1}{4}S \quad (1.1)$$

dove  $R$  è il raggio del pianeta,  $S = L/4\pi r^2$  è la *costante solare*<sup>3</sup>  $S_0$  scalata alla distanza  $r$  Sole-Pianeta<sup>4</sup> ed  $L$  è definita come l'energia per unità di tempo emessa da tutta la superficie del Sole. Per esempio ad 1 UA la  $S$  vale  $1.37 \cdot 10^6 \text{ erg/sec cm}^2$ , mentre alla distanza media di Marte dal Sole (1.53 UA) essa è pari a  $0.59 \cdot 10^6 \text{ erg/sec cm}^2$ ; la luminosità solare  $L$  è pari a  $3.85 \cdot 10^{33} \text{ erg/sec}$ . L'espressione precedente tiene conto che la rotazione di un pianeta attorno al proprio asse ha come effetto quello di distribuire l'energia in arrivo sull'intera superficie  $4\pi R^2$ .

- Se l'orbita è ellittica, il semiasse maggiore  $a$ , dell'orbita del pianeta, determina il valore medio del flusso incidente:

$$\bar{F} = \frac{1}{4} \frac{L}{4\pi a^2} \quad (1.2)$$

<sup>3</sup>La costante solare è la quantità di energia radiante che arriva sulla Terra dal Sole per unità di tempo e superficie (quindi una potenza per unità di superficie), misurata sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre, su un piano perpendicolare ai raggi solari; essa è la somma delle energie di tutte le frequenze dello spettro della radiazione solare. Le misure più recenti compiute dai satelliti forniscono un valore di  $1367 \text{ W/m}^2$  (ovvero  $1.367 \text{ kW/m}^2$ ; si ricorda che  $1\text{W}=10^7 \text{ erg/s}$ ), anche se può variare di circa il 6,9% durante l'anno, da circa  $1412 \text{ W/m}^2$  a gennaio a  $1321 \text{ W/m}^2$  a luglio, a causa della variazione della distanza della Terra dal Sole [ $e$ ].

<sup>4</sup>Dal rapporto di  $S = L/4\pi r^2$ , con  $r$  espressa in UA, e  $S_0 = L/4\pi R^2$ , con  $R=1 \text{ UA}$ , si vede che  $S/S_0 = (r^2/R^2)^{-1}$  da cui  $S = S_0 \frac{1}{r^2} = \frac{L}{4\pi R^2} \frac{1}{r^2} = \frac{L}{4\pi r^2}$  ( $r$  in UA).

- L'obliquità  $\theta$  è il parametro determinante nello stabilire la distribuzione dell'energia sulla superficie del pianeta: il flusso medio di energia solare che arriva alla latitudine  $\delta$  per una rotazione completa, detto *insolazione media*, è dato da (Ward, 1974):

$$\bar{F}_\delta = \frac{S}{2\pi^2} (1 - e^2)^{-1/2} \int_0^{2\pi} [1 - (\text{sen}\delta\cos\theta - \cos\delta\text{sen}\theta\text{sen}\varphi)^2]^{1/2} d\varphi \quad (1.3)$$

Come si vede l'*insolazione* è debolmente influenzata dall'eccentricità. Si intende per *fascia intertropicale* la regione di massima *insolazione*, di estensione  $2\theta$  in latitudine.

- L'*insolazione* ai poli è, invece, pari a:

$$\bar{F}_{\pi/2} = \frac{S}{\pi} \text{sen}\theta (1 - e^2)^{-1/2} \quad (1.4)$$

Questa quantità gioca un ruolo importante per la Terra e Marte perchè è ai poli che sono immagazzinate le maggiori quantità di ghiacci. In sostanza è l'obliquità il parametro responsabile delle differenze stagionali.

- La longitudine del perielio  $\tilde{\omega}$  non modifica il flusso medio annuo di energia solare incidente, ma ne influenza la media diurna e stagionale (se l'orbita è eccentrica) e stabilisce delle asimmetrie nel bilancio energetico tra gli emisferi nord e sud e tra le zone a diverse latitudine.
- L'eccentricità  $e$  determina la distribuzione temporale del flusso nell'arco di un anno planetario (cioè nel periodo di rivoluzione).

Una variazione nella luminosità del Sole (o anche nella distribuzione spettrale della radiazione) provoca una corrispondente variazione nella costante solare  $S_0$  e, conseguentemente, nel flusso energetico incidente di un pianeta. Le teorie di evoluzione stellare prevedono un incremento a lungo termine della luminosità solare. Essa sarebbe aumentata di circa il 30% nei 4.6 miliardi di vita del Sole. Infatti man mano che le reazioni termonucleari convertono idrogeno in elio, la densità del nucleo Solare aumenta: così, di conseguenza, subisce un incremento la velocità di produzione di energia per fusione nucleare (Tomasella, 1994; Ortolani, 2012; Chiosi, 2012).

### 1.2.2 Fattori climatici da variabili interne e Albedo

Per comprendere tali *fattori*, che regolano l'emissione elettromagnetica di un pianeta e quindi anche la sua temperatura, dobbiamo distinguere due importanti contributi:

1. Il calore interno del pianeta: il calore del nucleo terrestre originariamente si è generato durante l'accrescimento del pianeta sviluppatasi grazie alla forza di attrazione gravitazionale. La Terra è andata via via raffreddandosi perdendo il calore iniziale dal tempo della sua formazione. In seguito il calore ha

continuato ad essere generato grazie a processi di decadimento radioattivo di elementi, con tempi di decadimento lunghi, quali l'uranio, il torio e il potassio, anche se per la Terra questo valore è trascurabile:  $1/20000$  del calore che riceve dal Sole, un flusso medio, di  $0.06W/m^2$ . Il calore terrestre dall'interno del pianeta viene trasferito verso la superficie attraverso il mantello mediante convezione prodotta dal movimento del magma o di acque profonde: da ciò vengono generate anche le eruzioni vulcaniche e gli altri fenomeni geotermali quali le sorgenti termali, i geysir, e le fumarole (*Ortolani, 2012*).

2. Il calore intrappolato dall'atmosfera che proviene dal Sole. A parità di radiazione solare, cioè di flusso solare che giunge in alta atmosfera,  $1.3 \cdot 10^3W/m^2$ , l'atmosfera stessa del pianeta (variabile interna) lo divide in:

- (a) una parte riflessa;
- (b) una parte retrodiffusa dovuta all'albedo, alle nubi e ai gas atmosferici. L'albedo  $A$  (per la Terra  $\simeq 0,3$ ) è il rapporto tra la radiazione diffusa nello spazio da una sfera in tutte le direzioni e la radiazione ricevuta dalla medesima sfera; è 1 per una superficie perfettamente riflettente, mentre tende a zero per un corpo nero;
- (c) una parte assorbita che provoca un aumento di temperatura. La quantità di radiazione relativa assorbita è quindi  $(1-A)$ .
- (d) Inoltre:
  - i. circa metà della radiazione attraversa l'atmosfera, senza alterazioni, prendendo il nome di *radiazione netta* e parte di questa contribuisce, infine, all'evaporazione delle masse d'acqua.
  - ii. la stratosfera assorbe i raggi ultravioletti compresi nella banda 200-300 nm grazie all'ozono (v. Sez. 1.3.3), la troposfera assorbe e diffonde l'infrarosso grazie al vapore acqueo e alla  $CO_2$ , (v. Fig 1.3) L'azione di filtro delle bande alle lunghezze d'onda dell'ultravioletto, per la maggior parte letali, è essenziale per lo sviluppo della vita.

La maggior parte dell'energia della Terra proviene, dunque, dalla radiazione solare, sottoforma di onde elettromagnetiche. Essa si estende su tutto lo spettro elettromagnetico dai raggi  $\gamma$  ai raggi X, attraverso l'ultravioletto (UV), il visibile (VIS) e l'infrarosso (IR), fino alle microonde e radioonde (v. Fig. 1.3). I corpi del Sistema Solare sono visibili grazie al fatto che la radiazione solare è in gran parte concentrata tra 0.4 e 0.8  $\mu m$ .



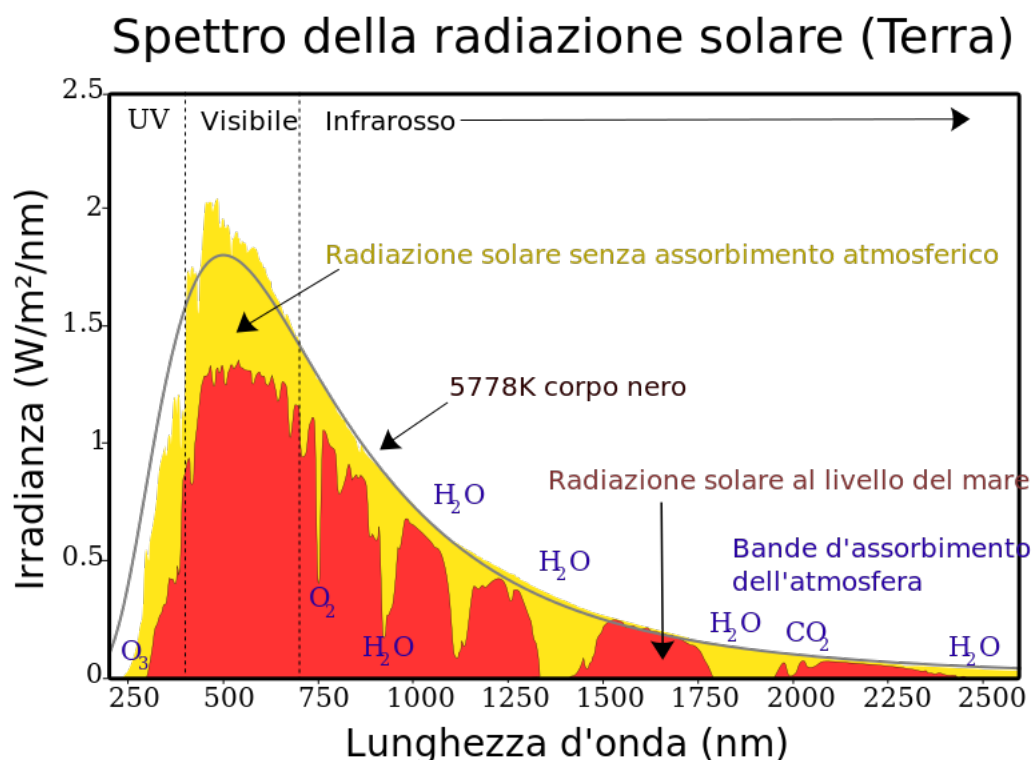


Figura 1.3: Spettro della radiazione solare per illuminazione diretta sia all'inizio che alla fine dell'atmosfera terrestre. Il Sole produce una luce con una distribuzione simile a quella che ci si attenderebbe da un corpo nero a 5525 K (5250 °C), che è approssimativamente la temperatura superficiale del Sole (5777 K). Mano a mano che la luce passa attraverso l'atmosfera, parte della radiazione è assorbita dai gas in specifiche bande di assorbimento. Un contributo additivo è dovuto allo scattering Rayleigh, che è responsabile per il colore blu dell'atmosfera. Le curve sono basate sugli spettri di riferimento dell'*American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Sono indicate le regioni per l'ultravioletto, il visibile e la luce infrarossa [f1].

### Temperatura effettiva, superficiale ed effetto serra

Discutiamo, brevemente, l'importante legame tra la temperatura effettiva e superficiale di un pianeta, dovuto all'effetto serra.

#### Temperatura effettiva

Nel determinare la temperatura media sulla superficie dei pianeti terrestri intervengono vari fattori, da includere fra le variabili interne del sistema climatico: atmosfera (in relazione con la radiazione solare), terre emerse, le sostanze volatili condensate (calotte di ghiaccio, conformazioni nuvolose e masse liquide), processi legati alla struttura interna planetaria.

Tutti questi fattori, infatti, stabiliscono i valori dell'albedo,  $A$ , e dell'emissività atmosferica planetaria,  $\varepsilon$ , (compresa tra 0 e 1 che dipende dall'opacità dell'atmosfera nelle regioni dell'infrarosso). Entrambi,  $A$  ed  $\varepsilon$ , intervengono direttamente nell'equazione del bilancio tra energia solare incidente per unità di tempo e radiazione

termica emessa nello spazio (*Pollack, 1979*). Per comprendere questa equazione possiamo definire la temperatura effettiva di un corpo del Sistema Solare come la temperatura di equilibrio di una sfera che emette come un corpo nero, situata a distanza  $r$  dal Sole, di raggio  $R$  ed albedo  $A$ . Possiamo infatti scrivere una relazione di uguaglianza tra l'energia assorbita dal Sole e quella irradiata, nell'ipotesi che l'emissione termica sia di corpo nero:

$$(1 - A)S\pi R^2 = \sigma 4\pi R^2 T_e^4 \quad (1.5)$$

dove  $S$  è il flusso solare alla distanza del pianeta  $r$ ,  $R$  è il raggio del pianeta,  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann ( $5.67037 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ ),  $T_e^4$  è la temperatura effettiva (alla quarta potenza). L'Eq. (1.5) è valida se l'oggetto è in rapida rotazione, altrimenti il termine nel secondo membro deve essere diviso per 2, per tener conto che l'irraggiamento si riferisce ad un solo emisfero. Dopo semplici passaggi si ottiene la seguente formulazione per  $T_e$ :

$$T_e = \left( \frac{1 - A}{16\pi\sigma} L \right)^{1/4} r^{-1/2} \quad (1.6)$$

A questo punto, ci si aspetterebbe, per la Terra, di trovare circa il valore medio della temperatura di  $15^\circ\text{C}$  ( $288\text{ K}$ ), ma non è così. Infatti, se si riscrive l'Eq. (1.6) sostituendo  $L/4\pi r^2$ , dove  $r = 1\text{UA}$ , con la *costante solare*  $S_0 = 1367\text{W}/m^2$ , si ricava, ricordando che  $A \simeq 0.3$  e che quindi  $(1 - A) \simeq 0.7$ , che la  $T_e$  vale:

$$T_e = \left( \frac{1 - A}{4\sigma} S_0 \right)^{1/4} = \sqrt[4]{\frac{1367}{4} \frac{0.7}{5.670 \cdot 10^{-8}}} \simeq 255\text{K} \simeq -18^\circ\text{C} \quad (1.7)$$

un valore assai distante da quello atteso. Per capire questa differenza bisogna tenere in considerazione l'effetto serra<sup>5</sup> (*Ortolani, 2012*). Si sottolinea che l'  $r^{-1/2}$  nella Eq. (1.6) è la distanza Sole-Pianeta, che nasce dall'aver sostituito  $S$  con  $L/4\pi r^2$ , quindi  $T_e$  dipende dall'albedo e dalla distanza eliocentrica, mentre è indipendente dalla dimensione dell'oggetto ( $R$ ). Questo è vero fino a che non si considerano corpi molto massicci; in tal caso si dovrà, invece, tener conto delle sorgenti di energia interna che possono, come nel caso di Giove e Saturno, essere paragonabili alla quantità di energia ricevuta dal Sole<sup>6</sup>.

<sup>5</sup>Nella trattazione abbiamo trascurato la presenza dell'atmosfera, quindi la temperatura  $T_e$  trovata non è quella reale, ma piuttosto quella di un pianeta "Terra" senza atmosfera in equilibrio radiativo. Si può quindi concludere che il sistema Terra-atmosfera non può essere semplicemente considerato come un corpo nero che emette alla temperatura della superficie terrestre, in quanto la temperatura della superficie terrestre non rispecchia quella di un corpo nero in equilibrio con la radiazione solare incidente. La temperatura di emissione così ottenuta risulta però essere in buon accordo con la temperatura della tropopausa. La ragione di tutto ciò risiede nel fatto che la tropopausa rappresenta il limite sopra al quale non c'è più apprezzabile assorbimento di radiazione IR, quindi il sistema visto dalla tropopausa è in effetti approssimabile al corpo nero in termini di emissione, in equilibrio con la radiazione solare incidente.

<sup>6</sup>Saturno e Giove hanno una struttura interna molto simile; Saturno, ad esempio, presenta una composizione affine a quella del Sole, essendo costituito per il 75% di idrogeno ed il 25% di elio, con tracce d'acqua, metano ed ammoniaca. Nello strato esterno è presente un'atmosfera dove si

## Temperatura superficiale ed effetto serra

Sappiamo che la presenza di un'atmosfera attorno ad un corpo planetario ne modifica la temperatura nel senso che agisce da filtro sia per la radiazione incidente che per quella diffusa nello spazio. Parte di quest'ultima è riassorbita dall'atmosfera che a sua volta irradianza sia verso lo spazio che verso il suolo. È il caso dell'effetto serra, che sulla Terra è dovuto all'azione assorbente da parte del vapore acqueo e dell'anidride carbonica della radiazione infrarossa emessa dal suolo. L'effetto serra porta la temperatura media vicino al suolo di Venere a circa  $400^\circ$ , quella della Terra a circa  $15^\circ$  e quella di Marte a pochi gradi, a causa della sua rarefatta atmosfera.

Per quantificare l'effetto serra si può usare un modello semplificato dove l'atmosfera è vista come un corpo parzialmente opaco, con coefficiente di emissività,  $\varepsilon$ , che è stimato attorno a 0.7 (*Ortolani, 2012*). Questo elemento radiante addizionale ha una temperatura simile a quella del suolo e irradia radiazione infrarossa sia verso lo spazio esterno sia verso il suolo in uguale proporzione (motivo del fattore due davanti al secondo addendo di Eq. (1.8)). Si tratta quindi di aggiungere una componente addizionale al primo membro dell'Eq. (1.5) che tenga conto di questo contributo di energia addizionale nell'equilibrio termico:

$$(1 - A)S\pi R^2 + 2\varepsilon\sigma\pi R^2T_s^4 = \sigma 4\pi R^2T_s^4 \quad (1.8)$$

dove stavolta la temperatura  $T_s$  è la temperatura superficiale e dove  $\varepsilon$ , l'emissività precedentemente descritta, è collegata all'entità dell'effetto serra che aumenta più o meno sensibilmente la temperatura sulla superficie del pianeta. Dall'Eq. (1.8), semplificando  $\pi R^2$  e isolando  $S(1 - A)$ , otteniamo:  $(1 - A)S = 4\sigma T_s^4 - 2\varepsilon\sigma T_s^4$ . Raccogliamo ora  $T_s^4$  si ha:  $(1 - A)S = T_s^4(4\sigma - 2\varepsilon\sigma)$ . Dall'Eq. (1.5), semplificando sempre  $\pi R^2$ , otteniamo allora:  $4\sigma T_e^4 = T_s^4(4\sigma - 2\varepsilon\sigma)$ , possiamo ricavare il rapporto tra la temperatura effettiva e quella superficiale, ottenendo:

$$\frac{T_s^4}{T_e^4} = \frac{1}{1 - \varepsilon/2} \quad \text{ossia } T_s = 1.106T_e \quad (1.9)$$

Inserendo la  $T_e = 255K$  di Eq. (1.7) si ottiene una  $T_s = (255 \times 1.106) \simeq 282K$ , circa  $9^\circ C$  (molto più vicina alla temperatura media terrestre di  $15^\circ C$ ) (*Ortolani, 2012; [p]*). Come confronto, vediamo, in Tab. 1.2, i valori per la Terra e Marte

---

alternano fasce chiare e scure parallele all'equatore con perturbazioni cicloniche e formazioni di nubi; il tutto digrada nella zona sottostante, un oceano liquido di idrogeno molecolare ed elio che sovrasta un involucro tra 0,2 e 0,5 raggi planetari ( $R_{Saturno} = 58.232km$ ) sottoposto ad una pressione di 3 milioni di atmosfere dove domina l'idrogeno metallico liquido ad una temperatura di circa  $20000^\circ C$ . Successivamente, al centro del pianeta, è presente il nucleo, che misura 0,2 raggi planetari, circa le dimensioni della Terra, con una temperatura di circa  $12000^\circ C$  ed una pressione di 8 milioni di atmosfere, formato da silicati ferrosi e ghiaccio. Dato che Saturno, al pari di Giove, irradia, nell'infrarosso, una energia all'incirca doppia di quella che riceve dal Sole, si pensa che l'elio essendo più pesante dell'idrogeno sprofondi nell'oceano liquido, si comprime e di conseguenza liberi calore che per convezione migra verso l'alto fino all'atmosfera, dove può sfuggire nello spazio (*Marzari & Vanzani, 2012; [a]*).

di A (albedo), S (costante solare),  $\varepsilon$  (emissività),  $T_e$  (temperatura effettiva),  $T_s$  (temperatura superficiale):

Pianeta	S( $erg/cm^2sec$ )	A	$\varepsilon$	$T_e$ (K)	$T_s$ (K)
Terra	$1.37 \cdot 10^6$	0.30	0.6	255	288
Marte	$0.59 \cdot 10^6$	0.24	0.9	213	218

Tabella 1.2: Dati fisici di Terra e Marte per A, S,  $\varepsilon$ ,  $T_e$ ,  $T_s$  (Tomasella, 1992).

### Ricircolo della $CO_2$ dai vulcani

Un ruolo fondamentale nello stabilire la temperatura di superficie è svolto quindi, come visto, dai "gas serra", quali il vapore acqueo e l'anidride carbonica. Sulla Terra la formazione delle rocce carbonatiche e dei silicati, sembra essere il meccanismo principale di sottrazione della  $CO_2$  dall'atmosfera. Tuttavia l'intensa *attività tettonica*, che ancora oggi caratterizza il nostro pianeta, permette il continuo ricircolo della  $CO_2$  tramite la *subduzione* nel mantello di margini di zolle litosferiche e quindi di rocce sedimentarie carbonatiche, e la successiva emissione di anidride carbonica attraverso l'attività dei vulcani (v. confronto con Venere, Sez. 1.3.1 e Sez. 1.3.3). Tramite il ciclo geochimico dei carbonati e dei silicati, proposto da *Kasting & Toon (1989)*, la temperatura della Terra è regolata da un effetto di retroazione negativa: se essa aumenta, l'abbondanza di anidride carbonica nell'atmosfera diminuisce perchè viene maggiormente assorbita da reazioni con  $H_2O$  e silicati, determinando un raffreddamento della superficie e viceversa (*Pollack et al., 1987; Kasting, Toon & Pollack, 1988; Kasting & Toon, 1989*). Oggi si ritiene che l'atmosfera primordiale della Terra, come anche negli altri pianeti terrestri, fosse ossidante (presenza di  $CO_2$  e in misura minore di  $H_2O$ ) più che riducente (presenza di  $NH_3$  e di  $CH_4$ ) e che il meccanismo dei carbonati e dei silicati regolasse anche allora la temperatura media superficiale (*Kasting & Toon, 1989; Pollack, 1991; Kasting, 1993*). Dato che Marte è molto meno massiccio e vulcanicamente meno attivo della Terra (perlomeno nel presente) ed è caratterizzato da una unica zolla, gli stessi autori suggeriscono che la formazione delle rocce carbonatiche potrebbe rappresentare un pozzo per la  $CO_2$ , venendo a mancare un riciclo come quello presente sulla Terra. Inoltre, si pensa che il regolite marziano, ossia lo strato superficiale del suolo, di granulosità fine, formato dal bombardamento meteorico, possa aver assorbito grandi quantità di gas, non solo di anidride carbonica, ma anche di vapore acqueo (*Pollack, 1979; Haberle, 1986*). Marte, che secondo i modelli recenti di formazione del Sistema Solare, doveva avere una atmosfera iniziale e un clima simile a quello primordiale terrestre, avrebbe subito in seguito una così diversa evoluzione proprio perchè il riciclo della  $CO_2$ , per metamorfismo delle rocce carbonatiche, sarebbe rimasto attivo solo per qualche decina di milioni di anni. L'attuale freddo clima marziano sarebbe dovuto

principalmete alle modeste dimensioni del pianeta (*Kasting & Toon, 1989*) (v. Sez. 1.3.2).

### Modifiche dell'atmosfera per aerosol

Gli strati più vicini alla struttura interna di un pianeta possono modificare l'atmosfera non solo con emissioni di gas dalla crosta, ma anche con la produzione di *aerosol* durante le attività vulcaniche:

- L'*aerosol* è un composto di particelle e corpuscoli, in generale, provenienti dall'interno della Terra, in sospensione nell'atmosfera con dimensioni fra  $10^{-9}m$  e  $10^{-6}m$ . L'*aerosol* vulcanico sarebbe responsabile di sensibili diminuzioni della temperatura a causa del basso assorbimento nel visibile delle particelle che lo costituiscono. Gli *aerosol* giocano un ruolo importantissimo nel processo di *scattering* della radiazione solare: essi infatti rappresentano i centri di diffusione della radiazione solare che, quando li incontra, viene "deviata" in direzione diversa da quella di incidenza; dunque contribuiscono in maniera determinante ad una sua redistribuzione<sup>7</sup>.

### Modifiche della struttura interna per isostasia

La struttura interna del pianeta determina anche i momenti di inerzia del pianeta stesso e quindi il coefficiente di quadrupolo  $J_2$  che interviene nella costante di precessione  $\alpha$  (*Appendice C*). Cerchiamo di capire bene tale concetto definendo prima di tutto l'*isostasia* e poi vedendo due esempi, uno per Marte e uno per la Terra:

- L'*isostasia* è un termine che descrive lo stato di equilibrio tra gli strati più superficiali del pianeta e quelli più profondi (Fig. 1.4). La denominazione di *isostasia* venne coniata dal geologo statunitense *Clarence Dutton* verso la fine del XIX secolo [a]. È paragonabile al fenomeno di galleggiamento descritto dal *principio di Archimede*, infatti, come un cubetto di legno galleggia sull'acqua e in funzione del suo peso e densità sporge più o meno da essa, una massa rocciosa galleggia sul mantello sottostante e sporge più o meno evidentemente. Ogni variazione di massa di questi corpi rocciosi provoca uno spostamento verticale degli stessi, fino al conseguimento di un nuovo equilibrio. Questi movimenti sono detti aggiustamenti isostatici, ma dato che i blocchi si modificano di continuo, un equilibrio isostatico definitivo non sarà mai raggiunto. Questo processo si verifica nella litosfera, dove la crosta, che ha una densità media di  $2 \div 3g/cm^3$  galleggia sul mantello, e più in particolare sull'astenosfera, avente una densità superiore, che si aggira intorno ai  $5g/cm^3$ , che ha un

---

<sup>7</sup>Anche le attività lavorative umane possono produrre "aerosol"; dai processi di lavorazione industriali, ad esempio, vengono emesse in atmosfera quantità variabili di polveri dette appunto "polveri industriali", a volte anche inquinanti.

comportamento plastico. Ad esempio: l'isostasia si verifica quando, durante l'orogenesi (insieme dei fenomeni geologici che portarono alla formazione delle catene montuose.), lo spessore delle rocce della crosta aumenta oppure durante i periodi glaciali, quando aumenta lo spessore della calotta glaciale, che poggia sopra la crosta terrestre alle alte latitudini e questo comporta un aumento di peso e quindi uno sprofondamento delle rocce nell'astenosfera. La parte sprofondata, detta *radice*, per stabilire un nuovo equilibrio con l'astenosfera, compirà una serie di movimenti isostatici. Questo si verifica perché l'astenosfera risponde con un comportamento plastico alla forza intensa e costante esercitata dalla soprastante radice.

- Nel caso di Marte, *Ward (1979(b), 1992)* ha considerato l'innalzamento dell'altopiano di Tharsis e la conseguente deviazione litosferica dalla condizione di *isostasia*, come causa di una primitiva importante variazione dell'obliquità del pianeta.
- Sulla Terra<sup>8</sup>, la deriva delle zolle della litosfera modifica, a lungo andare, la distribuzione latitudinale delle terre emerse, degli oceani e dei ghiacci; soprattutto quest'ultimi influenzano molto il clima attraverso un effetto di retroazione positiva: se la temperatura diventa più rigida le masse glaciali aumentano e così pure l'albedo totale del pianeta; ciò causa una ulteriore diminuzione della temperatura media.

---

<sup>8</sup>L'*isostasia* sulla Terra si verifica tra la litosfera e la sottostante astenosfera: si tratta cioè dell'equilibrio fra le placche tettoniche e il mantello.

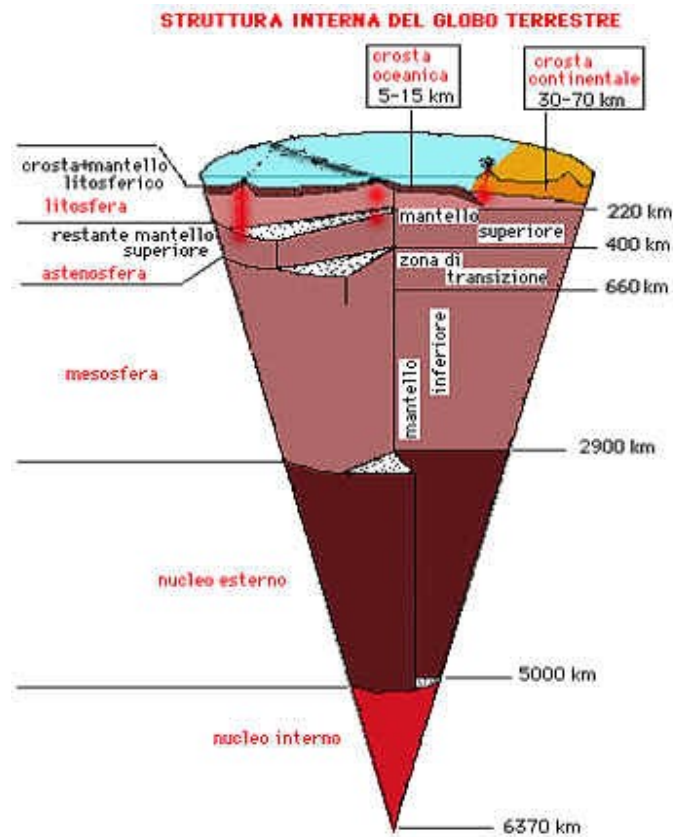


Figura 1.4: Struttura interna del globo terrestre. La struttura della Terra può essere definita in due modi: chimicamente o tramite proprietà meccaniche (di equilibrio). Dal punto di vista chimico la Terra può essere divisa in *crosta*, *mantello superiore*, *mantello inferiore*, *nucleo esterno* e *nucleo interno*. Meccanicamente, si può suddividere in *litosfera*, *astenosfera*, *mesosfera*, *nucleo esterno* e *nucleo interno* [u].

Questi effetti ci fanno capire come tutti i fattori climatici interagiscano l'uno con l'altro attraverso meccanismi assai complessi. Nel caso terrestre e marziano, comunque, le modifiche della composizione atmosferica e l'evoluzione dinamica planetaria sono i fattori principali per caratterizzare il sistema climatico.

### 1.2.3 Velocità di Fuga e la Reazione di Urey

I modi con i quali un pianeta può perdere o riuscire a trattenere la sua (preziosa) atmosfera sono vari.

#### Velocità di fuga

Cominciamo con il definire il legame tra il raggio  $r$  del pianeta e la sua massa  $M$  per stabilire la velocità di fuga  $V_f$  delle particelle dall'atmosfera che deriva dall'uguaglianza dell'energia cinetica con quella potenziale gravitazionale ( $\frac{1}{2}mv^2 = (GmM)/r$ ) dove  $G$  è la costante gravitazionale (Ortolani, 2012):

$$V_f = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (1.10)$$

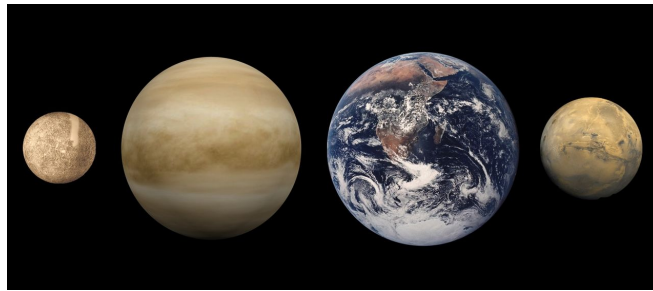


Figura 1.5: Confronto delle dimensioni da sinistra a destra di Mercurio, Venere, Terra e Marte.

La perdita di atmosfera dovuta a moti termici diventa significativa quando la velocità termica delle molecole, ricavata dal confronto tra l'energia cinetica media e l'energia interna<sup>9</sup>, è confrontabile con la velocità di fuga. Si stima che un'atmosfera come quella terrestre si disperda totalmente in un tempo scala dell'età del Sistema Solare quando la velocità termica è maggiore del 20% della velocità di fuga<sup>10</sup>. Data l'importanza delle dimensioni del pianeta in questo argomento, riportiamo, in Fig. 1.5, le dimensioni a confronto di Mercurio, Venere, Terra e Marte, rimandando alle Sez. 1.3 per le caratteristiche quantitative. Altri processi che caratterizzano la perdita di atmosfera sono: processi non termici, vento solare e cattura chimico-fisica (es.: *carbon-sequestration*). Mentre la perdita per vento solare sembra non essere significativa almeno sulla Terra (e si pensa anche su Venere), la cattura di gas da parte della crosta è importante, come precedentemente discusso.

### La reazione di Urey

Si ritiene che sulla Terra il carbonio fissato sulle rocce costituisca circa 250 volte quello dell'atmosfera. Dato che l'attuale contenuto di anidride carbonica in atmosfera è dell'ordine di 380 parti per milione, la liberazione di tutto il carbonio sotto forma di anidride carbonica potrebbe portare la pressione atmosferica a valori attorno al centinaio di atmosfere. Questo dà un'idea dell'importanza del meccanismo di cattura chimica dei gas dell'atmosfera da parte delle rocce. Il meccanismo di cattura si basa sulla *reazione di Urey (1952)* che può essere semplificata nella seguente forma:



dove l'acqua allo stato liquido ( $H_2O$ ) costituisce un catalizzatore fondamentale per la cattura dell'anidride carbonica ( $CO_2$ ) e l'attacco chimico dei silicati di calcio ( $CaSiO_3$ ). I carbonati così formati, portati in profondità dai moti della crosta, in

<sup>9</sup> $E_c = (1/2)mv^2 \sim (3/2)k_bT \simeq E_{int}$  da cui  $v_t \simeq \sqrt{\frac{3k_bT}{m}}$ , con  $k_b$  costante di Boltzmann.

<sup>10</sup>Come confronto, sottolineiamo che HD209458b, un gioviano caldo (pianeta gigante-gassoso molto vicino alla sua stella 0.047 UA) chiamato anche Osiris, perde dalle 100 alle 500 milioni di tonnellate di idrogeno al secondo sotto l'effetto del vento stellare della propria stella [a].



condizioni di elevate pressioni e temperature, possono di nuovo liberare anidride carbonica sotto forma di eruzioni vulcaniche. Questo meccanismo è critico per mantenere l'equilibrio termico sulla superficie della Terra. Il tempo scala della reazione è molto incerto, stime recenti lo valutano tra i 100000 anni e alcuni milioni (*Ortolani, 2012*).

### Altezza di scala dell'atmosfera

È noto che in condizioni di equilibrio idrostatico, nell'ambito di validità della legge di gas perfetti, vale la seguente legge di distribuzione della pressione con l'altezza<sup>11</sup>:

$$P_z = P_0 e^{-z/H} \quad (1.12)$$

con  $H = k_b T / mg$  che è detta altezza di scala,  $T$  è la temperatura atmosferica media in gradi kelvin (250 K per la Terra),  $m$  è la massa di una molecola di gas (in kg) e  $g$  è l'accelerazione di gravità sulla superficie planetaria ( $m/s^2$ ). L'altezza di scala dipende quindi dalla temperatura, composizione dell'atmosfera e dalla gravità del pianeta. Decresce con la gravità mentre cresce con la temperatura (per esempio cresce dai poli all'equatore per l'aumento della temperatura superficiale) (*Ortolani, 2012*).

L'importanza della pressione e della temperatura, per termo-regolare un pianeta e renderlo idoneo ad ospitare acqua allo stato liquido, è evidente da quanto scritto nelle precedenti sezioni e dalla analisi di molti modelli di evoluzione planetaria (anche per pianeti extrasolari); senza entrare in dettaglio, si rimanda, come esempio, a *Vladilo et al., 2013*. Nel nostro elaborato si rimanda alla Sez. 1.4.3.

## 1.3 Venere, Marte e le peculiarità della Terra

Discutiamo brevemente alcune caratteristiche generali di Venere, Marte e Terra; precisazioni ulteriori si trovano in *Appendice C*. Per confronto riportiamo i grafici delle atmosfere di Venere, Marte e Terra, con il gradiente di temperatura, Fig. 1.6 e Fig. 1.7 (per la terra v. anche Fig. 13), dove in ascissa e ordinata vi sono, rispettivamente, temperatura e altitudine:

<sup>11</sup>La pressione a una data altitudine è il risultato del peso dell'atmosfera sovrastante. Se all'altezza  $z$  l'atmosfera ha una densità  $\rho$  e una pressione  $p$ , lo spostamento infinitesimo verticale verso l'alto  $dz$  provocherà una diminuzione di pressione  $dP$  eguale al peso dello strato di atmosfera di spessore  $dz$ , per cui:  $dP/dz = -g\rho$ , dove  $g$  è l'accelerazione di gravità. Per piccoli spostamenti lungo  $z$  è possibile considerare  $g$  come costante. Usando l'equazione di stato per un gas ideale di massa molecolare media  $m$  alla temperatura  $T$ , la densità può essere espressa come  $\rho = mP/k_b T$ . Combinando le equazioni si ha che  $dP/P = -dz/(k_b T/mg) = -dz/H$ , che non varia se non varia la pressione. Integrando e assumendo che  $P_0$  sia la pressione all'altezza  $z = 0$  (pressione a livello del mare), la pressione all'altezza  $z$  può essere scritta come l'Eq. (1.12) [a].

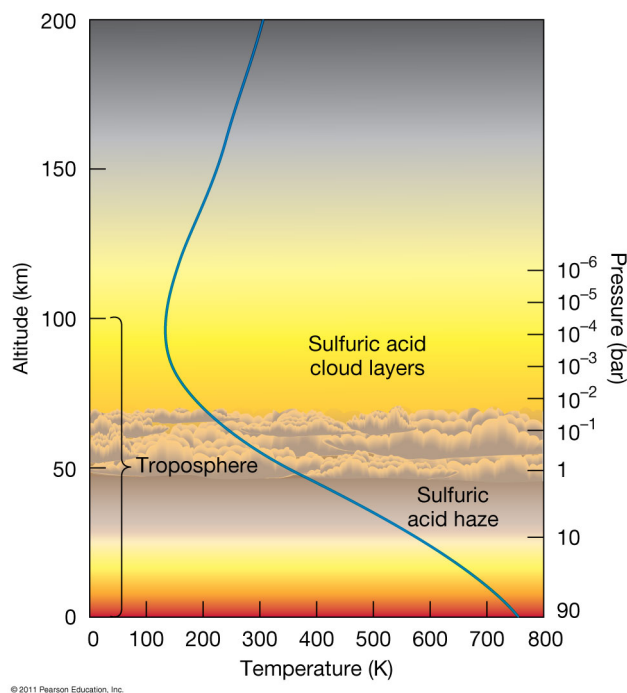


Figura 1.6: Gradiente di temperatura nell'atmosfera di Venere [a].

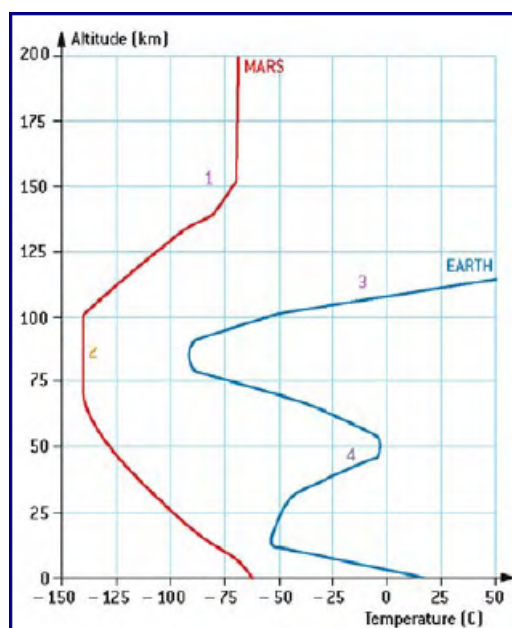


Figura 1.7: Confronto tra il gradiente di temperatura nell'atmosfera di Marte e della Terra [a].

### 1.3.1 Venere

Il pianeta Venere è avvolto da uno spesso strato di nubi altamente riflettenti, composte principalmente da acido solforico, che impediscono la visione dallo spazio della superficie in luce visibile. Il pianeta non è dotato di satelliti o anelli e ha un campo magnetico debole, rispetto a quello terrestre. L'atmosfera di Venere è molto diversa da quella della Terra, sia in composizione che in densità: è costituita infatti al 96,5%

di anidride carbonica, mentre il 3,5% restante è azoto. La massa dell'atmosfera venusiana è circa 93 volte quella dell'atmosfera terrestre, mentre la pressione sulla superficie del pianeta è circa 92 volte quella della Terra, equivalente alla pressione presente a circa mille metri di profondità in un oceano terrestre. La densa atmosfera composta essenzialmente di  $CO_2$ , insieme alle nubi di anidride solforosa, genera il più forte effetto serra del Sistema Solare, portando la temperatura della superficie del pianeta a valori di oltre 460 °C (733K) (Fig. 1.6). Questo rende la superficie di Venere più calda di quella di Mercurio, e quindi di qualunque altro pianeta del Sistema Solare; questo nonostante Venere sia due volte più distante dal Sole e riceva quindi solo il 25% dell'irraggiamento rispetto al pianeta più interno. La notevole percentuale di anidride carbonica è dovuta al fatto che Venere non ha un ciclo del carbonio, in quanto non possiede acqua liquida che possa fungere da catalizzatore nella relazione di Urey, per incorporare nuovamente questo elemento nelle rocce e nelle strutture di superficie, né esistono organismi (come le piante sulla Terra) che la possano assorbire in biomassa. Come detto è quindi l'anidride carbonica ad aver generato un potentissimo effetto serra, a causa del quale il pianeta è divenuto così caldo da ritenere che gli antichi oceani di Venere siano evaporati, lasciando una superficie asciutta e desertica, con molte formazioni rocciose. Il vapor acqueo si è poi dissociato a causa dell'alta temperatura e a causa dell'assenza di una magnetosfera, così che l'idrogeno, a causa della sua leggerezza, è stato diffuso nello spazio interplanetario dal vento solare. Il pianeta, come detto, è ricoperto da un opaco strato di nuvole di acido solforico, altamente riflettenti, che insieme alle nubi dello strato inferiore impediscono la visione della superficie dallo spazio e questa impenetrabilità ha originato molteplici discussioni, perdurate fino a quando i segreti del suolo di Venere furono rivelati dalla planetologia nel ventesimo secolo. La mappatura della sua superficie è stata possibile attraverso i dati forniti dalla sonda Magellano tra il 1990 e il 1991. Ne è risultato un suolo con evidenze di estensivo vulcanismo, anche se l'assenza di flussi lavici accanto alle caldere visibili, rimane un problema. La mancata evidenza di attività tettonica viene collegata alla notevole viscosità della crosta, dovuta all'assenza dell'effetto lubrificante provocato dall'acqua, il che rende più difficile la subduzione, meccanismo geologico che, come detto, sulla Terra, ha un ruolo chiave nella teoria della *tettonica a placche*, per il quale si ha lo scorrimento di una placca litosferica sotto un'altra placca ed il suo conseguente trascinarsi in profondità nel mantello, connesso alla produzione di nuova litosfera oceanica nelle dorsali medio-oceaniche del nostro pianeta. Anche se vi sono poche informazioni dirette sulla struttura interna e sulla geochimica venusiana, a causa della mancanza di dati sismici e della conoscenza del suo momento di inerzia (Goettel, 1981), le somiglianze in termini di dimensioni e di densità tra Venere e la Terra suggeriscono che i due pianeti possano avere una struttura interna simile: un *nucleo*, un *mantello* e una *crosta*. Si ritiene che il nucleo venusiano, come quello della Terra, sia fuso, dal

momento che i due pianeti hanno avuto un processo di raffreddamento simile. La massa leggermente inferiore di Venere suggerisce che le pressioni siano significativamente più basse al suo interno rispetto a quelle terrestri. La differenza principale tra i due pianeti è l'assenza, come detto, della tettonica a placche su Venere dovuta probabilmente alla diversa composizione della litosfera e del mantello venusiani rispetto a quelli terrestri. L'omogeneità della crosta di Venere determina una minore dispersione di calore dal pianeta, che infatti presenta un flusso di calore con valori di circa la metà rispetto a quelli terrestri. L'apparente assenza di un campo magnetico potrebbe essere legata all'assenza di un nucleo solido all'interno del pianeta. Tuttavia, nel 1967 Venera-4 ha scoperto che Venere possiede un campo magnetico, ma molto più debole di quello terrestre. Questo campo magnetico viene generato da un'interazione tra la ionosfera e il vento solare, contrariamente a quanto avviene nel caso del nostro pianeta, il cui campo nasce dall'effetto dinamo delle correnti convettive all'interno del mantello. Il campo venusiano si dimostra essere troppo debole per fornire una adeguata protezione dal vento solare. Le particelle dell'alta atmosfera vengono infatti continuamente strappate al campo gravitazionale del pianeta per disperdersi nello spazio. La mancanza di un campo magnetico intrinseco a Venere è un dato sorprendente, visto che è simile alla Terra per dimensioni, e inizialmente si era previsto anche per questo pianeta un effetto dinamo all'interno del mantello (v. Sez. 1.3.3) (*Marzari, 2012; Ortolani, 2012; [a]*).

### 1.3.2 Marte

Diamo alcune caratteristiche sul *Pianeta Rosso* (*Marzari, 2012; Ortolani, 2012; Galletta & Sergi, 2005*). Il pianeta Marte rappresenta un interessante laboratorio di confronto per comprendere meglio i fenomeni che sono avvenuti sulla Terra e, in generale, sui pianeti terrestri. Marte si presenta come relativamente piccolo, con una massa di appena un decimo rispetto alla Terra e una gravità di circa un quarto di quella terrestre. Il giorno di Marte è molto vicino a quello terrestre e l'anno dura circa 1.8 anni terrestri. La distanza Marte-Sole è circa 1.5 UA e la quantità di radiazione Solare che Marte riceve è circa la metà di quella ricevuta dalla Terra. Marte è dotato di una tenue atmosfera, con pressione al suolo di appena 6 millibar<sup>12</sup>: meno dell'1% rispetto a quella della Terra. L'atmosfera marziana si compone principalmente di anidride carbonica (95%), così come su Venere, azoto (2,7%), argon (1,6%), vapore acqueo (in tracce), ossigeno e monossido di carbonio. Durante l'inverno l'abbassamento della temperatura provoca la condensazione fra il 25-30% dell'atmosfera che forma spessi strati di ghiaccio, molto probabilmente di anidride carbonica solida (ghiaccio secco), che può passare facilmente allo stato di vapore;

<sup>12</sup>La pressione atmosferica media è di 700 Pa, ma varia da un minimo di 30 Pa, sull'Olympus Mons, a oltre 1155 Pa, nella depressione di Hellas Planitia;  $1atm = 1033g/cm^2 = 1013millibar = 101325Pa(Pascal)$  [a].

è impensabile che la variazione stagionale sia dovuta al ghiaccio d'acqua, che non potrebbe in alcun modo nè fondere nè sublimare, nelle condizioni marziane. Con l'estate questo ghiaccio secco sublima causando grandi sbalzi di pressione e conseguenti tempeste con venti che raggiungono i 400 km/h. Questi fenomeni stagionali trasportano grandi quantità di polveri e anche di vapore d'acqua che generano grandi cirri. Queste nuvole vennero fotografate dal *Rover Opportunity* nel 2004. Le due calotte polari seguono l'andamento stagionale come avviene sulla Terra: la temperatura ai poli va da  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , d'estate, a  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , d'inverno. La temperatura media, invece, è circa  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (Fig. 1.7). C'è evidenza che sotto il ghiaccio di anidride carbonica, ci sia comunque ghiaccio d'acqua. Lo spessore delle calotte è rilevante, con un'altezza della calotta nord, rispetto al terreno circostante, di 1000-3000 m. Il volume totale di ghiaccio stimato per questa calotta è circa un milione di  $\text{km}^3$ , che è circa un trentesimo del volume dei ghiacci dell'Antartide (dove si trova la maggior riserva di ghiacci permanenti della Terra), paragonabile alla riserva di ghiaccio in Groenlandia. La sonda Mariner 9, entrata in orbita attorno a Marte nel 1971, ha messo in evidenza, per la prima volta, anche l'esistenza di imponenti vulcani, tre nella regione Tharsis e uno chiamato Nix Olimpica, quest'ultimo in realtà era già stato osservato da Schiapparelli nel 1879 come una macchia chiara. La Nix Olimpica è il maggiore e il più studiato dei vulcani di Marte, detto anche Monte Olimpo, (Fig. 1.8). E' un cratere complesso con un'estensione di base di circa 500 km, delimitata da una brusca scarpata di 4000 m, ed una caldera del diametro di circa 90 km, che si eleva rispetto alla media della superficie di Marte di circa 26400 m.

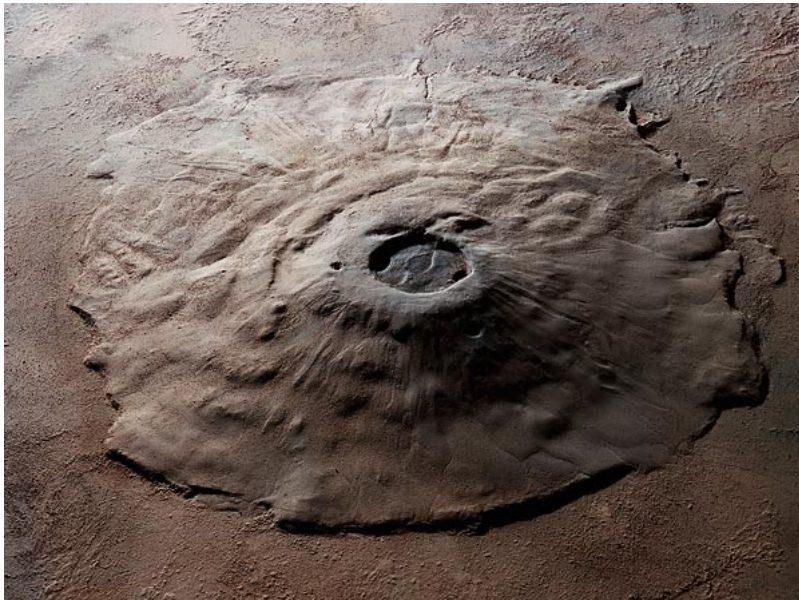


Figura 1.8: Il vulcano Monte Olimpo su Marte [o].

Su Marte la presenza di questi grandi vulcani isolati depone a favore dell'ipotesi di una crosta più rigida senza possibilità di spostamenti. Gli altri tre vulcani maggiori di Marte raggiungono altezze di poco inferiori. Questo fa presumere che

l'altezza raggiunta da questi vulcani (tra 20000 e 26000 m) sia anche la massima altezza permessa dalla pressione interna del magma. E' anche possibile che la crosta non sopporti un peso superiore senza liquefarsi. Resta comunque un dato di fatto: questi quattro vulcani rappresentano le strutture più elevate tra i pianeti terrestri (su Venere la massima altezza è raggiunta dai monti Maxwell con 12000 m). La scoperta più straordinaria di Mariner 9 è stata quella di canali o meglio di fiumi asciutti. Dai conteggi dei crateri di impatto si conclude che i fiumi di Marte risalgono a 2.8-3.8 miliardi di anni fa. Da allora l'attività superficiale erosiva dell'acqua sembra essere cessata del tutto salvo alcuni episodi recenti, di breve durata (ad esempio nella regione di Alba), che risalgono a circa 10 milioni di anni fa. Di recente il radar, a bordo del Mars Express, ha permesso di rivelare importanti depositi di ghiacci al di sotto del basamento della calotta polare nord e al di sotto del suolo, all'interno di alcuni grandi crateri. I rapporti isotopici nei gas atmosferici depongono a favore di un processo rilevante di perdita di atmosfera col tempo. Gli episodi iniziali di condensazione dell'acqua e creazione di bacini d'acqua hanno certamente portato ad un processo iniziale di fissazione di anidride carbonica (dalla reazione di Urey) con riduzione dell'effetto serra che ha scatenato un processo di glaciazione irreversibile, forse attorno a 3 miliardi di anni fa. La perdita di atmosfera successiva ha ulteriormente peggiorato la situazione. Non è ancora chiaro se episodi successivi, legati ad esempio a variazioni di inclinazione dell'asse di rotazione, e quindi allo scioglimento dei ghiacci polari, possano aver portato ad un incremento della pressione atmosferica e a formazione temporanea di fiumi. La magnetosfera di Marte è assente a livello globale e, in seguito alle rilevazioni del magnetometro MAG/ER del *Mars Global Surveyor* (1996) e considerando che è stata constatata l'assenza di magnetismo sopra i crateri Argyre e Hellas Planitia, si presume sia scomparsa da circa 4 miliardi di anni; quindi i venti solari colpiscono direttamente la sua ionosfera. Questo mantiene l'atmosfera del pianeta piuttosto sottile per via della continua asportazione di atomi dalla parte più esterna della stessa. A riprova di questo fatto sia il *Mars Global Surveyor* che il *Mars Express* (2003) hanno individuato queste particelle atmosferiche ionizzate allontanarsi dal pianeta<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup>Dati importanti su Marte stanno arrivando dalla missione ExoMars, progettata per l'esplorazione del pianeta Marte tramite una sonda robotica sviluppata dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e dall'Agenzia Spaziale Russa (Roscosmos). ExoMars è un progetto composto da due missioni, entrambe con l'obiettivo di cercare biotracce su Marte. La prima missione è stata lanciata dal cosmodromo di Bajkonur, con un vettore Proton-M, il 14 marzo 2016, ed è composta dal Trace Gas Orbiter (TGO), dotato di strumenti per l'analisi dei gas atmosferici e la mappatura delle loro fonti, e dal lander Schiaparelli (andato però distrutto il 19 ottobre 2016). La seconda missione sarà lanciata tra pochi anni e consisterà di un modulo di atterraggio costruito sulla base dei dati raccolti da Schiaparelli che porterà sulla superficie del pianeta un rover ESA.



### 1.3.3 Peculiarità della Terra

La Terra è il terzo pianeta in ordine di distanza dal Sole e il più grande dei pianeti terrestri del Sistema Solare, sia per massa che per diametro. È il luogo primigenio degli esseri umani e nel quale vivono tutte le specie viventi conosciute, l'unico corpo planetario del Sistema Solare adatto a sostenere la *Vita* come da noi concepita e conosciuta. Sulla sua superficie, infatti, si trova acqua in tutti e tre gli stati (solido, liquido e gassoso) e un'atmosfera composta in prevalenza d'azoto e ossigeno che, insieme al campo magnetico che avvolge il pianeta, protegge la Terra dai raggi cosmici e dalle radiazioni solari. La formazione della Terra è datata a circa 4,54 miliardi di anni fa. Essa possiede un satellite naturale, la Luna, la cui età, stimata analizzando alcuni campioni delle rocce più antiche, è risultata compresa tra 4,29 e 4,56 miliardi di anni. Il suo asse di rotazione è inclinato rispetto alla perpendicolare al piano dell'eclittica: questa inclinazione, combinata con la rivoluzione della Terra intorno al Sole, causa l'alternarsi delle stagioni. Le condizioni atmosferiche primordiali sono state alterate, in maniera preponderante, dalla presenza di forme di vita, le quali hanno creato un diverso equilibrio ecologico plasmando la superficie del pianeta<sup>14</sup>. Circa il 71% della superficie è coperta da oceani di acqua salata, mentre il restante 29% è rappresentato dai continenti e dalle isole. La superficie esterna è suddivisa in diversi segmenti rigidi, o placche tettoniche, che si spostano lungo la superficie in periodi di diversi milioni di anni. La parte interna, attiva dal punto di vista geologico, è composta da uno spesso strato relativamente solido o plastico, denominato *mantello*, e da un *nucleo*, diviso a sua volta in *nucleo esterno* (fluidi), dove si genera il campo magnetico, e *nucleo interno* (solido), costituito principalmente da ferro e nichel (Fig. 1.4). Importanti sono le influenze esercitate sulla Terra dall'esterno. Infatti, ad esempio, la Luna è all'origine del fenomeno delle maree, stabilizza lo spostamento dell'asse terrestre e ha lentamente modificato la lunghezza del periodo di rotazione del pianeta (rallentandolo) (si veda la prossima sezione). Un bombardamento di comete durante le fasi primordiali potrebbe aver giocato un ruolo fondamentale nella formazione degli oceani, anche se questa è una questione ancora aperta (v. Sez 3.3), inoltre, in un periodo successivo, alcuni impatti di asteroidi hanno, molto probabilmente, provocato significativi cambiamenti delle caratteristiche della superficie, alterandone la vita presente<sup>15</sup>. I movimenti della Terra incidono

<sup>14</sup>Si pensi, ad esempio, che le molecole contenenti atomi di carbonio, azoto o zolfo, incorporati anche nelle cellule di organismi viventi, entrano in atmosfera in seguito a combustione di vegetali o combustibili fossili, emissione delle piante, decadimento e decomposizione di piante ed animali. Dall'atmosfera vengono rimossi tramite ossidazione con il gruppo ossidrilico OH o tramite cattura da parte della pioggia. La variazione di concentrazione di questi componenti è regolata da diversi fattori: radiazione solare che innesca o catalizza le reazioni chimiche, esseri viventi che attraverso la respirazione e la fotosintesi mantengono un'interazione dinamica con la biosfera, eruzioni vulcaniche, attività antropica, che è responsabile di una parte notevole dei cambiamenti nella composizione chimica dell'atmosfera [p].

<sup>15</sup>A tal proposito si fa riferimento, ad esempio, alla teoria della *Panspermia* e cioè quella teoria per la quale è possibile che i "semi primordiali" della vita possano essere arrivati nel nostro pianeta attraverso i bombardamenti meteorici o cometari del passato (*Galletta & Sergi, 2005*).

su diversi aspetti di natura astronomica e climatica della vita del pianeta. L'effetto combinato di questi moti sul pianeta è stato illustrato nelle curve rappresentanti i *Cicli di Milanković* i quali evidenziano gli effetti collettivi delle variazioni dei movimenti della Terra sul suo clima. L'eccentricità orbitale, l'inclinazione assiale e la precessione dell'orbita terrestre variano periodicamente dando luogo a glaciazioni ogni 100000 anni circa, durante l'era glaciale del Quaternario (*Tomasella, 1994; [a]*). Oltre ai moti di rotazione e rivoluzione, il movimento della Terra è soggetto ad alcune variazioni pseudo-periodiche. Alcuni cambiamenti nel moto e nell'orientamento modificano, infatti, la quantità di radiazione solare che raggiunge la Terra, oltre alla sua distribuzione sulla superficie terrestre. Questo fenomeno è chiamato *forcing solare* (cioè un tipo di forzatura radiativa). Sono considerate importanti le variazioni nelle zone vicine all'area polare nordica a causa dell'ampia estensione di terreno, che reagisce più rapidamente degli oceani alle variazioni della radiazione solare; riportiamo di seguito, come esempio, la curva di insolazione di Milankovitch (Fig. 1.9):

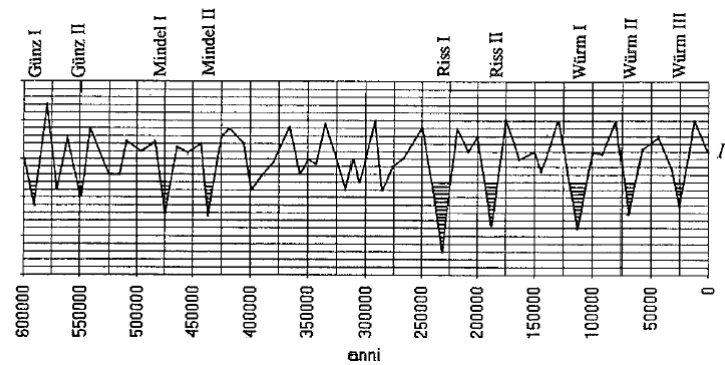


Figura 1.9: Curva di insolazione di Milankovitch dal presente fino a 600000 anni fa, ed identificazione dei picchi con i periodi glaciali del Pleistocene conosciuti; in ordinata l'insolazione media estiva ad una latitudine di  $65^\circ\text{N}$ ,  $I_0 \equiv I(t = 0)$  (*Tomasella, 1992*).

Moti principali:

- Moto di rotazione: è il movimento della Terra attorno al suo asse che definisce il giorno terrestre di circa 24 ore. Un punto all'equatore ha una velocità tangenziale di 1668 km/h. Per conoscere la velocità in altri luoghi è sufficiente moltiplicare tale velocità per il coseno della latitudine. L'Italia ha quindi una velocità di 1240 km/h, i poli hanno una velocità di 0 km/h. .
- Moto di rivoluzione: è il movimento della Terra attorno al Sole. Definisce l'anno terrestre di circa 365 giorni.

Moti millenari:

- Precessione degli equinozi: è il risultato del movimento doppio-conico dell'asse terrestre per l'azione gravitazionale della Luna e del Sole su di una Terra



deformata dalla sua rotazione. Viene anche detta precessione luni-solare e il suo periodo è di circa 26000 anni.

- Precessione anomalistica (spostamento della linea degli apsi<sup>16</sup>): movimento dell'orbita terrestre causato dall'attrazione esercitata dagli altri pianeti; la linea degli apsi, ruota, facendo perno nel centro del Sole, in senso antiorario. Il periodo di questa rotazione è di circa 117000 anni.
- Variazione dell'eccentricità dell'orbita: benché non vari la lunghezza della linea degli apsi, il rapporto tra la distanza del Sole dal centro dell'orbita e il semiasse maggiore dell'orbita varia, in un periodo di circa 92000 anni, da un minimo corrispondente ad un valore di eccentricità di circa 0,003 ad un massimo pari a un valore di eccentricità di circa 0,054. Tale fenomeno è dovuto all'attrazione gravitazionale esercitata dal Sole e dagli altri pianeti del Sistema Solare. L'aumento dell'eccentricità porta come conseguenza un aumento della distanza fra i due fuochi dell'ellisse; in uno dei due fuochi risiede il Sole; (v. Fig. 1.10):

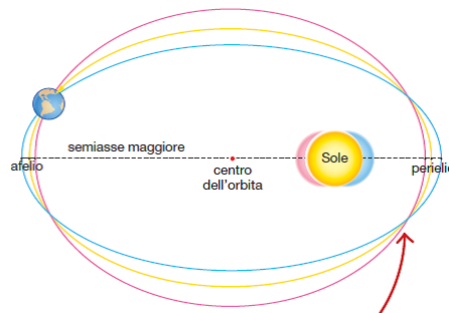


Figura 1.10: Variazione dell'eccentricità dell'orbita. Sono rappresentate delle ellissi di diversa eccentricità. In tempi millenari, l'orbita della Terra si comporta quasi in questo modo, anche se il disegno mostra una situazione volutamente esagerata e il Sole in effetti non si sposta [t].

- Variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre: è la variazione dell'angolo che l'asse di rotazione della Terra forma con il piano dell'orbita. Tale angolo varia da un massimo di  $24^{\circ}20'$  a un minimo di  $21^{\circ}55'$  ogni 40000 anni, attualmente è di  $23^{\circ}27'$ . In aggiunta a questa variazione c'è un'altro spostamento dell'inclinazione assiale, la *nutazione*, che ha un periodo molto più breve, 18,6 anni, e fa sì che l'asse terrestre, anziché descrivere coni circolari, si muova lungo coni leggermente ondulati.

Moti galattici:

<sup>16</sup>Si definisce apside (a volte anche abside) il punto di maggiore o minore distanza di un oggetto celeste dal fuoco ove giace il corpo attorno a cui esso orbita.

- Il Sole, o meglio l'intero Sistema Solare, orbita attorno al centro della nostra galassia alla velocità media di circa 220 km/s [q]. Occorrono circa 230 milioni di anni per completare un giro attorno al centro Galattico. Tale periodo viene definito *anno Galattico*.

### Alcune caratteristiche della Terra

- 1) Ha la massa maggiore dei pianeti terrestri:

Pianeti	Masse a confronto con la Terra
Mercurio	0.055 $M_{\oplus}$
Venere	0.814 $M_{\oplus}$
Marte	0.107 $M_{\oplus}$
Luna	0.012 $M_{\oplus}$

Tabella 1.3: Masse a confronto di Mercurio, Venere, Terra e Luna.

- 2) Ha un'orbita attorno al Sole pressochè circolare<sup>17</sup>:

Pianeta	Eccentricità $e = \sqrt{1 - (b/a)^2}$	Rapporto b/a
Mercurio	0.206	0.759
Venere	0.007	0.999
Terra	0.017	0.999
Marte	0.093	0.995
Giove	0.048	0.998
Saturno	0.056	0.998
Urano	0.046	0.998
Nettuno	0.010	0.999
Plutone	0.248	0.620

Tabella 1.4: Eccentricità dei pianeti del Sistema Solare e loro rapporto assiale.

3) La distanza dal Sole della Terra di 1 UA le garantisce una temperatura media superficiale tra i 15-25 °C, tale da permettere l'esistenza dell'acqua allo stato liquido. Inoltre il diametro e la massa della Terra le garantiscono una velocità di fuga all'equatore che permette il mantenimento dell'atmosfera ( $V_{fuga} = \sqrt{4GM/r} = 11.2 \text{ km/s}$ ). Contribuisce a questo il ripristino del gas da parte delle eruzioni vulcaniche e della tettonica a placche. La placca, attraverso la *subduzione*, scende nel sottosuolo fondendosi a causa delle alte temperature e pressioni; se diviene parte di una *camera magmatica*, può riemergere grazie alle eruzioni risalendo il cammino vulcanico sottoforma di gas, corpuscoli, lapilli, colate laviche o flussi piroplastici (in base alla tipologia del vulcano), come si vede in Fig. 1.11:

<sup>17</sup>La Terra ha il rapporto assiale di  $(b/a)_{Terra} = 0.99985$ . La differenza tra Sole-Terra (afelio) e Sole-Terra (perielio) è uguale a 5 milioni di km.

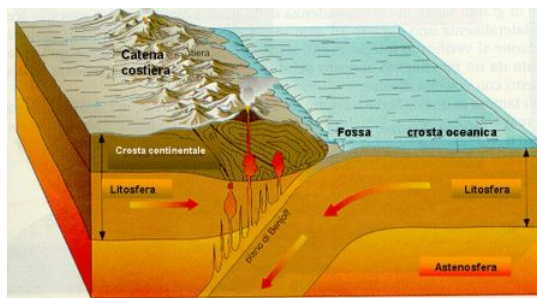


Figura 1.11: Meccanismo di *subduzione* della *tettonica a placche* e di riemissione delle particelle da parte dei vulcani durante le loro eruzioni [b].

- 4) Ha due potenti "scudi": il campo magnetico e l'atmosfera.
- Campo Magnetico: la Terra ha il valore più alto di campo magnetico tra i pianeti terrestri il che le garantisce la protezione dai raggi cosmici: 0.3-0.4 Gauss<sup>18</sup>; dall'equatore ai poli, sulla superficie terrestre, il valore del campo varia da circa poco più di 20000 nT all'equatore ai circa 70000 nT delle zone polari. La sua massima intensità è ai poli e la minima si trova all'equatore. Lo spazio è un ambiente pericoloso dove abbondano radiazioni letali eppure il nostro *pianeta azzurro* sembra passare, tutto sommato, indenne attraverso questo "tiro al bersaglio" cosmico proprio grazie alla protezione del nostro potente campo magnetico ed ad un'atmosfera fatta su misura. Il campo magnetico terrestre ha origine negli strati più profondi del pianeta e si estende nello spazio, dove forma uno scudo invisibile chiamato Magnetosfera. Questo scudo ci protegge sia dalle radiazioni cosmiche, impedendo che ci colpiscano con tutta la loro forza, che da alcuni pericoli derivanti dal Sole: il vento solare, i brillamenti solari, le espulsioni di massa coronale, che proiettano nello spazio miliardi di tonnellate di materia proveniente dalla corona solare; (Fig. 1.12)<sup>19</sup>. Il campo magnetico del nostro pianeta detto anche *geomagnetico* è un fenomeno fisico naturale ed è assimilabile al campo magnetico generato da un dipolo magnetico con poli magnetici non coincidenti con quelli geografici e non statici, e con asse inclinato di 11,30° rispetto all'asse di rotazione terrestre. Le ipotesi sulle origini di questo campo sono numerose, ma oggi le teorie sono orientate

<sup>18</sup>L'unità di misura del campo magnetico nel sistema internazionale (SI) è il tesla (T). I valori del campo, espressi in quest'unità di misura, sono molto grandi e nella pratica si utilizza il suo sottomultiplo nanotesla (nT), pari a  $10^{-9}$  T, oppure il Gauss (G) nel sistema CGS ( $1 \text{ G} = 10^{-4}$  T).

<sup>19</sup>Il vento solare è un flusso di particelle cariche emesso dall'alta atmosfera del Sole: esso è generato dall'espansione continua nello spazio interplanetario della corona solare. Questo flusso è principalmente composto da elettroni e protoni con energie normalmente compresi tra 1.5 e 10 keV. I raggi cosmici sono particelle energetiche provenienti dallo spazio esterno, alle quali è esposta la Terra e qualunque altro corpo celeste. Al di là dell'atmosfera, i raggi cosmici sono costituiti da protoni (per circa il 90%), da nuclei di elio (quasi il 10%); tuttavia, anche elettroni ed altri nuclei leggeri, fotoni, neutrini ed in minima parte antimateria (positroni ed antiprotoni) fanno parte dei raggi cosmici primari. Giunte nell'atmosfera terrestre, tali particelle interagiscono con i nuclei delle molecole dell'atmosfera, formando così, in un processo a cascata, nuove particelle proiettate in avanti, che prendono il nome di raggi cosmici secondari [a].

verso un modello analogo a quello di una dinamo ad autoeccitazione. Anche altri corpi celesti, come il Sole o Giove, generano un loro campo magnetico. Il campo *geomagnetico* causa numerosi effetti facilmente sperimentabili. Ad esempio l'aurora polare è generata dall'interazione tra il vento solare e la magnetosfera. Inoltre, la presenza del nostro "scudo" elettromagnetico, deviando i raggi cosmici e riducendo la quantità di particelle cariche che raggiunge il suolo, dà origine alle fasce di Van Allen (Fig. 1.12): tori di particelle cariche (plasma) all'interno della magnetosfera terrestre, trattenute dal campo magnetico terrestre per effetto della forza di Lorentz (Marzari, 2012).

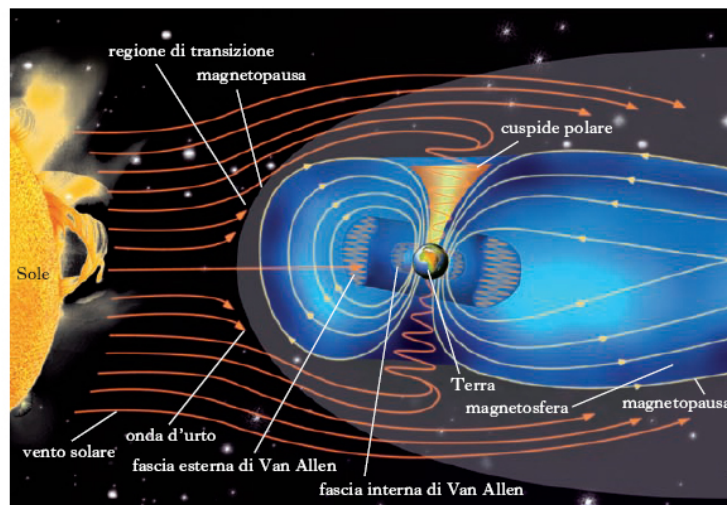


Figura 1.12: Raffigurazione del campo magnetico terrestre e sue caratteristiche (Goole Immagini).

- L'atmosfera terrestre: questo involucro gassoso che accompagna la Terra nei suoi moti di rotazione e di rivoluzione, composto dal 78% di N, 21 % di O, 1% altri gas (tra i quali la  $CO_2$ ), fornisce un'ulteriore protezione (Fig. 1.13), infatti, nella Stratosfera, circa a 25 km di quota, vi è lo strato di ozono ( $O_3$ ), una forma di ossigeno che assorbe fino al 99 % delle radiazioni ultraviolette aiutando così a proteggere dalle radiazioni pericolose le molte forme di vita del nostro pianeta, come il plancton e l'uomo stesso. E' interessante notare che il livello di ozono nella stratosfera non è fisso, ma direttamente proporzionale all'intensità dei raggi ultravioletti, il che fa dello strato di ozono un scudo efficace e dinamico. Inoltre l'atmosfera ci protegge dalla pioggia quotidiana di milioni di corpi spaziali, che vanno da minuscole particelle a veri e propri massi. Fortunatamente la stragrande maggioranza di questi meteoriti si incenerisce nell'atmosfera. Da notare inoltre che gli scudi della Terra non impediscono il passaggio delle radiazioni che sono indispensabili alla vita, come quella nell'infrarosso e nella banda visibile; anzi, l'atmosfera permette la propagazione del calore in tutto il globo, e di notte ne rallenta la dispersione.

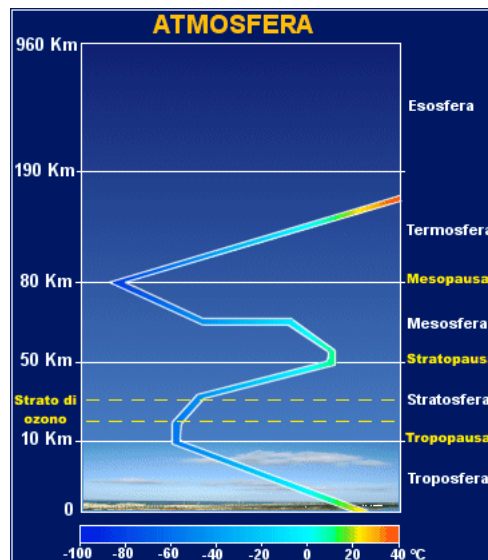


Figura 1.13: Gradiente di temperatura nell' atmosfera della Terra [a].

### 1.3.4 Sistema Terra-Luna

Analizziamo in questa parte l'importanza dei satelliti naturali sulla stabilità delle orbite dei pianeti (*Tomasella, 1992; Tomasella et al., 1995*) e quindi la loro rilevanza per rendere l'ambiente planetario stabile. La Luna ha un ruolo fondamentale per determinare la dinamica rotazionale terrestre. A differenza della Luna nei confronti della Terra, i due satelliti marziani Deimos e Phobos sono ininfluenti per la dinamica rotazionale di Marte, perchè troppo poco massivi. *Tomasella et al. (1995)* studiano l'evoluzione dell'obliquità della Terra quando le interazioni di marea del sistema Terra-Luna vengono considerate ponendo la Luna a circa 66 e 68 raggi terrestri. Integrando numericamente le equazioni differenziali di precessione per l'asse di rotazione terrestre, essi constatano che l'evoluzione della obliquità diventa caotica dovuta alla sovrapposizione di risonanza di alcune frequenze fondamentali del Sistema Solare. Queste frequenze sono state identificate come la  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_6$  nella soluzione di *Laskar (1988) (Appendice C)*. Uno studio dettagliato dell'evoluzione dell'obliquità dei pianeti interni è stato eseguito da *Laskar & Robutel (1993)* che hanno studiato la stabilità dell'orientamento dell'asse di spin di rotazione su tempi scala lunghi, per diversi possibili valori iniziali sia dell'obliquità che di precessione, integrando numericamente le equazioni di precessione. Emergono, per la Terra, zone caotiche su larga scala dove l'obliquità subisce grandi variazioni imprevedibili. Prima *Ward (1982, 1992)* e poi *Laskar et al. (1993)* hanno considerato l'influenza della Luna nello stabilizzare l'orientamento della Terra impedendo al movimento di entrare nella zona caotica, mantenendo il valore di obliquità vicino al suo valore attuale. *Tomasella et al. (1995)*, studiano l'obliquità terrestre considerando la continua evoluzione della marea del sistema Terra-Luna che fa aumentare la dimensione dell'orbita lunare, dal presente valore di 60.3 raggi terrestri a circa 66 e 68 raggi ter-

restri e, come conseguenza, causa l'allungamento del giorno terrestre da 38 a 42 h, rispettivamente. Nel 1966 *Goldreich* aveva già considerato gli effetti dell'azione della marea nel sistema Terra-Luna che producono un progressivo allontanamento della Luna. A causa delle frizioni di marea lunare, la perdita del momento angolare di spin della Terra è infatti trasferito al movimento orbitale della Luna. L'espansione dell'orbita lunare induce un momento lunare torcente decrescente con un allungamento del giorno terrestre. Quest'ultimo processo genera un ulteriore calo di entrambi i momenti torcenti di precessione da parte del Sole e della Luna per la diminuita deformazione all'equatore della Terra (la ellitticità dinamica  $H$  dipende dal quadrato della velocità angolare di rotazione) (*Appendice C*). Entrambi questi meccanismi producono una riduzione del tasso di precessione della Terra tanto quanto aumenta la distanza della Luna. Questi risultati possono essere utilizzati per il calcolo della costante di precessione  $\alpha$  e della "rate" di precessione  $\omega$  a diverse distanze lunari. Come  $\omega$  si avvicina alle frequenze fondamentali del Sistema Solare, possono avvenire fenomeni di risonanza. *Laskar & Robutel (1993)* hanno analizzato in dettaglio il comportamento dell'obliquità della Terra quando la Luna è a 66,5 raggi terrestri, e si è trovato che il comportamento caotico è indotto dalla sovrapposizione di due risonanze<sup>20</sup>, una con la frequenza fondamentale  $S_6$  (*node secular rate* di Giove e Saturno) e l'altra con frequenza  $S_3$  (frequenza di precessione del nodo della Terra). La risonanza  $S_6$  è la prima incontrata dal sistema che si avvicina a 66.5 raggi terrestri. Di seguito si vede l'evoluzione dell'obliquità della Terra,  $\theta$ , linea tratteggiata in un arco di tempo di 25 milioni di anni con la Luna a 66.5 raggi terrestri (Fig. 1.14).

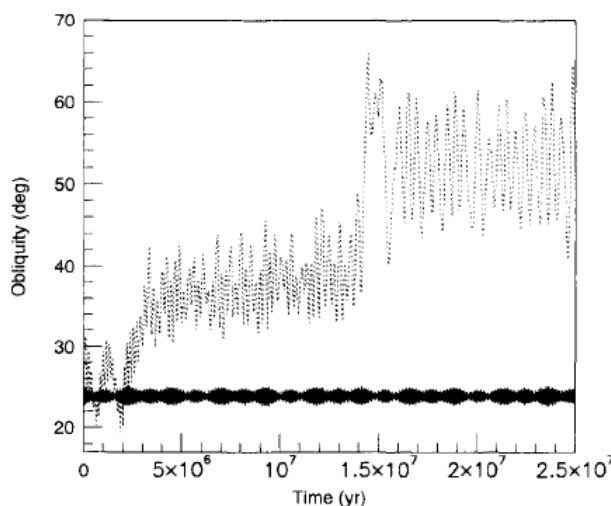


Figura 1.14: Evoluzione dell'obliquità dell'attuale configurazione del sistema Terra-Luna (linea continua) e per una configurazione nella quale l'orbita lunare si è espansa da 60.3 a circa 66.5 raggi terrestri (linea con i punti) (v. *Tomasella et al., 1995*).

<sup>20</sup>Nella meccanica celeste, la risonanza orbitale avviene quando due corpi orbitanti hanno periodi di rivoluzione tali che il loro rapporto è esprimibile in frazioni di numeri interi piccoli. Quindi i due corpi esercitano, l'un l'altro, una regolare influenza gravitazionale. Questo fenomeno può stabilizzare le orbite e proteggerle da perturbazioni gravitazionali.

Come caso di riferimento, si è anche tracciato (linea continua) la soluzione dell'obliquità assumendo le condizioni iniziali con i valori attuali di  $\theta = 23.5^\circ$  e  $\alpha = 54.94 \text{ arcsecyr}^{-1}$ . Con la Luna più lontana dalla Terra il comportamento è fortemente caotico. L'obliquità presenta oscillazioni significativamente più grandi rispetto al caso di riferimento. Appare evidente che l'obliquità ha un comportamento caotico su larga scala principalmente a causa della interazione tra  $S_3$  e  $S_6$  ( $\theta$  circa  $43^\circ$  e  $47^\circ$ , rispettivamente). Quando si eliminano tutte le tre frequenze fondamentali dal sistema  $S_3, S_4$  e  $S_6$ , le variazioni dell'obliquità sono più strette ma il comportamento non è normale a causa della presenza di forti combinazioni tra le frequenze (*Laskar, 1988*). Il valore di  $35^\circ$  assunto come obliquità iniziale per la simulazione con la Luna a 68 raggi terrestri non tiene conto delle grandi variazioni caotiche che l'obliquità della Terra potrebbe aver subito quando la Luna si trovava tra i 66.5 e 68 raggi terrestri. La simulazione del caso con la Luna a 68 raggi terrestri e obliquità iniziale di  $35^\circ$ , è rappresentato in Fig. 1.15.

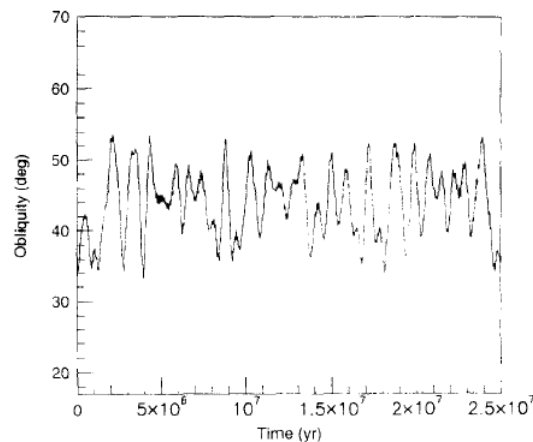


Figura 1.15: Evoluzione della Terra con la Luna a 68 raggi terrestri senza le frequenze  $S_3, S_4, S_6$  (v. *Tomasella et al., 1995*).

### Confronto Terra-Marte

Confrontiamo brevemente la zona caotica di instabilità per la Terra e Marte (*Tomasella, 1992*). Sebbene tutti i pianeti del Sistema Solare siano soggetti ad evoluzione dinamica, Marte rappresenta senza dubbio l'esempio più singolare: le risonanze secolari del tipo spin-orbita sono la causa di importanti variazioni nell'orientazione del suo asse di spin. Ciò è in netto contrasto con il comportamento del nostro pianeta, che gode di grande stabilità dinamica per la presenza della Luna. Un problema non indifferente è rappresentato dalla scelta della costante di precessione di Marte, ad oggi molto incerta a causa della scarsa conoscenza del momento di inerzia del pianeta rispetto all'asse di rotazione stimato tra  $0.345 - 0.365 mR^2$  (m e R, rispettivamente, massa e raggio del pianeta) (*Bills, 1990*). Di conseguenza la costante di precessione varia tra 8.8-8.2 arcsec/anno. La storia dinamica di Marte assume caratteristiche diverse a seconda della costante di precessione scelta e ciò significa



che un errore nelle condizioni iniziali può comportare la previsione di una evoluzione diversa da quella reale. Dai dati raccolti dalla sonda Viking si può assumere il valore di  $\alpha = 8.258 \text{ arcsec/anno}$ . La costante di precessione della Terra è, dai dati dal satellite Lageos,  $\alpha = 54.945 \text{ arcsec/anno}$ . Dalle simulazioni di *Tomasella (1992)*, per 30 milioni di anni centrati sulla data attuale (15 nel passato e 15 nel futuro), troviamo che le massime variazioni dell'obliquità di Marte sono circa  $\pm 15.4^\circ$  attorno al valore medio  $23.4^\circ$ . I grafici di confronto seguenti rendono ancora più l'idea di quanto sia diversa la situazione dinamica dei due pianeti presi in esame, (Fig. 1.16):

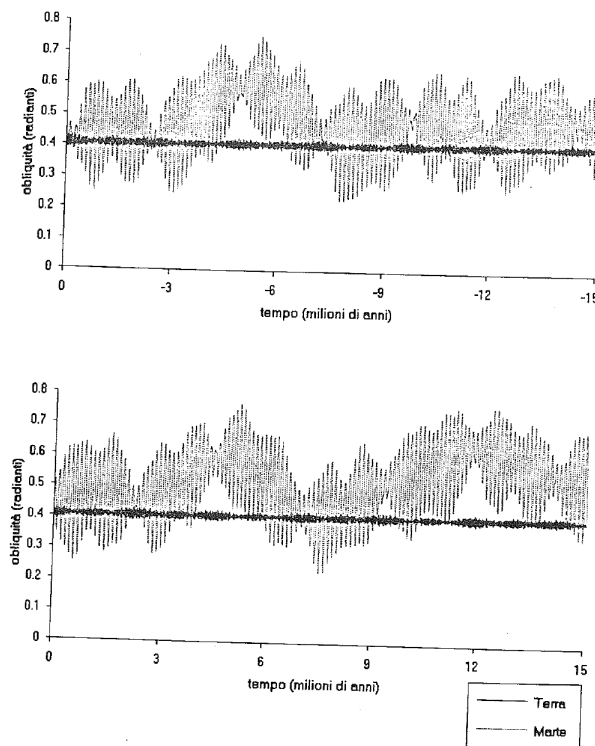


Figura 1.16: Evoluzione dell'obliquità della Terra (linea nera) e di Marte (linea grigia) per 15 milioni di anni nel passato (in alto) e nel futuro (in basso) (v. *Tomasella et al., 1995*).

Le oscillazioni dell'inclinazione dell'orbita marziana sono maggiori rispetto a quelle dell'orbita terrestre: Marte varia la sua inclinazione fino a quasi  $7^\circ$  contro i  $3^\circ$  di quella terrestre, tenendo conto della presenza della Luna. Interviene anche il fenomeno di amplificazione dell'ampiezza di oscillazione a causa della vicinanza della frequenza di precessione di Marte ad alcune frequenze secolari. La Terra con l'elevato valore della sua velocità di precessione (il più alto del Sistema Solare), ben distante da tutte le frequenze orbitali, rimane dinamicamente stabile per tutti i trenta milioni di anni presi in considerazione. Ricordiamo che stabilità dinamica è sinonimo di stabilità climatica. Riportiamo di seguito, in Fig. 1.17, l'andamento temporale del flusso di energia solare ai poli per la Terra e per Marte, evidenziando la stretta connessione tra insolazione e obliquità del pianeta: in accor-



do con l'evoluzione rotazionale la curva di insolazione polare di Marte presenta un andamento drasticamente variabile, in netto contrasto con la situazione terrestre. Inoltre, *Tomasella (1992)* suppone che l'obliquità di Marte (quindi il suo clima) potrebbe subire delle variazioni ancora più drastiche di quelle qui esposte.

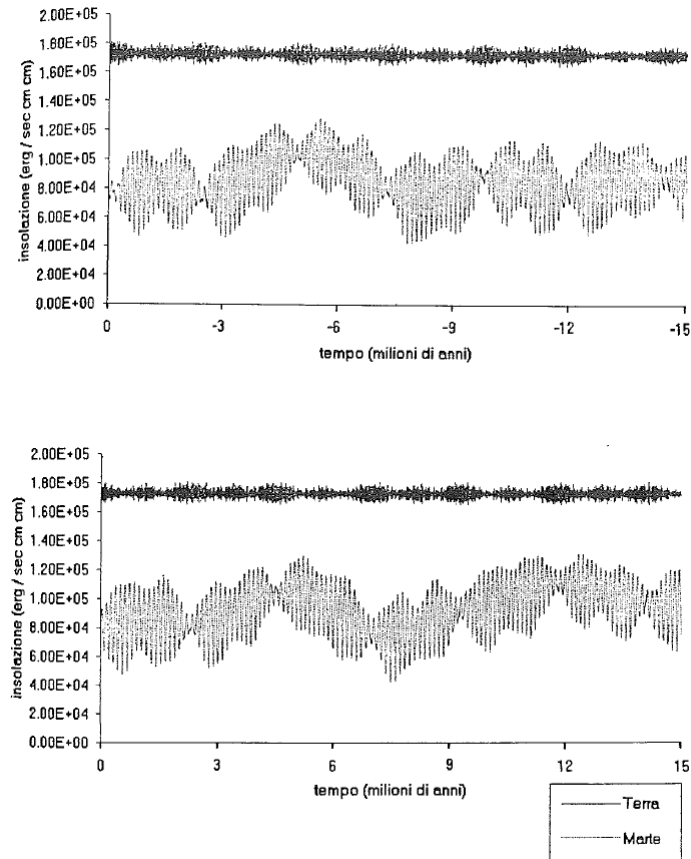


Figura 1.17: Flusso di energia solare ai poli per Terra e Marte, nel passato (in alto) e nel futuro (in basso) (v. *Tomasella et al., 1995*).

Gli studi di *Laskar et al. (1992)* sulla stabilità dell'orientazione dell'asse di spin planetario, mostrano che tutti i pianeti terrestri potrebbero aver sperimentato nel passato delle variazioni caotiche della loro obliquità. Mercurio e Venere sarebbero stati stabilizzati dall'effetto mareale del Sole che ha rallentato notevolmente la loro rotazione; la Terra dalla cattura della Luna. L'obliquità di Marte è tutt'ora all'interno di una vasta regione caotica. La Terra grazie alla presenza della Luna che fornisce il contributo principale al valore assunto dalla costante di precessione (i due terzi del totale) si trova nel mezzo della zona stabile. Le variazioni della sua obliquità sono piccole e regolari. Al contrario, Marte è all'interno della zona caotica in corrispondenza di una  $\alpha = 8 \text{ arcsec/anno}$ , dove sono possibili delle variazioni di  $\theta$  da  $0^\circ$  a  $60^\circ$  in un tempo relativamente piccolo.

## Conclusioni sul sistema Terra-Luna

Riportiamo alcuni punti importanti come sintesi di questa sottosezione:

- I rapporto della massa della Luna sulla Terra,  $M_L/M_T \simeq 1/80$ , alla distanza  $d_{T-L} \simeq 30 d_{\oplus}$ , è fondamentale per garantire stabilità al sistema Terra-Luna;
- Il tempo scala per variare l'inclinazione da parte dei grandi pianeti, Giove+Saturno+Urano+Nettuno, è dell'ordine di  $t \sim 100000 \text{ yr}$ , ma la precessione lunisolare è la più breve di tutto il Sistema Solare con un periodo di  $t_p \simeq 26000$  anni.
- Se come esercizio mentale si arrivasse ad eliminare la Luna, il Circolo Polare Artico arriverebbe all'incirca alle latitudini del Cairo, con conseguente scioglimento dei ghiacci e variazioni estreme dell'albedo.
- Dalla Fig. 1.16 e dalla Fig. 1.17, con il periodo di precessione per Marte  $t_p \simeq 175000$  anni, si evidenzia che le limitate oscillazioni dell'inclinazione dell'orbita della Terra, grazie alla presenza della Luna, nei confronti di Marte, rendono dinamicamente stabile il nostro pianeta. Inoltre, l'andamento temporale del flusso di energia solare ai poli per la Terra e per Marte, evidenzia la stretta connessione tra insolazione e obliquità del pianeta; tale andamento appare drasticamente variabile per Marte, non garantendo una stabilità climatica nel pianeta e non fornendo al *pianeta rosso* buone condizioni di abitabilità.

## 1.4 La CHZ

In questa sezione si descrivono alcune caratteristiche della *zona circumstellare abitabile* (CHZ) riferita al Sistema Solare ed, in generale, agli esopianeti. Quali sono i parametri che condizionano la vita come noi la conosciamo in un pianeta? Abbiamo analizzato, nelle precedenti sezioni, aspetti essenziali per rispondere a questa domanda come: la relazione massa-raggio del pianeta per calcolare la velocità di fuga, i moti dei pianeti con i loro periodi ed inclinazioni, la presenza di satelliti naturali, l'importanza della presenza del campo magnetico e dell'altezza di scala dell'atmosfera<sup>21</sup>. Di seguito vedremo altri elementi indispensabili alla vita e al suo sviluppo come, ad esempio, le condizioni necessarie per avere l'acqua allo stato liquido in superficie (legame della temperatura superficiale con la distanza del pianeta dalla stella).

---

<sup>21</sup>Ricordiamo che questa dipende dalla temperatura, composizione dell'atmosfera e dalla gravità del pianeta.

### 1.4.1 CHZ del Sistema Solare: definizioni e limiti

Potremmo definire l'abitabilità planetaria come la misura della capacità di un corpo celeste di sviluppare e accogliere la Vita. Non è possibile, tuttavia, discutere le condizioni per sviluppare tale capacità, se non si precisa il livello di sviluppo della vita a cui si fa riferimento<sup>22</sup>. Una condizione sembra accomunare tutte le forme di vita a qualunque livello e appare, quindi, come la condizione di base, primaria, per avere la Vita stessa: la possibilità di un pianeta o di un satellite naturale di mantenere acqua liquida in superficie (la presenza di questo elemento sarebbe fondamentale per la Vita, anche per l'importante ruolo di solvente svolto in molte reazioni biochimiche (*Galletta & Sergi, 2005; Ortolani, 2012; [a]*). In astronomia e astrobiologia, zona abitabile circumstellare o CHZ, è il termine scientifico per indicare la regione intorno ad una stella dove vi sono le condizioni opportune per lo sviluppo e il mantenimento della Vita. "Zona Abitabile" o HZ (*habitable zone*) è usato, invece, più generalmente per indicare diverse regioni che sono considerate favorevoli alla vita all'interno della Galassia; per esse si preferisce usare: *Galactic Habitable Zone* (GHZ) (v. Cap. 2). La definizione *Goldilocks Planet* viene usata per ogni pianeta che si trova all'interno della zona abitabile circumstellare (CHZ). Il concetto di abitabilità è basato sulle condizioni favorevoli per la Vita per come noi la conosciamo sulla Terra, quindi, *abitabilità planetaria* implica che i pianeti abbiano certe similitudini con la Terra e che siano pianeti rocciosi. Sulla Terra l'acqua liquida, come accennato, è essenziale per tutte le forme di Vita conosciute; quindi i pianeti in grado di avere acqua liquida in superficie sono considerati tra i più favorevoli per ospitare vita extraterrestre<sup>23</sup> (*Galletta & Sergi, 2005; [a]*).

La CHZ del nostro Sistema Solare, che comprende, ovviamente, anche la Terra, si estende, a seconda degli autori a distanze differenti: una delle più citate è la stima di *Kasting et al. (1993)*, che pone la zona abitabile compresa da una estensione minima di 0,95 UA a una di 1,37 UA dal Sole (prima immagine in Fig. 1.18). Kasting per dare le sue stime usa un modello climatico unidimensionale e calcola la larghezza della zona abitabile (HZ) attorno al nostro Sole. Anche in questo caso, però, la premessa fondamentale per essere definiti "abitabili" è che i pianeti siano simili alla Terra, ad esempio con  $CO_2/H_2O/N_2$  in atmosfera e con la presenza di acqua allo stato liquido sulla superficie (oltre alle caratteristiche descritte nelle precedenti sezioni). I criteri che Kasting usa, nel suo modello, per definire i bordi (interno ed esterno) della CHZ del nostro Sistema Solare sono:

<sup>22</sup>Ci riferiamo sicuramente a vita animale aerobica mentre invece escludiamo l'ampio spettro delle forme di vita a livello di microorganismi.

<sup>23</sup>E' da notare, comunque, che studi recenti tendono a considerare buoni candidati per ospitare alcune forme di vita anche satelliti naturali come Europa, ricoperti di ghiacci in superficie, ma con possibilità di avere grandi oceani di acqua allo stato liquido nel sottosuolo. Non solo, anche la scoperta di *vita* vicino alle fumarole chiamate "*black smokers*" nelle profondità dei nostri oceani, apre nuovi orizzonti al concetto di "abitabilità" (*Galletta & Sergi, 2005*), richiedendo comunque sempre di specificare di che tipo di *vita* si tratti (*Galletta & Sergi, 2005*).

- Per il bordo interno viene considerata la perdita di acqua attraverso fotolisi e fuga di idrogeno. La fotolisi è un processo fotochimico per il quale una entità molecolare (nel nostro caso ci si riferisce alla molecola dell'acqua) subisce scissione mediante l'assorbimento di radiazione elettromagnetica, in genere nella parte ultravioletta dello spettro di luce. Il processo diretto è definito come l'interazione di un fotone con una molecola. In genere solo i fotoni abbastanza energetici, come gli UV, riescono a fornire sufficiente energia per la fotolisi diretta.
- Per il bordo esterno, invece, si considera la condizione per la formazione di nuvole di  $CO_2$ , che raffreddano la superficie di un pianeta aumentando la sua albedo, non essendo più distribuita in modo diffuso la  $CO_2$  in atmosfera (v. Effetto Serra).
- Stime conservative per queste distanze nel nostro Sistema Solare sono appunto 0.95 e 1.37 AU, rispettivamente (stime con dati aggiornati (*Kopparapu, Kasting et al., 2013*) sono 0.95-1.67 UA).

A questo punto è doveroso sottolineare un fatto: dalla Tab. 1.1 si vede che Venere (con 0.72 UA dal Sole) e Marte (con 1.52 UA dal Sole) sono assai vicini ai limiti, rispettivamente, inferiore e superiore, che Kasting, nel suo lavoro del 1993, usa per definire la CHZ del Sistema Solare; addirittura, Marte rientra pienamente nella zona di abitabilità in *Kopparapu, Kasting et al. (2013)*. Abbiamo, però, evidenziato che la condizione primaria perchè la Vita sorga e si sviluppi in un dato luogo, per come noi la conosciamo, è la presenza di acqua, quasi totalmente assente, ad esempio, su Marte, almeno al tempo presente; Marte non è un luogo idoneo per la Vita (almeno al tempo presente)! Appare così evidente che definire una zona "abitabile" così come fatto da Kasting, non è del tutto preciso; è necessario, quantomeno, implementare tale definizione con tutte quelle considerazioni esposte nelle sezioni precedenti e altre ancora che tratteremo a breve.

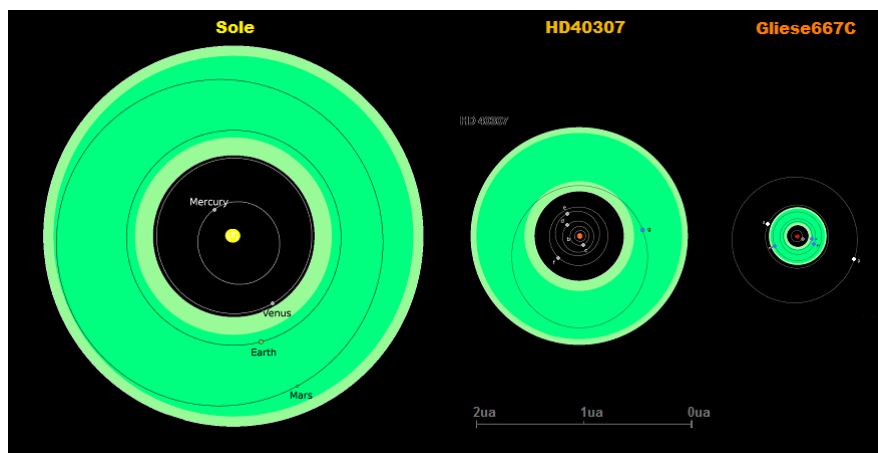


Figura 1.18: Confronto tra la zona abitabile del Sistema Solare (a sinistra) con quelle di altri sistemi planetari (in centro e a destra) (*Google Immagini*).

Essenzialmente, la maggior parte delle stime per le zone di abitabilità sono calcolate prendendo come riferimento la Terra, la sua massa e la sua costituzione atmosferica, anche se, si può notare, che un pianeta con un'atmosfera più densa di quella della Terra (perché più massiccio), come ad esempio *Gliese 667 Cd*, attorno a *Gliese 667C* (terza immagine in Fig. 1.18), in orbita nella sua zona abitabile, potrebbe teoricamente avere acqua allo stato liquido in superficie (v. Sez. 1.4.4) [l]. L'importanza della pressione, della temperatura e dell'orbita planetaria, per rendere un pianeta idoneo a sostenere la Vita, vengono descritte nella Sez. 1.4.3.

Quando parliamo di zone abitabili attorno ad altre stelle, dobbiamo cercare di capire come queste vengono definite.

## 1.4.2 Zone abitabili per altre stelle

I criteri usati da *Kasting et al. (1993-93(a))*, vengono adottati anche per stelle diverse dal Sole. *Kaltenegger et al., (2010)* e *Kopparapu et al. (2013)* aggiornano il database usato dagli autori precedenti, per costruire il loro modello climatico per stelle di sequenza principale di tipo spettrale F, G, K, M. Le due distanze limite ( $d$ ) della HZ (quello inferiore, denominato *water-loss* o *moist greenhouse* e quello superiore, denominato *maximum greenhouse*) vengono calcolati mediante:

$$d = 1UA \left( \frac{(L/L_{\odot})}{S_{eff}} \right)^{0.5} \quad (1.13)$$

dove  $L$  è la luminosità della stella considerata rapportata con quella del Sole  $L_{\odot}$ <sup>24</sup>. È stato introdotto un flusso  $S_{eff}$  effettivo che, nel caso del Sole, per  $S_{eff} = 1.05$  conduce ad un limite inferiore  $d = 0.99 AU$ , a cui il vapor d'acqua, nella stratosfera terrestre, cresce drammaticamente (più di un ordine di grandezza). L'altro limite, corrisponde ad un minimo del flusso effettivo  $S_{eff} = 0.325$  nel bilancio tra il flusso Solare incidente e quello riflesso, per un valore della pressione parziale di  $CO_2$  di circa 8 bar. Questo conduce ad una distanza  $d = 1.70 AU$ . Come si vede, i valori trovati sono in buon accordo con quelli di *Kasting et al. (1993)*, almeno per il limite inferiore, e in generale con quelli di *Kasting & Harman (2013)* (v. Fig. 1.19). Per le altre stelle, diverse dal Sole, il loro flusso effettivo è dato mediante uno sviluppo in serie:

$$S_{eff} = S_{eff\odot} + aT_{\star} + bT_{\star}^2 + cT_{\star}^3 + dT_{\star}^4 \quad (1.14)$$

con:

<sup>24</sup>Da  $d^2 S_{eff} = (1UA)^2 L/L_{\odot}$ , moltiplicando per  $4\pi$ , possiamo costruire una proporzionalità tra le grandezze del Sole e quelle della stella considerata, notando che  $S_{eff} = S_L/S_{\odot}$ . Si ottiene così che  $(1UA)^2 4\pi S_{\odot} : 4\pi d^2 S_L = L_{\odot} : L$ , dalla quale ricavo  $(1UA)^2 4\pi S_{\odot} L = 4\pi d^2 S_L L_{\odot}$  e semplifico il  $4\pi$ , isolo  $d^2$  come segue:  $d^2 = (1UA)^2 \frac{L}{L_{\odot}} \frac{S_{\odot}}{S_L}$ . Ponendo ambo i membri sotto radice quadrata e riconoscendo che il rapporto dei flussi è  $S_{eff}$ , si ottiene l'Eq. (1.13), una semplice formula che scala le distanze in base alla stella considerata rapportata ai parametri solari.

$$T_{\star} = T_{eff} - 5780 K \quad (1.15)$$

La Tab. 1.5 riporta la fascia di HZ per il sistema Solare (prima riga) includendo anche il limite *runaway greenhouse* che corrisponde al limite superiore del flusso effettivo per il quale gli oceani evaporano completamente. Le altre righe rappresentano i coefficienti con cui calcolare i flussi limite, corrispondenti alle diverse colonne, per tutte le stelle, di diverso tipo spettrale, con temperature  $T_{eff} = 2600 \div 7200 K$  (Kopparapu et al. , 2013).

Constant	Recent Venus	Runaway Greenhouse	Moist Greenhouse	Maximum Greenhouse	Early Mars
$S_{eff\odot}$	1.7753	1.0512	1.0140	0.3438	0.3179
$a$	$1.4316 \times 10^{-4}$	$1.3242 \times 10^{-4}$	$8.1774 \times 10^{-5}$	$5.8942 \times 10^{-5}$	$5.4513 \times 10^{-5}$
$b$	$2.9875 \times 10^{-9}$	$1.5418 \times 10^{-8}$	$1.7063 \times 10^{-9}$	$1.6558 \times 10^{-9}$	$1.5313 \times 10^{-9}$
$c$	$-7.5702 \times 10^{-12}$	$-7.9895 \times 10^{-12}$	$-4.3241 \times 10^{-12}$	$-3.0045 \times 10^{-12}$	$-2.7786 \times 10^{-12}$
$d$	$-1.1635 \times 10^{-15}$	$-1.8328 \times 10^{-15}$	$-6.6462 \times 10^{-16}$	$-5.2983 \times 10^{-16}$	$-4.8997 \times 10^{-16}$

Tabella 1.5: Coefficienti per calcolare flussi stellari normalizzati  $S_{eff}$  e le corrispondenti zone abitabili ricavate dalla Eq. 1.13 (per stelle con  $2600 < T_{eff} < 7200 K$ ) (Kopparapu et al., 2013).

La Fig. 1.19 (Kasting & Harman, 2013) rappresenta in modo visivo la tabella precedente.

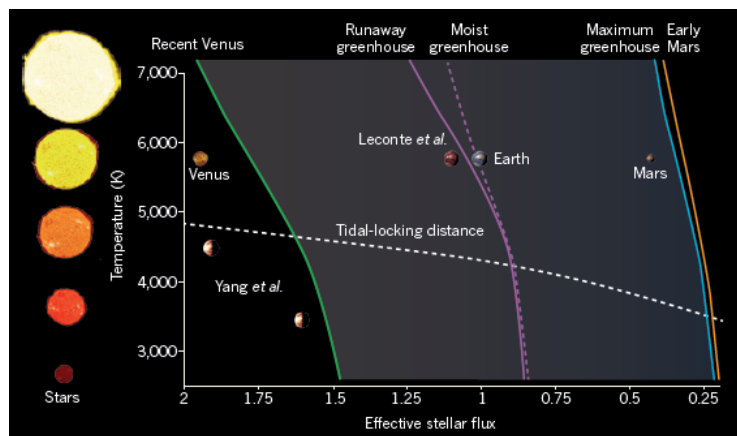


Figura 1.19: Zona Abitabile per stelle con diversa temperatura superficiale (Kasting & Harman, 2013).

Kaltenegger et al. (2010) utilizzano per  $S_{eff}$  i valori di 1.90, 1.41, 1.05 e 1.05, rispettivamente per stelle di tipo F, G, K e M, per il bordo interno della HZ e 0.46, 0.36, 0.27 e 0.27, sempre per gli stessi tipi stellari, rispettivamente, ma per il bordo esterno della HZ. Dalla Fig. 1.20, si nota come, al variare della stella (massa e tipo spettrale), la zona di abitabilità definisce una striscia verde brillante proporzionale

alla distanza della stella (il parallelogramma verde chiaro, invece, evidenzia le zone di ricerca dei pianeti della missione Kepler). Come esempio, si noti che dall'intersezione di una stella di tipo G, con  $S_{eff} = 1.41$  e  $0.36$ , rispettivamente, per il calcolo del bordo esterno ed interno della HZ, con una  $M = 1M_{\odot}$  (in ordinata) e una distanza di  $1 \text{ UA}$  (in ascissa), si ricava un punto blu proprio nel centro della strisce verde brillante: questi sono i parametri per una situazione simile a quella della Terra. Per una stella di tipo M (con  $S_{eff} = 1.05$  e  $0.27$ , rispettivamente per il calcolo del bordo interno ed esterno), con una temperatura solitamente di circa  $T_{eff} \leq 3500 \text{ K}$ , una massa compresa tra  $0.4-0.08 M_{\odot}$ , e una luminosità assai inferiore rispetto a quella del Sole, si vede che l'intersione per trovare un punto blu che stia nella zona abitabile, deve scendere e spostarsi verso sinistra (diminuendo, inoltre il periodo orbitale del pianeta stesso, linea in alto nella Fig. 1.20). Si vede, cioè, che un pianeta per orbitare nella zona abitabile di una stella così descritta si deve trovare assai vicino alla stella stessa; se prendiamo, infatti, *Gliese 667C*, una nana rossa di classe spettrale M2-V che ha il 38% della massa del Sole, un quinto del suo diametro e appena lo 0,3% della luminosità solare ( $0.03L_{\odot}$ ), possiamo ricavare, dall' Eq. 1.13, che i limiti della zona abitabile della stella (esterno ed interno) sono:

- $d_{int} = \sqrt{(L/L_{\odot})/S_{eff-int}} \text{UA} \simeq \sqrt{0.03/1.05} \text{UA} \simeq 0.17 \text{UA}$
- $d_{out} = \sqrt{(L/L_{\odot})/S_{eff-out}} \text{UA} \simeq \sqrt{0.03/0.27} \text{UA} \simeq 0.33 \text{UA}$

(v. anche la terza immagine di Fig. 1.18). Di seguito riportiamo come confronto i valori dei pianeti previsti per *Gliese 667C* (v. Tab. 1.6) dove alcuni dei loro semiassi maggiori sono vicini a quelli ricavati dal nostro calcolo precedente<sup>25</sup>.

<sup>25</sup>Nel 2013 sono stati confermati i pianeti *d*, *e* e *f*, inoltre, è stato scoperto un pianeta più esterno, *Gliese 667 Cg*, la cui presenza, anche se ancora non confermata, appare probabile. Il segnale di un altro pianeta, *Gliese 667 Ch*, che orbita invece più internamente, rimane incerto. Tutti sono delle Super-Terre, e *Gliese Ce* e *Gliese Cf*, assieme al già noto *Gliese Cc*, sono stati inseriti nella ristretta lista dei pianeti abitabili del *Planetary Habitability Laboratory (PHL)*, considerati all'interno della zona abitabile della stella madre [a].

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

Tabella 1.6: Dati dei pianeti possibili (b-g) orbitanti attorno a *Gliese 667C* (Anglada, 2013; [a]).

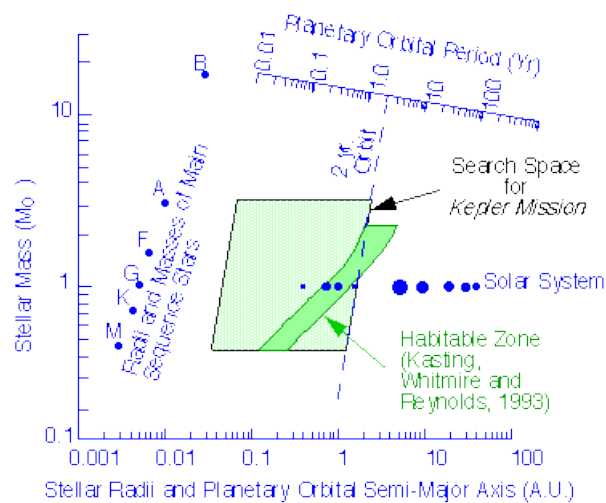


Figura 1.20: Estensione della HZ (in verde), per stelle di diversi tipi spettrali (pallini blu a sinistra, stelle in sequenza principale); si riportano i pianeti del Sistema Solare (pallini blu in orizzontale), la zona di ricerca della missione Kepler (scritta in nero) e il periodo orbitale dei pianeti nella parte superiore del grafico, in anni. L'asse x riporta le distanze dalle stelle in UA, l'asse y la massa delle stelle in  $M_{\odot}$  (Kaltenegger et al., 2010; [r]).

Esplicitiamo in modo visivo quanto detto fino ad ora: in Fig.1.21, in alto, riportiamo la zona abitabile del Sistema Solare (0.95-1.37 UA da *Kasting et al., 1993*) in funzione della distanza dal Sole in ascissa, posizionando Venere, Terra e Marte come



riferimento (dai dati in Tab. 1.1) e la confrontiamo con quella, da noi precedentemente calcolata (0.17-0.33 UA) (immagine centrale) relativa a una stella "M" (come ad esempio Gliese 667C) mantenendo sempre gli stessi i pianeti come riferimento; in tal modo è ancora più evidente come la CHZ di una stella di tipo "M" appaia molto più vicina alla stella stessa; inoltre, l'immagine in basso della Fig. 1.21 rappresenta artisticamente l'ingrandimento della CHZ in verde della stella tipo M, immaginando che essa sia Gliese 667C (*Goole Immagini*); ciò rende possibile rappresentare i suoi pianeti (v. Tab. 1.6).

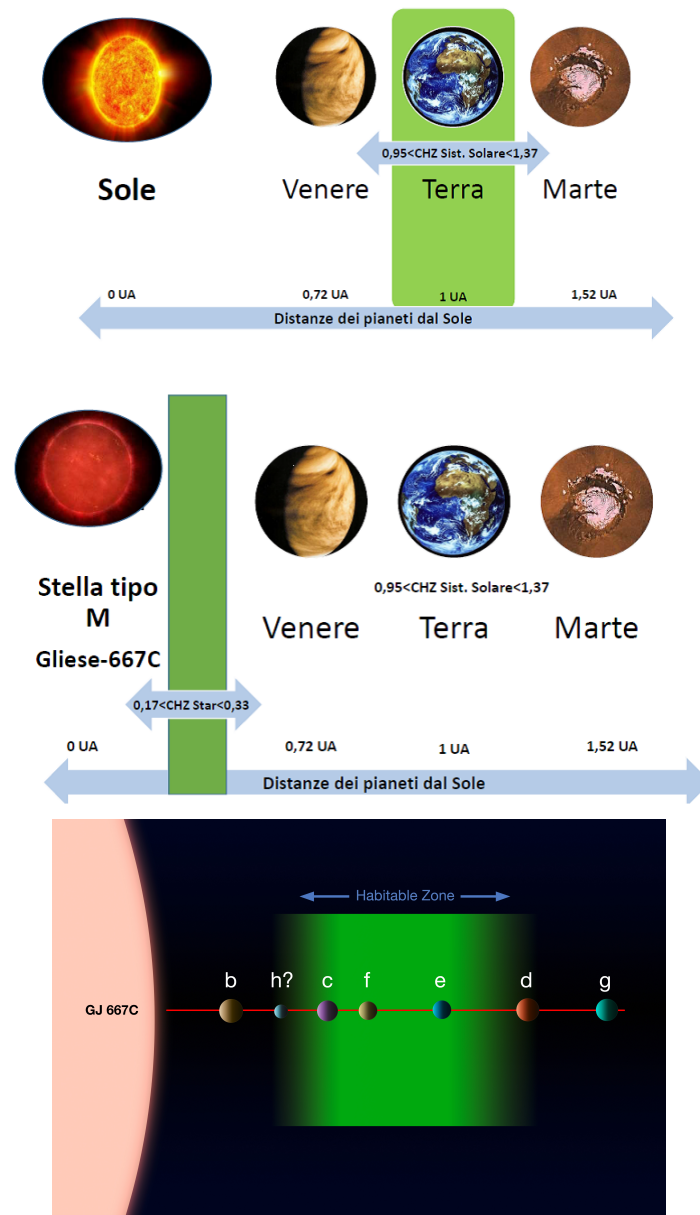


Figura 1.21: Confronto visivo con la CHZ del Sistema Solare (in alto) (0.95-1.37 UA da *Kasting et al., 1993*) con quella di una stella tipo M (in centro) (0.17-0.33 UA), lasciando in entrambe le immagini Venere, Terra e Marte come riferimento (v. Tab 1.1); la CHZ della stella M è molto più vicina alla stella stessa. L'immagine in basso rappresenta artisticamente l'ingrandimento della CHZ in verde della stella tipo M, immaginando che essa sia Gliese 667C (*Goole Immagini*); ciò rende possibile rappresentare i suoi pianeti (v. Tab. 1.6).

Come curiosità, per concludere questa sezione, ricordiamo che nel 1959 i fisici *Philip Morrison* e *Giuseppe Cocconi* descrissero la zona circumstellare abitabile in una ricerca del SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*) e due anni dopo, *Frank Drake*, rese popolare tale concetto grazie ad una equazione che porta il suo nome la quale viene utilizzata per stimare il numero di civiltà extraterrestri esistenti in grado di comunicare nella nostra galassia:

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L \quad (1.16)$$

dove  $N$  è il numero di civiltà extraterrestri presenti oggi nella nostra galassia con le quali si può pensare di stabilire una comunicazione,  $R^*$  è il tasso medio annuo con cui si formano nuove stelle nella Via Lattea,  $f_p$  è la frazione di stelle che possiedono pianeti,  $n_e$  è il numero medio di pianeti per sistema planetario in condizione di ospitare forme di vita,  $f_l$  è la frazione dei pianeti  $n_e$  su cui si è effettivamente sviluppata la vita,  $f_i$  è la frazione dei pianeti  $f_l$  su cui si sono evoluti esseri intelligenti,  $f_c$  è la frazione di civiltà extraterrestri in grado di comunicare,  $L$  è la stima della durata di queste civiltà evolute. Va sottolineato, comunque, che questa formula ha più un valore "storico" che scientifico, vista la nostra scarsa conoscenza di molti dei suoi fattori.

### 1.4.3 Condizioni su Pressione, Temperatura e orbita planetaria

Data l'importanza dell'acqua per il concetto di abitabilità, vediamo quali sono le caratteristiche orbitali, di pressione e temperatura che un pianeta deve avere per poterla mantenere allo stato liquido in superficie. Da dove possa, invece, provenire l'acqua della Terra, verrà trattato nella Sez. 3.3.

Un pianeta deve avere una massa sufficiente per creare una gravità idonea a trattenere l'atmosfera e a mantenere l'acqua allo stato liquido nella sua superficie; nonchè un'orbita stabile. Se la gravità è troppo bassa, allora il pianeta avrà meno probabilità di mantenere una pressione atmosferica sufficiente e l'acqua sublimerebbe e raggiungerebbe la velocità di fuga perdendosi nello spazio, come probabilmente è successo nel caso di Marte. Se la gravità fosse troppo alta potrebbe invece comprimere l'acqua al punto di rimanere allo stato solido, per un largo range di temperatura. Le fasi di aggregazione della materia, in funzione della temperatura e della pressione, vengono rappresentate nel *diagramma delle fasi*. In Fig. 1.22 si rappresenta un tipico diagramma di fase dove si evidenzia il punto triplo, luogo in cui la materia coesiste nella fase solida, gassosa e liquida, per dato valore di temperatura e pressione, e il punto critico, luogo oltre il quale una miscela bifase gas-liquido diviene un fluido supercritico, cioè, a data temperatura e pressione critica, questo fluido si comporta in parte come gas e in parte come liquido.

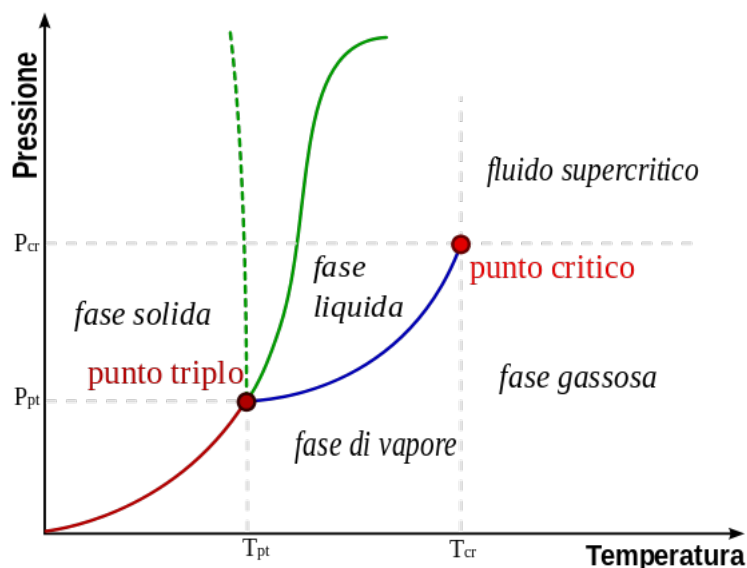


Figura 1.22: Il punto triplo e il punto critico. Il punto triplo rappresenta un particolare stato termodinamico determinato dai valori di temperatura e pressione in cui coesistono in condizioni di equilibrio fra loro tre fasi di aggregazione di una sostanza; il punto critico di una sostanza, invece, è l'insieme di particolari condizioni di massima temperatura e massima pressione (dette temperatura critica e pressione critica) in corrispondenza delle quali una sostanza può esistere come miscela bifase gas-liquido. Quando durante il riscaldamento una miscela bifase gas-liquido giunge alla temperatura critica si nota visivamente la scomparsa del cosiddetto "menisco", che costituisce l'interfaccia di separazione tra la fase liquida e la fase gassosa. Oltre tale punto non si parla più di gas e liquido, bensì di fluido supercritico [v1; a].

Quando poi applichiamo il diagramma delle fasi all'acqua (Fig. 1.23), la condizione di abitabilità comporta che la temperatura e la pressione medie di un pianeta comprendano nei loro range il punto triplo.

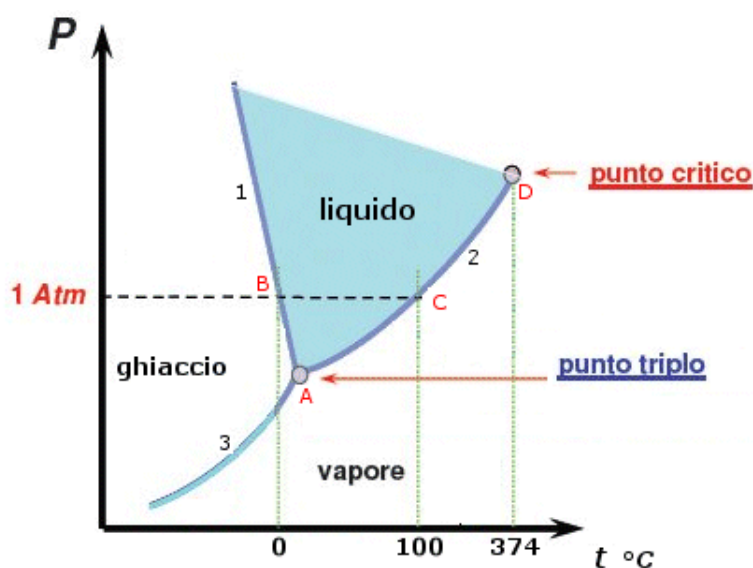


Figura 1.23: Diagramma delle fasi dell'acqua [v].

Descriviamo brevemente la Fig. 1.23 [v]:

- Curva 1: evidenzia le condizioni di pressione e temperatura in corrispondenza delle quali il solido si trova in un punto di equilibrio con il liquido. La curva mostra la variazione della temperatura di fusione del ghiaccio al variare della pressione. Va evidenziato che la maggior parte delle sostanze esibiscono una pendenza positiva della curva, mentre, nel caso dell'acqua si ha una pendenza negativa. Tale pendenza implica che, all'aumentare della pressione, la temperatura di fusione dell'acqua si abbassa e ciò è dovuta al fatto che l'acqua, al contrario della gran parte delle altre sostanze liquide, quando congela aumenta di volume.
- Curva 2: mostra le condizioni di pressione e temperatura in corrispondenza delle quali il liquido si trova in equilibrio con il proprio vapore.
- Curva 3: mostra le condizioni di pressione e di temperatura in corrispondenza delle quali il solido si trova in equilibrio con il proprio vapore.
- Punto A: prende il nome di punto triplo (come descritto in Fig. 1.22) in quanto coesistono la fase solida, la fase liquida e la fase gassosa in equilibrio dinamico. Il punto triplo, come detto, è caratterizzato da un unico valore di temperatura e pressione che per l'acqua sono rispettivamente  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $4.58\text{ mm Hg}$ . In tale punto la tensione di vapore del solido è uguale alla tensione di vapore del liquido. Poiché il punto triplo è il punto più basso della regione in cui una sostanza esiste allo stato liquido, esso segna la pressione al di sotto della quale una sostanza non può esistere allo stato liquido, qualunque sia la sua temperatura<sup>26</sup>.
- Punto B: rappresenta il normale punto di fusione del ghiaccio.
- Punto C: rappresenta il normale punto di ebollizione dell'acqua, essendo l'intersezione della curva 1 e 2 con l'ordinata di 1 atmosfera.
- Il punto D, come descritto nella Fig. 1.22, rappresenta il punto critico dell'acqua ( $374\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $218\text{ atm}$ ), oltre il quale non può esistere l'equilibrio liquido-vapore, in quanto oltre la pressione critica l'acqua esiste solo allo stato gassoso (fluido supercritico).

L'atmosfera è la responsabile principale per la regolazione della temperatura di un pianeta, contribuendo all'effetto serra e all'albedo che sono i fattori che determinano il riscaldamento e il raffreddamento di un pianeta, come discusso nelle precedenti sezioni; se nel primo caso l'esempio più evidente è Venere con temperature medie superficiali elevatissime a causa di un potente effetto serra, un altrettanto evidente raffreddamento si pensa si sia verificato sul nostro pianeta durante l'epoca della

---

<sup>26</sup>Ad esempio, se in una fredda e asciutta mattinata d'inverno la pressione parziale di vapore è inferiore a  $4,6\text{ mm di Hg}$  e la temperatura scende sotto  $0,01^{\circ}\text{C}$  il vapore può trasformarsi direttamente in ghiaccio (brina) senza passare allo stato liquido.

*Terra a Palla di Neve*; (Galletta & Sergi, 2005; Ortolani, 2012; [a])<sup>27</sup>. Essendo l'orbita della Terra e degli altri pianeti del Sistema Solare pressoché circolare, la temperatura può rimanere mediamente stabile, in prossimità del punto triplo dell'acqua. L'orbita è generalmente nota anche nel caso degli esopianeti, tuttavia molti dei pianeti scoperti sembrano avere orbite eccentriche, che talvolta li porta ad "entrare" e "uscire" dalla zona abitabile durante la rivoluzione attorno alla stella madre (v. Eq. 1.13) [l]. Un esempio in tal senso è *16 Cygni Bb*. La conseguente instabilità termica porta a cicli di sublimazione e di deposito dell'acqua estremamente lunghi, con la conseguenza che la presenza dell'acqua potrebbe essere instabile e transitoria.

Si è anche appena visto che le stelle più piccole del Sole hanno zone abitabili molto più vicine alla stella stessa e i pianeti orbitanti attorno a quest'ultime, per rimanere dentro le loro zone abitabili, sono sottoposti a forze mareali che potrebbero rimuovere l'inclinazione assiale, con la conseguente mancanza delle stagioni. Inoltre, le forze mareali potrebbero indurre un pianeta alla rotazione sincrona, con la conseguenza che un emisfero sarebbe sempre all'ombra e uno sempre alla luce della stella, con un grosso squilibrio di temperatura da un emisfero ad un altro.

#### 1.4.4 Evoluzione Stellare: variazione della CHZ.

Nel corso della vita di una stella la zona abitabile può cambiare la sua locazione. L'evoluzione stellare può essere la causa di un grande cambiamento climatico in un periodo di milioni di anni e un pianeta potrebbe non ritrovarsi più dentro la zona abitabile con il passare del tempo. La *vita* della zona abitabile dipende dal tipo di stella madre: la Terra, ad esempio, uscirà dalla zona abitabile quando il Sole inizierà ad evolversi verso la fase di gigante rossa, tra circa 4-5 Gyr (Chiosi, 2012). Le zone abitabili possono rimanere stabili per molto più tempo attorno a stelle di piccola massa, e nel caso delle nane rosse, la zona abitabile può rimanere stabile per svariati miliardi di anni<sup>28</sup>.

E' anche vero però, che mantenere una grande quantità d'acqua in forma liquida è una condizione "difficile", che dipende, come visto, da una combinazione di molti fattori diversi. Alcuni studi ipotizzano di trovare forme di vita su pianeti anche con caratteristiche diverse dalla Terra [e]. Riportimo brevemente alcuni esempi.

<sup>27</sup>L'espressione "Terra a palla di neve" (*Snowball Earth*) fa riferimento ad una teoria scientifica secondo cui il nostro pianeta in epoche molto remote (proterozoico) avrebbe attraversato dei periodi di abbassamento drastico della temperatura durante i quali la superficie della Terra fu quasi completamente ricoperta di ghiaccio [a].

<sup>28</sup>Le stelle con masse comprese tra 0,08 e 0,8 masse solari, le *nane rosse*, si riscaldano mano a mano che l'idrogeno viene consumato al loro interno, accelerando la velocità delle reazioni nucleari e divenendo per breve tempo delle stelle azzurre; quando tutto l'idrogeno negli strati interni è stato convertito in elio, esse si contraggono gradualmente, diminuendo di luminosità ed evolvendo in nane bianche costituite prevalentemente da elio. Tuttavia, poiché la durata della sequenza principale, per una stella di questo tipo, è stata stimata sugli 80 miliardi e l'attuale età dell'universo si aggira sui 13,7 miliardi di anni, pare logico dedurre che nessuna nana rossa abbia ancora avuto il tempo di giungere al termine della sequenza principale (Chiosi, 2012; [a]).

Un pianeta senza la presenza di oceani, ma ricoperto da vasti deserti asciutti, potrebbe permettersi di ospitare forme di vita in una zona abitabile molto più ampia rispetto a quella di un pianeta con molta acqua. Infatti, se c'è meno acqua vuol dire che:

- Se il pianeta è molto distante dal suo sole ci sarà anche meno neve e ghiaccio, rispetto al caso in cui ci fosse più acqua, pertanto una minor superficie del pianeta sarà bianca o molto chiara e quindi i raggi solari saranno riflessi verso lo spazio in una percentuale molto inferiore; ciò causerebbe un aumento della temperatura del pianeta permettendo di avere temperature più alte e, forse, appropriate alla vita, anche molto oltre l'orbita terrestre.
- Se il pianeta è vicino al suo sole, ci sarà meno acqua sotto forma di vapore presente in atmosfera e quindi si avrà un effetto serra più limitato, rispetto al caso in cui ci fosse più acqua; questo permetterebbe di avere temperature più basse e appropriate alla vita anche a distanze ridotte rispetto all'orbita terrestre  $[a]$ .

Ricordiamo comunque che si deve sempre definire il livello di *sviluppo della vita* a cui si fa riferimento.

### 1.4.5 Esopianeti e Missioni Spaziali

Un pianeta extrasolare o esopianeta è un pianeta non appartenente al Sistema Solare, orbitante cioè attorno a una stella diversa dal Sole. Al 26 gennaio 2016 risultano conosciuti 2052 pianeti extrasolari in 1300 sistemi planetari diversi e 200 altri pianeti in attesa di conferma o controversi (*Jean Schneider, Interactive Extra-solar Planets Catalog, in The Extrasolar Planets Encyclopedia*). Il traguardo simbolico del 1000° pianeta conosciuto è stato raggiunto il 22 ottobre 2013, con l'annuncio di 11 pianeti *gioviani caldi* da parte del progetto *SuperWASP*. Il 2000° pianeta confermato è *Kepler-406 b*: è stato scoperto nel 2014 e confermato il 25 novembre 2015 nell'ambito della missione *Kepler*<sup>29</sup> con il metodo del transito<sup>30</sup>  $[a]$ . La scoperta della maggior parte degli esopianeti è resa possibile da metodi di osservazione indiretta piuttosto che da osservazioni al telescopio  $[l]$ . A causa dei limiti delle tecniche di osservazione attuali, la maggior parte dei pianeti individuati sono *giganti gassosi*

<sup>29</sup>La missione Kepler è una missione spaziale della NASA parte del programma Discovery, il cui scopo è la ricerca e conferma di pianeti simili alla Terra in orbita attorno a stelle diverse dal Sole, tramite l'utilizzo del telescopio spaziale Kepler. Il veicolo spaziale, chiamato in onore dell'astronomo tedesco del diciassettesimo secolo Johannes Kepler, è stato lanciato il 7 marzo 2009.

<sup>30</sup>Il metodo del transito consiste nella rilevazione della diminuzione di luminosità della curva di luce di una stella quando un pianeta transita di fronte alla stella madre. La diminuzione è correlata alla dimensione della stella madre, del pianeta e della sua orbita. Si tratta di un metodo fotometrico che funziona solo per la piccola percentuale di pianeti la cui orbita è perfettamente allineata con la nostra linea di vista, però può essere utilizzato fino a grandi distanze (*Ortolani, 2012; Marzari, 2012*).

come Giove e, solo in misura minore, pianeti rocciosi massivi del tipo *Super Terra*, anche se ultimamente la frazione di pianeti più piccoli sta notevolmente crescendo, soprattutto grazie alla missione Kepler [l]. Gli esopianeti conosciuti appartengono a sistemi planetari che orbitano attorno a una stella. Esistono, tuttavia, numerose osservazioni (però non confermate) di oggetti di massa planetaria non legati a vincoli gravitazionali con alcuna stella (cosiddetti pianeti interstellari): tali corpi celesti non sono definibili come "pianeti" secondo l'attuale definizione dell'*Unione Astronomica Internazionale* [m]<sup>31</sup>.

La possibilità di avere sistemi planetari attorno a stelle simili al Sole è valutata in modo molto diverso dai diversi autori: molti astronomi ritengono che questa sia la norma, mentre altri stimano che solo il 10% delle stelle di tipo solare posseggano un sistema planetario (*Marcy et al., 2005*).

Spesso la ricerca di esopianeti coincide con la ricerca di mondi in grado di ospitare una forma di vita extraterrestre. Ad oggi, *Kepler-22 b*, ruotante attorno ad una nana gialla, *Kepler-22*, distante approssimativamente 600 anni luce dal Sistema Solare, sembra essere uno dei migliori esempi di esopianeta di tipo terrestre (classificato tra le Super Terre, con un raggio 2,4 volte quello terrestre) orbitante nella zona abitabile del proprio sistema; esso avrebbe infatti una temperatura superficiale media di circa 22 °C, il che consentirebbe la presenza di acqua allo stato liquido, presupposto per la presenza di vita (*The Habitable Exoplanet Catalogue, 2015; [d]*). In Fig. 1.24, vediamo, artisticamente, in verde, la zona abitabile del sistema *Kepler-22* rapportata con quella del Sistema Solare.

Tra gli altri progetti che tra i loro obiettivi hanno anche la ricerca di pianeti extrasolari ricordiamo: l'*Automated Planet Finder* (telescopio progettato per la ricerca di pianeti extrasolari di massa compresa tra 5 e 20 volte quella della Terra, entrato pienamente in funzione a gennaio 2014) e *Gaia* (satellite lanciato nell'agosto 2013: compilerà un catalogo di circa un miliardo di stelle fino alla magnitudine 20. Quest'analisi fornirà dati fondamentali per risolvere problemi sull'origine, la struttura e la storia evolutiva della Galassia. Un gran numero di quasar, pianeti extrasolari e oggetti del Sistema Solare saranno misurati nel contempo). I pianeti situati nella zona abitabile sono di interesse fondamentale per i ricercatori che si interessano di vita extraterrestre intelligente o di individuare mondi, in futuro, abitabili dalla razza umana. Ricordiamo, infatti, che nell'equazione di *Drake*, precedentemente citata, avente lo scopo di stimare le probabilità di vita intelligente extraterrestre, è presente un fattore ( $n_e$ ) non direttamente quantificabile, che indica il numero medio di pianeti abitabili in un dato sistema stellare. La scoperta di pianeti extrasolari nella loro zona abitabile aiuterebbe a perfezionare le stime di questo valore. Una

---

<sup>31</sup>Un pianeta è un corpo celeste che orbita attorno ad una stella, ma che, a differenza di questa, non produce energia tramite fusione nucleare, e la cui massa è sufficiente a conferirgli una forma sferoidale, laddove la propria dominanza gravitazionale gli permette di mantenere libera la sua fascia orbitale da altri corpi di dimensioni comparabili o superiori.



stima molto bassa contribuirebbe a rafforzare l'ipotesi della rarità della Terra, cioè che solo una serie di eventi estremamente improbabili e in condizioni particolari, ha portato alla nascita della vita sul nostro pianeta. Una stima alta del fattore ( $n_e$ ) rafforzerebbe invece il principio di *mediocrità copernicano*, che afferma che *la Terra non è affatto speciale ed è un pianeta comune nell'universo [a]*. Un altro famoso programma di ricerca per il quale le zone abitabili rivestono notevole importanza è SETI, a cui abbiamo già accennato. Infatti, la ricerca o l'invio di segnali provenienti da civiltà aliene extraterrestri è più probabile per pianeti collocati in questa fascia. L'*Allen Telescope Array* (in California) è utilizzato dal SETI Institute per la ricerca di segnali utilizzando un elenco di pianeti candidati indicati dalla missione Kepler. Per concludere questa sezione vediamo un esempio degno di nota: la nana rossa *Gliese 581* ha un sistema con almeno tre Super-Terre confermate e due in attesa di conferma; mentre il terzo pianeta, *Gliese 581 c*, pare troppo vicino alla stella dalla quale riceve lo stesso calore di Venere, *Gliese 581 d* si trova sul bordo esterno della sua zona abitabile e dovrebbe essere in posizione analoga a quella di Marte nel Sistema Solare. Tuttavia, mentre Marte ha una piccola massa che non è stata in grado di mantenere una sufficiente atmosfera, *Gliese 581 d* ha una massa tale ( $5,6 M_{\oplus}$ ) da trattenere una spessa atmosfera e generare un forte effetto serra, in grado di intrappolare il calore in superficie. Inoltre, la fredda *Gliese 581* irradia soprattutto nell'infrarosso, radiazione che può attraversare facilmente anche una spessa coltre di nubi. *Gliese 581 g*, nonostante non sia stato confermato, è più interno al pianeta d e ben dentro alla zona abitabile della stella ed è tra quelli che potrebbero avere le condizioni in superficie più simili a quelle terrestri. Nel caso dei pianeti di *Gliese 581*, il problema è piuttosto comune a tutti i pianeti situati nella zona abitabile di una nana rossa: la rotazione sincrona<sup>32</sup> dovuta alla vicinanza dalla stella, induce il pianeta a volgere sempre lo stesso emisfero alla stella stessa, con conseguente squilibrio termico tra i due emisferi [l; a].

---

<sup>32</sup>Un corpo orbitante si dice in rotazione sincrona quando il suo periodo di rotazione è uguale al suo periodo di rivoluzione. Come effetto della rotazione sincrona, il corpo orbitante mostra sempre la stessa faccia al corpo attorno al quale orbita.



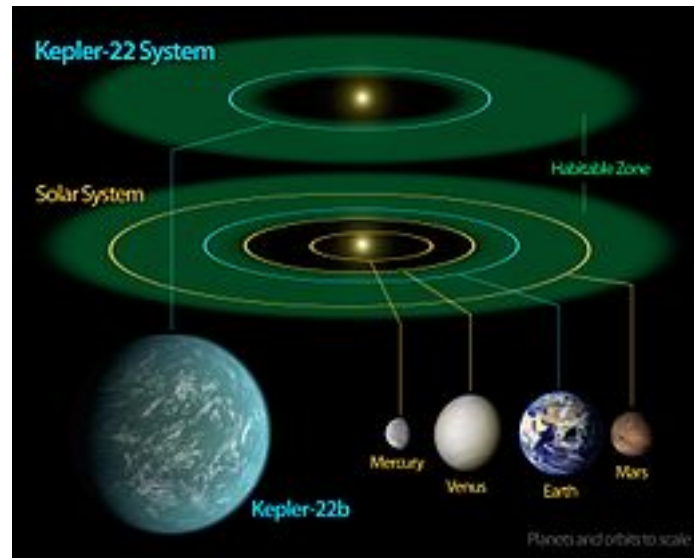


Figura 1.24: Confronto tra la CHZ di *Kepler-22* e la CHZ del Sistema Solare (*Google Immagini*).

## 1.5 Conclusioni su Abitabilità e CHZ

Abbiamo cercato di capire, in questo primo capitolo, il concetto di *abitabilità* e di *zona abitabile* attorno ad una stella. Si è capito che per discutere di tali argomenti dobbiamo definire il livello di evoluzione della vita che si va a considerare; in particolar modo abbiamo preso in esame il percorso evolutivo della Vita come noi la conosciamo nel nostro pianeta. I vincoli per definire una zona abitabile attorno ad una stella sono molti e relativamente stringenti; di seguito ne diamo un elenco sintetico:

- **Caratteristiche della Stella Madre:** la stella deve avere un flusso di radiazione costante ed idoneo per garantire, a seconda della distanza del pianeta, un irraggiamento equilibrato sulla superficie del pianeta stesso (v. Eq. 1.13) e la presenza dell'acqua allo stato liquido; non deve, cioè, essere in una fase evolutiva caratterizzata da bruschi cambiamenti della sua luminosità. Il nostro Sole, ad esempio, rimarrà nella Sequenza Principale per ancora circa 4-5 Gyr, garantendo ai suoi pianeti, e specialmente alla Terra, un'insolazione costante.
- **Caratteristiche del Pianeta:** il pianeta considerato, oltre ad avere una distanza dalla sua stella che gli garantisca l'acqua allo stato liquido, deve avere una dimensione e una massa tale da esercitare una gravità sufficiente a trattenere la sua atmosfera (v. Eq. 1.10), la quale ha l'importante funzione di regolatore termico e di scudo protettivo dalle radiazioni cosmiche, che potrebbero essere pericolose per la sopravvivenza delle possibili forme di vita presenti. Appare importante, inoltre, che il pianeta sia attivo geologicamente, che abbia, cioè, una *tettonica a placche* tale da equilibrare i gas in atmosfera (che potrebbero

essere diversamente dispersi nello spazio dal vento solare), con il meccanismo della *subduzione* e dell'eruzione vulcanica.

- **Satelliti Naturali:** il nostro satellite naturale, la Luna, ha dimensioni e distanze tali da garantire alla Terra una certa stabilità dinamica, sinonimo di stabilità climatica, impedendo brusche escursioni all'inclinazione dell'asse di rotazione del nostro pianeta, assicurando la ciclicità delle stagioni, fattore indispensabile alla vita. Come abbiamo visto, ad esempio, i satelliti di Marte non riescono a fornire tale stabilità. Non solo, l'orbita circolare nel moto di rivoluzione e la costante inclinazione dell'asse di rotazione, almeno per lunghi periodi di tempo, mantengono relativamente costante il flusso di insolazione, impedendo lo scioglimento delle calotte polari, evitando in tal modo drastiche variazioni dell'albedo.
- **Il Campo Magnetico:** il campo geomagnetico è un altro importante scudo che protegge il pianeta dalle radiazioni letali cosmiche, garantendo lo sviluppo della Vita nel nostro pianeta. Anche questo aspetto è intimamente legato all'attività interna del pianeta<sup>33</sup>.

Nei prossimi capitoli "estenderemo" la definizione di abitabilità nella nostra galassia e nell'universo, analizzando altri importanti vincoli per comprendere meglio lo straordinario evento dell'apparizione della Vita, il suo sviluppo e la sua sopravvivenza.

---

<sup>33</sup>Un altro aspetto che non trattiamo qui esplicitamente, ma che è bene ricordare, è la presenza di *giganti buoni*, cioè di grandi pianeti gassosi (come Giove) che ripuliscono, con il loro effetto gravitazionale, la zona di spazio vicino alla Terra, attirando verso di essi oggetti (come comete e asteroidi) che potrebbero impattare sul pianeta; oggi tali impatti sarebbero disastrosi per la Vita nel nostro pianeta, anche se forse in passato avrebbero potuto portare l'acqua sulla Terra (v. Sez. 3.3). A tal proposito si ricorda l'impatto su Giove della cometa Shoemaker-Levy 9 (*Fecchio, 2011*).

# Capitolo 2

## La GHZ

In questo capitolo cercheremo di comprendere come definire la *zona di abitabilità galattica* (GHZ) e quali siano i vincoli per delimitarla. In special modo, studieremo i lavori di *Lineweaver (2004)* e di *Prantzos (2006)*. Tratteremo, poi, da *De Biasi (2010 e 2014)* e da *De Biasi et al. (2015)*, altri aspetti importanti per comprendere il concetto di abitabilità nella Galassia come, ad esempio, la marea Galattica con il suo effetto perturbativo sulle orbite delle comete della Nube di Oort del nostro Sistema Solare e sistemi analoghi. Tale Nube segna, infatti, la transizione tra il punto di vista *locale*, quindi la CHZ, e quello *Galattico*, cioè la GHZ.

### 2.1 Definizione di GHZ

L' idoneità di un ambiente planetario per la vita dipende da una serie di fattori, alcuni sono intrinseci al pianeta, altri alla stella che regge il sistema planetario e altri ancora coinvolgono l'ambiente galattico circostante. Possiamo quindi focalizzare due richieste diverse per l'abitabilità: una su scala planetaria, vista nel capitolo precedente, un'altra su scala Galattica, comprendente una varietà di effetti della nostra galassia sull'ambiente del pianeta. Per definire la GHZ dobbiamo prendere in considerazione diversi fattori su scala-Galattica, compresi quelli che sono rilevanti per la formazione di pianeti, come la pendenza del gradiente radiale di metallicità<sup>1</sup> nel disco ed inoltre gli eventi che potrebbero minacciare una biosfera esistente, come ad esempio la vicinanza a supernovae e/o *gamma ray bursts*. Molti sforzi sono stati fatti per identificare e correlare i differenti fattori Galattici che possono influenzare lo sviluppo della vita (*Gonzalez et al., 2001, Gowanlock et al., 2011, Lineweaver et al., 2004*). La sintesi più esaustiva è fatta nel lavoro di *Lineweaver et al. (2004)*. In questo studio un modello dell'evoluzione della Galassia (*Fenner & Gibson, 2003*) è stato combinato con i vincoli di metallicità derivati dai dati dei pianeti extrasolari

---

<sup>1</sup>Tutti gli elementi più pesanti dell'elio sono definiti come metalli. Nella Galassia, la metallicità è più alta nel centro e più bassa all'esterno, questo perché verso il centro della Galassia ci sono molte più stelle, che durante la loro evoluzione, grazie a vari meccanismi, ricedono più metalli al mezzo interstellare.

(*Lineweaver, 2001*) per definire le dimensioni della GHZ in funzione dell'età della Galassia e della distanza dal centro Galattico. È importante sottolineare che la GHZ vincola in metallicità il raggio Galattico a cui una stella potrà alloggiare pianeti simili alla Terra, indipendentemente dal momento di abbandono di quella posizione nella GHZ, dopo la formazione dei pianeti stessi. In *Lineweaver et al. (2004)* quattro prerequisiti per la vita complessa sono stati identificati e quantificati da una probabilità:

1. La presenza di una stella ospite: il modo più conveniente per descrivere la distribuzione delle stelle è quello di utilizzare la *rate* di formazione stellare (SFR) in funzione dello spazio e del tempo per dedurre poi quante stelle sono disponibili per ospitare un sistema planetario;
2. Una quantità sufficiente di elementi pesanti per formare pianeti terrestri: ci sono dei limiti superiori e inferiori alla metallicità necessaria per costruire in modo efficiente un pianeta terrestre. In effetti troppo poca metallicità implica una carenza di materiale necessario a formare un pianeta di massa terrestre, mentre la troppa metallicità darebbe luogo a pianeti giganti che potrebbero distruggere quelli di tipo terrestre. Una probabilità dipendente dalla metallicità,  $P_{metals}$ , di ospitare pianeti terrestri, è stata assegnata alla distribuzione spazio-temporale dei metalli, (v. Fig. 2.1, in alto). Nella stessa figura, in basso, riportiamo, da *Prantzos (2006)*, le simulazioni di *Mordasini et al (2006)* come doveroso confronto tra il valore della metallicità e la possibilità di avere pianeti (terrestri o gioviani); le metallicità vanno da  $0,6 Z_{\odot}$  (linea blu) a  $2 Z_{\odot}$  linea verde. Si vede che alta metallicità favorisce grandi frazioni di pianeti massivi (gioviani), in accordo con le osservazioni, ma anche di terre, mentre, con bassa metallicità si ha formazione di un numero minore di pianeti massivi, ma anche una crescita del numero di pianeti tipo Terra. Questo è, anche, un indice della complessità del problema.

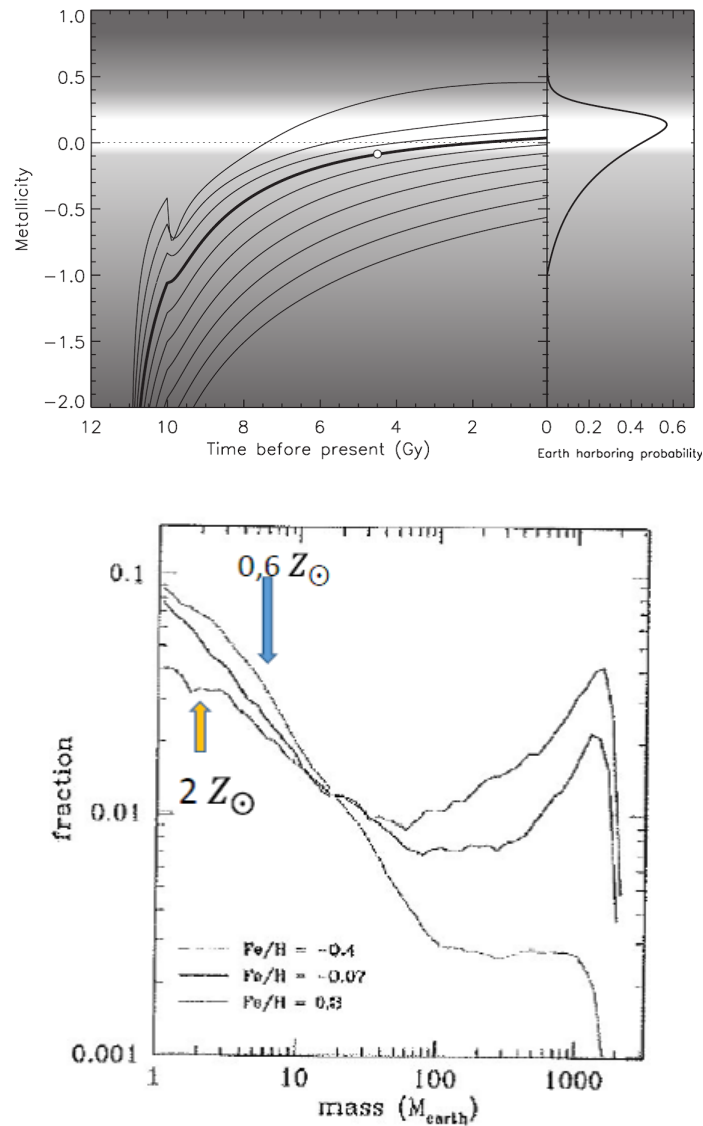


Figura 2.1: In alto, distribuzione spazio-tempo di metalli da *Lineweaver et al. (2004)*. Metallicità a diversa distanza Galattocentrica (da 2,5 kpc, curva superiore, a 20,5 kpc, curva inferiore, con incrementi di 2 kpc) in funzione del tempo e confronto con la probabilità di ospitare pianeti terrestri in funzione della metallicità della stella ospite (pannello a destra). L'epoca a cui il Sole si forma è evidenziato da un punto bianco. In basso, frazione di pianeti attorno ad una stella di una massa solare come funzione delle loro masse dalle simulazioni di *Mordasini et al. (2006)*. Ci sono tre risultati per tre diversi valori della metallicità della stella e per il corrispondente disco proto-planetario.

3. Il tempo sufficiente per consentire l'evoluzione biologica: hanno assunto il tempo scala della Terra come tipico ed hanno adottato  $4 \pm 1$  Gyr come il tempo caratteristico per lo sviluppo della vita complessa. Questo vincolo è modellato come una probabilità  $P_{evol}(t)$ , definita come integrale cumulativo di una distribuzione gaussiana di media 4 Gyr e dispersione 1 Gyr;

4. Un ambiente privo di supernovae: le radiazioni ad alta energia a causa di una esplosione di supernova, possono essere fatali per lo sviluppo della vita. Non è facile

determinare il vero effetto di questa emissione su un organismo, ma sicuramente dipende sensibilmente dallo spessore e dalla composizione dell'atmosfera che circonda il pianeta e dalla densità di polveri e gas. La probabilità che la vita complessa sopravviva ad una supernova è definita come  $P_{SN} = 0,5\xi(r, t)$  dove  $\xi(r, t)$  è il fattore di pericolo di supernovae dipendente dalla distanza Galattocentrica  $r$  e dal tempo  $t$  di formazione stellare. La probabilità totale di ottenere uno sviluppo favorevole della vita complessa  $P_{GHZ}$  può essere espressa come:

$$P_{GHZ} = SFR * P_{metals} * P_{evol} * P_{SN}$$

I fattori  $P_{SN}$  e SFR dell'equazione precedente non sono indipendenti, ma dal momento che crescono in modi opposti (la riduzione di SFR tende a far crescere la  $P_{SN}$ ) tendono ad annullarsi a vicenda.  $P_{GHZ}(r, t)$  esprime la frazione di sistemi planetari con le condizioni adatte per la vita come una funzione di tempo e di spazio. In *Lineweaver et al. (2004)* la GHZ è identificata come regione che si estende dal 68% al 95% della probabilità  $P_{GHZ}$ . Ne risulta una regione centrata a circa 8 kpc dal centro Galattico, che si allarga con il tempo, passando da 8 a 4 miliardi di anni fa (Fig. 2.2). Il bordo bianco interno, che racchiude il 68% della  $P_{GHZ}$ , comprende meno del 10% delle stelle che sono nate nella Galassia e confrontando la distribuzione di età della vita complessa (in verde a destra in figura sottostante) sembra che il 75% delle stelle che potrebbero ospitare la Vita, siano in media 1 Gyr più vecchie del Sole.

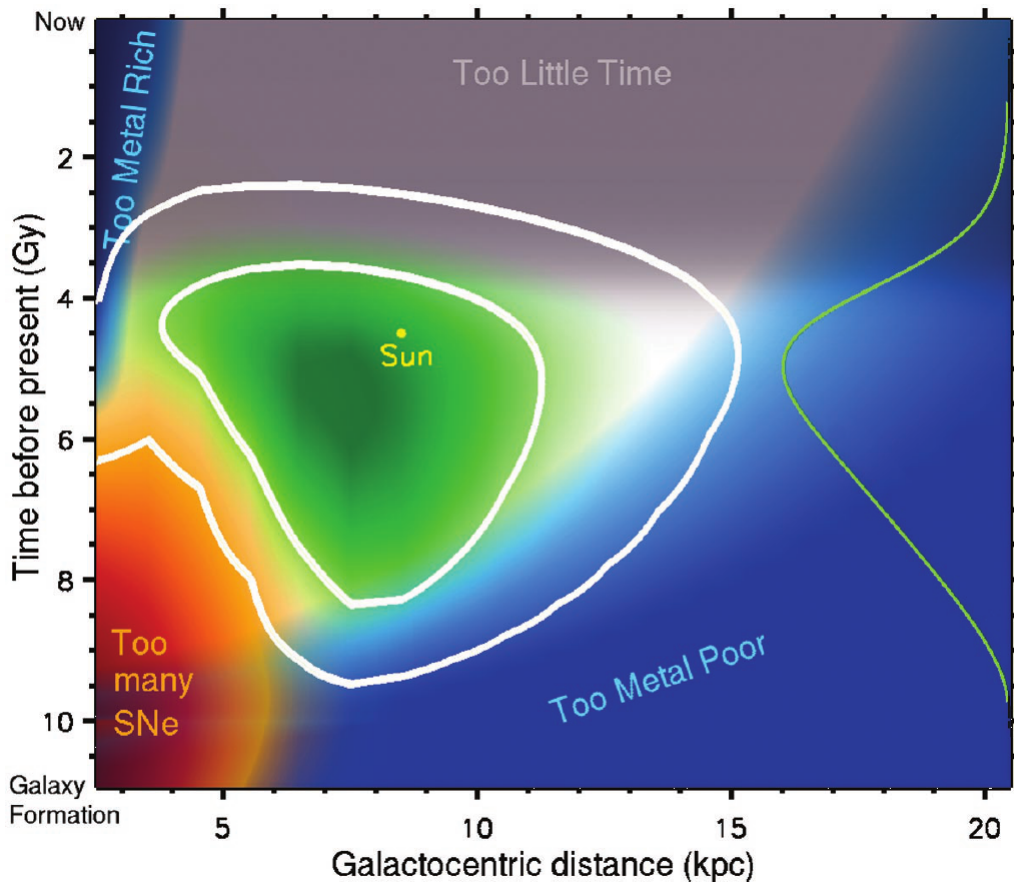


Figura 2.2: La GHZ nel disco della Galassia ottenuta usando i requisiti basati sull'ospitare la presenza di stelle, con adatta metallicità (parte blu), con sufficiente tempo per l'evoluzione (parte grigia) e libera dal fattore di estinzione della vita a causa di esplosioni da supernova (parte rossa). I bordi in bianco corrispondono al 68% (interno) e il 95% (esterno) della  $P_{GHZ}$ , quindi alle stelle originate con il più alto potenziale per ospitare la vita complessa. La linea verde a destra mostra la distribuzione dell'età necessaria per la vita complessa, ottenuta integrando  $P_{GHZ}(r, t)$  su  $r$  (Lineweaver et al., 2004).

Nel loro lavoro, Lineweaver et al. (2004), non hanno imposto una serie di condizioni a priori sotto cui la vita sarebbe possibile, ma, semplicemente, hanno assunto l'attuale condizione Solare come un modello per cercare sistemi simili. La naturale conseguenza è che il Sole stesso si trova all'interno della GHZ definita utilizzando tali vincoli. Una generalizzazione del risultato mostrato nella figura precedente può essere realizzata cercando non lo sviluppo della vita complessa, ma della vita in generale; in altre parole, rimuovendo il limite medio di 4 miliardi di anni (tempo medio necessario per avere i microorganismi pluricellulari, v. Fig. 2.6). Vale a dire escludendo  $P(t)_{evol}$  dall'equazione della probabilità, la GHZ si estende come mostrato di seguito in Fig. 2.3. In questo modo l'età media per una stella ospitante la vita è spostata in avanti nel tempo: circa 4 Gyr più giovane del Sole. In generale si può osservare che:

- agli inizi della storia galattica l'intensa formazione stellare nella parte interna della Galassia (sotto i 7 kpc a  $\simeq 8Gyr$ ) ha fornito gli elementi pesanti necessari

alla formazione di pianeti terrestri, ma ha anche prodotto una inaccettabile forte produzione di supernove che non ha permesso l'inizio della vita per diversi miliardi di anni; (ad es. a partire da 4 kpc devono passare  $\simeq 3Gyr$ ).

- l'alone stellare e il disco spesso, a causa della loro bassa metallicità, difficilmente possono ospitare pianeti terrestri;
- il bulge, non è un ambiente adatto per la vita, giacché in esso vi è un' elevata densità di stelle con intenso campo di radiazioni ed incontri ravvicinati stellari.

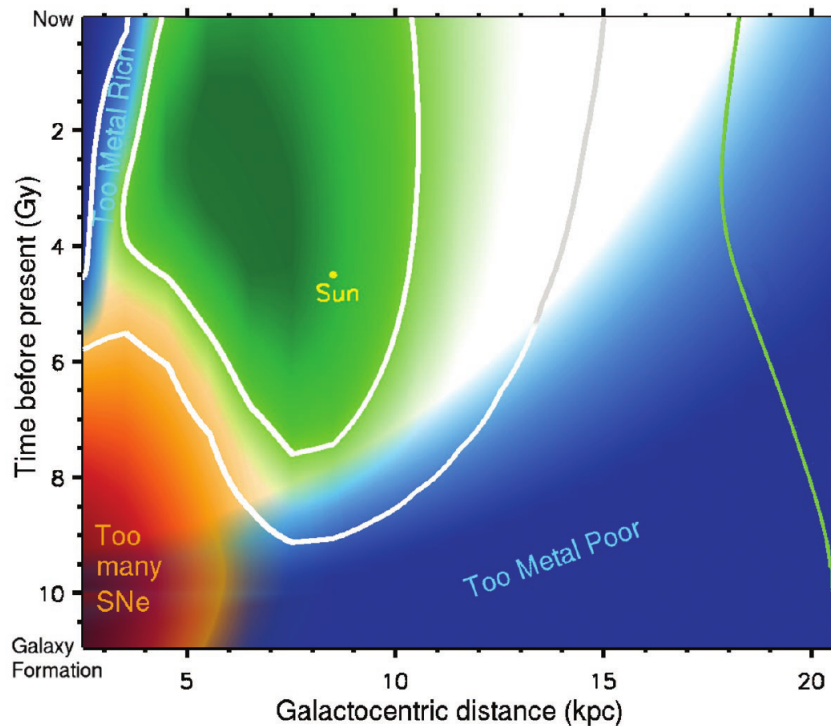


Figura 2.3: La GHZ nel disco della Galassia senza il requisito temporale ( $4 \pm 1$  Gyr) per la vita complessa (Lineweaver et al., 2004).

I limiti dell'abitabilità all'interno della Galassia sono stati rivisitati in pochi lavori recenti, in particolare Prantzos (2006) e Gowanlock et al. (2011). Il primo è fortemente critico sui bordi della GHZ forniti dal lavoro di Lineweaver et al. (2004) e avanza dubbi sulla possibilità di definire un limite per una zona abitabile, in generale, all'interno della Galassia. Infatti Prantzos (2006) ha sottolineato che i vincoli sui quali la definizione della GHZ è basata (in particolare i requisiti legati al tasso di supernove e la metallicità) dipendono in larga misura dalle assunzioni fatte nel modellare l'evoluzione della Via Lattea e nel calcolare la probabilità di avere stelle che ospitano pianeti terrestri. A suo avviso tali assunzioni sono lontane da essere definite in modo inequivocabile al momento attuale. Nonostante ciò, nel suo lavoro egli fornisce la dimensione della GHZ per 5 differenti epoche durante l'evoluzione della Via Lattea (cioè 1, 2, 4, 8 e 13 Gyr) (Fig. 2.4). In particolare quella a  $\simeq 4$  Gyr risulta in buon accordo con il modello proposto in Lineweaver et al. (2004). In Prantzos (2006) i requisiti in metallicità sono articolati come la probabilità che pianeti simili alla Terra sopravvivano ad un Hot Jupiter (pannello di sinistra sotto in



Fig. 2.4). La probabilità complessiva per ottenere pianeti simili alla Terra, favorevoli alla vita, è il prodotto tra la precedente probabilità e la probabilità, fortemente rivista<sup>2</sup>, che la vita sopravviva all'esplosione di supernovae (a destra nel pannello centrale). La GHZ ha una forma anulare, abbastanza stretta all'inizio della storia della Galassia (circa 3 kpc a  $\simeq 4$  Gyr), ma si allarga progressivamente, raggiungendo la quasi totale estensione del disco Galattico, al momento attuale, con un picco a circa 10 kpc.

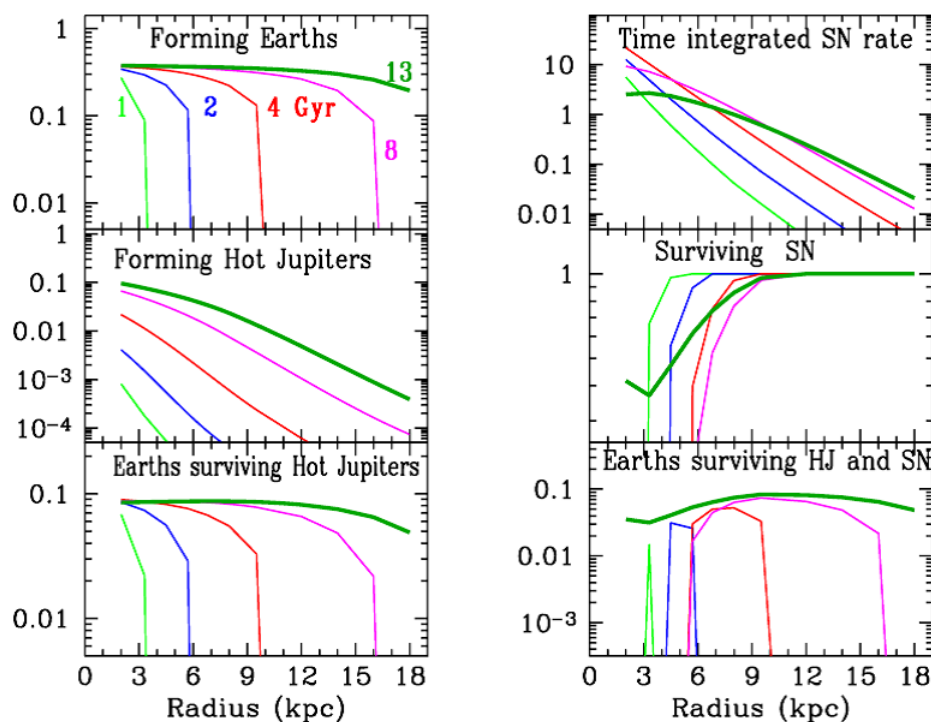


Figura 2.4: La probabilità degli eventi che limitano la dimensione della GHZ fornita da *Prantzos (2006)* per 5 differenti epoche (1, 2, 4, 8 e 13 Gyr) nella storia della Galassia. La probabilità complessiva di pianeti simili alla Terra con la Vita viene mostrata nel pannello in basso a destra e definisce un anello nel disco della Via Lattea estremamente stretto all'inizio della storia Galattica, ma che progressivamente raggiunge l'estensione della quasi totalità del disco Galattico al momento attuale, con un picco a circa 10 kpc.

In questo studio *Prantzos (2006)* introduce anche due differenti approcci per la definizione della GHZ. Uno è in relazione con la probabilità di vita complessiva intorno ad una data stella che sorge in un determinato punto spazio-temporale; l'altro implica la densità di probabilità (per unità di superficie o volume) di avere vita complessiva in una data posizione della Galassia in un dato momento. La seconda idea per la GHZ è ottenuta moltiplicando la probabilità di vita della prima definizione con la densità (di superficie o volume) di stelle, più grande nel disco interno che nella parte

<sup>2</sup>Ad esempio considerando la difficoltà nel capire quanto un evento di supernova sia davvero responsabile per la fine della vita in un pianeta perchè, ad esempio, le acque degli oceani potrebbero proteggere gli strati più profondi dalle radiazioni fatali, permettendo alla vita di continuare in questi luoghi.

esterna<sup>3</sup>. La logica conseguenza di questo approccio è l' identificazione della parte interna della Galassia come il luogo più adatto ad ospitare la Vita. *Gowanlock et al. (2011)* seguono questo secondo approccio, che descrive la GHZ introducendo la densità spaziale di stelle nella Galassia che possono favorire lo sviluppo della Vita complessa. La loro conclusione è che la nostra posizione attuale non è particolarmente favorevole ad ospitare la vita e sottolineano che l'ambiente più favorevole si trova nella parte interna della Galassia (con un picco in corrispondenza di 2,5 kpc, v. Fig. 2.5). Questo risultato estremo è causato, anche, dal rimodellamento degli effetti delle supernovae, in quanto si richiede alta metallicità e alta densità stellare<sup>4</sup>: infatti, riducendo l'effetto negativo dell' azione di supernovae, la GHZ può essere estesa a  $R \simeq 2,5 \text{ kpc}$  dal centro, grazie al valore della metallicità e al grande numero di stelle che nella parte interna della Galassia produce un alto tasso di formazione di pianeti per un lungo tempo scala e rende, quindi, la regione interna in grado di alloggiare il maggior numero di pianeti con le condizioni opportune per ospitare la vita complessa. Inoltre *Gowanlock et al. (2011)* ridefiniscono anche la morfologia della GHZ che non è più una regione anulare, come in *Lineweaver et al. (2004)*, ma è costituita da una regione nei pressi del centro Galattico, senza un preciso bordo interno.

In conclusione, il problema della delimitazione della GHZ è lontano dall'essere risolto. Per *De Biasi (2014)*, i confini sono quelli del modello canonico di *Lineweaver et al. (2004)*, sostanzialmente non troppo cambiati dalla revisione di Prantzos, se viene considerata la prima definizione della GHZ corrispondente alla Fig. 2.2.

---

<sup>3</sup>In realtà, tale densità di stelle era già dentro nella prima definizione di Prantzos quando determina il *Time integrated SN rate*.

<sup>4</sup>Ad esempio, moltiplicando la probabilità di avere pianeti di tipo terrestre che sopravvivono ad esplosioni di supernova, con la corrispondente densità superficiale di stelle (maggiore nella parte interna del disco e minore verso il suo esterno) si trova che è più probabile trovare una stella con un pianeta tipo *terra* che sopravviva alle esplosioni di SN verso l'interno della Galassia.

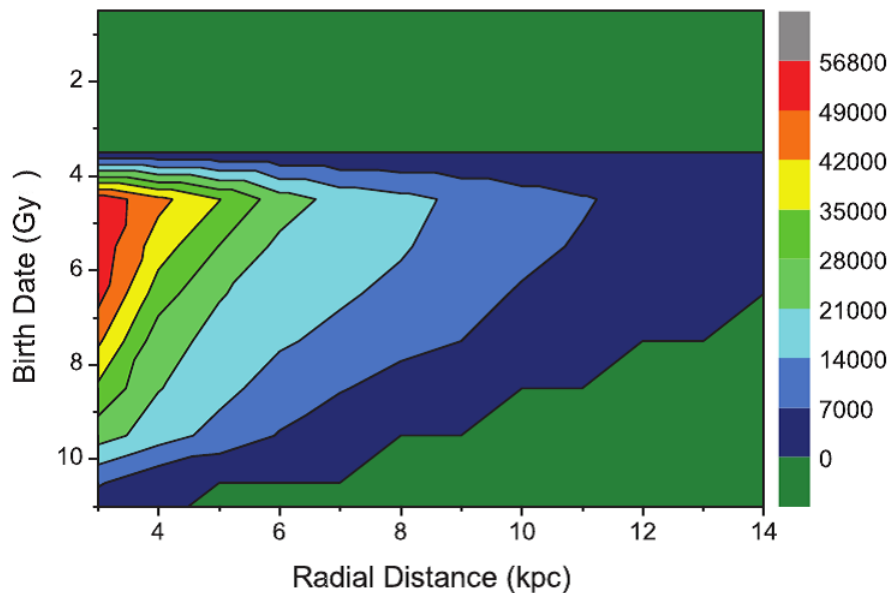


Figura 2.5: La GHZ nel disco fornito da *Gowanlock et al. (2011)*. Il numero di pianeti abitabili per parsec (numero fornito dalla barra verticale nel codice colore) è tracciato in funzione della distanza radiale e data di nascita. In questo studio gli effetti negativi dell'azione di supernovae sono ridotti, ottenendo in tal modo che i pianeti abitabili sono prevalentemente nella parte interna della Galassia.

### 2.1.1 Un giusto tempo per la vita

Riguardo al tempo necessario per lo sviluppo della *Vita complessa*, di cui abbiamo parlato nella Sez. 2.1, facciamo notare che l'esperienza terrestre insegna che per l'apparire della vita occorrono, dopo la formazione del pianeta, almeno  $\simeq 1 \times 10^9$  anni (la comparsa delle più antiche cellule fossili unicellulari, simili agli attuali batteri, trovati in un deposito di selce nera in Australia). Per avere il primo organismo multicellulare, passano ancora  $\simeq 2,7 \times 10^9$  anni. I primi ominidi appaiono circa  $6 \times 10^6$  anni fa, quindi passano ancora  $\simeq 0,75 \times 10^9$  anni (v. Fig. 2.6). Quindi, complessivamente per avere i pluricellulari, ci vogliono  $\simeq 4 \text{ Gyr}$  dopo la formazione della Terra. E' chiaro quindi che la delimitazione della GHZ dipende in modo cruciale dalla risposta alla domanda essenziale: *Che cosa è la vita? A quale tipo di Vita ci riferiamo?* Quella complessa (pluricellulare) richiede un tempo più lungo ( $\simeq 3 \text{ Gyr}$ ) rispetto a quella più semplice (monocellulare).

Preferiamo ora concentrarci su alcuni requisiti essenziali al sorgere della Vita (che coinvolgono però scale diverse per le strutture):

1. Presenza dei "mattoni" cioè degli elementi chimici basilari per la formazione dei composti organici: carbonio, ossigeno, azoto, fosforo, zolfo, ferro; (scala cosmologica).
2. Condizioni planetarie adatte di stabilità dell'orbita e quindi della temperatura, pressione dell'atmosfera (i composti organici si devono formare, ma devono anche essere stabili), (v. Cap. 1) (scala locale, vale a dire del Sistema Solare).

3. Ambiente adatto alla formazione di lunghe catene molecolari (scala cosmologica e locale).

Questi requisiti ci serviranno per parlare della Vita anche a livello cosmologico (v. Cap. 4).

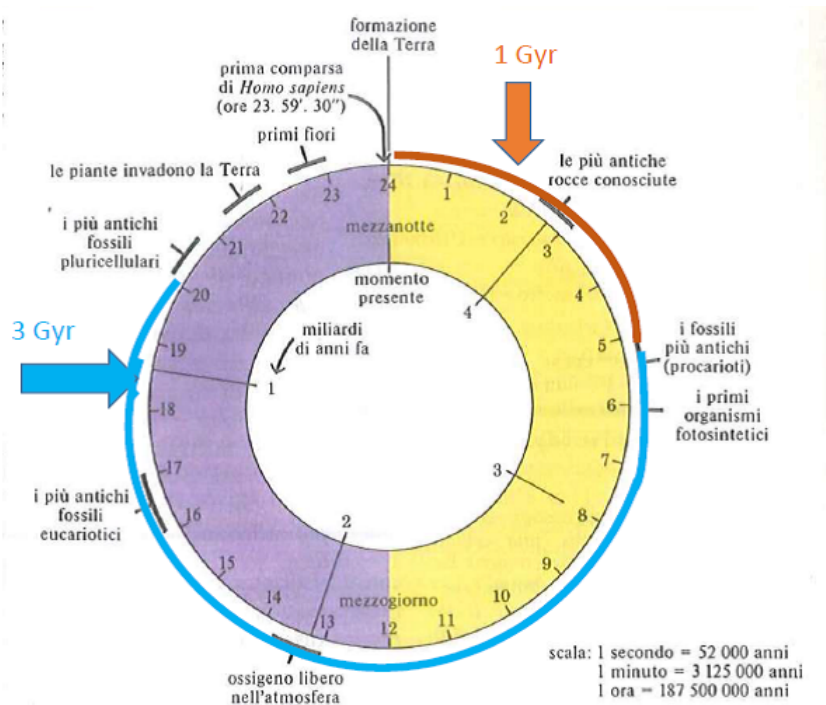


Figura 2.6: Quadrante del tempo biologico: la vita apparve relativamente presto nella storia della Terra, prima delle sei su una scala di ventiquattro ore (1 Gyr, dalle mezzanotte alle 5.00 circa, linea e freccia rosse). I primi organismi pluricellulari non appaiono però se non alla sera (line e freccia azzurra, altri 3 Gyr, dalle 5.00 circa alle 20.00 circa) e l' Homo Sapiens è l'ultimo arrivato, circa trenta secondi prima della mezzanotte (Curtis & Barnes, 1999).

### 2.1.2 Limiti per la GHZ

Riportiamo di seguito una breve sintesi dei limiti della GHZ proposti dai principali autori discussi in questo elaborato.

Tempo (Gyr)	Autore	Limite
4-4,5	Gonzalez, Brownlee, Ward, (2001)	4.5-11.5 kpc
4,5	Lineweaver (2004)	4-11 kpc
4,0	Lineweaver (2004)	4-10 kpc
4,0	Prantzos (2006)	5-10 kpc

Tabella 2.1: Limiti delle zone di abitabilità Galattica per i vari autori (v. sottosezione seguente per i limiti di Gonzalez et al., 2001).

Gonzalez (1995), Gonzalez et al. (2001) furono tra i primi ad indagare sui possibili limiti di una GHZ, fornendo, solo indirettamente, i valori indicati in Tab.

2.1 (v. sottosezione seguente). Una sintesi più esaustiva per le esigenze di vita all'interno della Galassia è stata fornita nel lavoro citato di *Lineweaver et al. (2004)*. Infine, pur essendo critico sui bordi forniti da Lineweaver, *Prantzos (2006)* ritrova circa gli stessi valori, sottolineando che le assunzioni fatte per ricavarli sono ben lontane da essere inequivocabilmente definite al momento attuale. Abbiamo invece tralasciato, perchè a nostro avviso poco realistiche, le conclusioni di *Gowenlock et al. (2011)*.

### Sui limiti della GHZ da Gonzalez et al. 2001

*Gonzalez, Brownlee, Ward, (2001)*, in realtà, non danno, in modo esplicito, i limiti riportati in Tab. 2.1, suggeriscono solo le indicazioni per poterli calcolare. Nel loro lavoro, esaminano la dipendenza della GHZ solo dall'evoluzione chimica della Galassia, in particolare quella del disco. Il criterio suggerito è basato su questo *statement* fondamentale: più alta è la metallicità più massiccio è il pianeta tipo Terra che si può formare<sup>5</sup>. Si riporta di seguito (Fig. 2.7) la Fig.1(a, b) del lavoro di *Gonzalez et al. (2001)*: nell'immagine superiore, Fig. 1(a), si plottano le masse dei pianeti di tipo terrestre contro il tempo, per l'ISM nei dintorni solari. Il *trend* calcolato dall' Eq. 1 degli autori (v. seguito) è indicato come una curva nera; la massa del pianeta è assunta proporzionale a  $10^{1,5[Fe/H]}$  (v. *Sez. 2.1* degli autori). La dispersione, inferiore e superiore, di un sigma, è rappresentata dalle due curve punteggiate sottili. La metallicità Solare corrisponde al cerchio aperto bianco in Fig. 1(a). Nell'immagine inferiore, Fig. 1(b), si plottano le masse dei pianeti di tipo terrestre contro la distanza Galattocentrica, in confronto alla metallicità locale ISM indicata con il cerchio bianco aperto a cui corrisponde  $1 M_{\oplus}$ .

---

<sup>5</sup> *Gonzalez et al. (2001)* trovano che il disco interno all'attuale posizione solare dovrebbe contenere pianeti terrestri più grandi della Terra, mentre il disco esterno è probabile che contenga pianeti terrestri più piccoli della Terra, questo perchè le dimensioni dei pianeti dovrebbero essere proporzionali, appunto, al gradiente di metallicità.

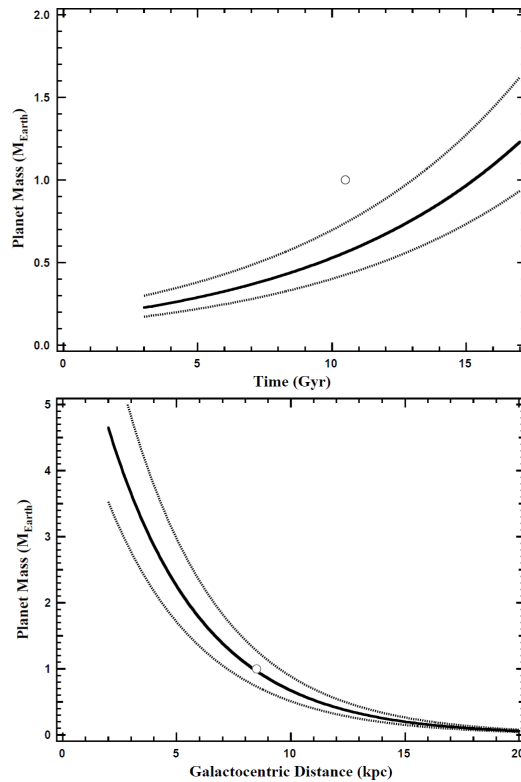


Figura 2.7: Fig. 1(a, b) di *Gonzalez et al. (2001)* (v. testo).

Si possono quindi calcolare i limiti nel modo seguente:

a) Limite superiore: viene stimato che una metallicità pari a circa metà di quella Solare possa bastare a costruire un pianeta abitabile di tipo terrestre (v. *Abstract* degli autori); tale criterio viene poi specificato come la metallicità sufficiente per formare un pianeta tipo Terra, con massa pari ad  $1/3$  della massa terrestre (pg.16 degli autori).

b) Limite inferiore: corrisponde ad una metallicità necessaria per poter formare un pianeta tipo Terra, con massa pari a tre volte la massa terrestre (pg.16 degli autori).

I limiti riportati da *Gonzalez et al. (2001)* sono, quindi, da prendere come puramente orientativi e si riferiscono ad una metallicità sul disco data dall' Eq.(1) del loro lavoro, che lega la metallicità e l'età ad una certa distanza media dal centro Galattico per un campione di stelle F e G (*Gonzalez, 1999a*):  $[Fe/H] = -(0.01 \pm 0.02) - (0.07 \pm 0.01)(R_m - R_0) - (0.035 \pm 0.005)\tau$ , dove  $\tau$  è l'età in Gyr,  $R_0$  è la distanza Galattocentrica del Sole al tempo presente ( $R_0 = R_\odot = 8.5$  kpc) e  $R_m$  è la distanza galattocentrica media. La dispersione assunta è quella data nella precedente Fig.1 degli autori.

La rilevanza del lavoro di *Gonzalez et al. (2001)* sta nel fatto che per la prima volta sono stati enunciati dei limiti per la GHZ, i cui valori sono stati esplicitati dagli autori solo in un articolo divulgativo (*Le Scienze, 2001*); questi valori si possono trovare riportati esplicitamente (4.5-11.5 kpc) anche in *Masi et al. (2003)*.

**Derivazione dei limiti di Gonzalez et al. (2001)**

Assumendo che il gradiente di metallicità sul disco sia  $-0.07 dex kpc^{-1}$ , ad età costante, interpolando linearmente, si ha:

$$\log Z_{\odot} = \frac{d \log Z}{dR} (R_m - R_{\odot}) + const$$

per avere metà della metallicità solare si considera che:

$$\log \frac{1}{2} Z_{\odot} = \frac{d \log Z}{dR} (R_m - R) + const$$

Facendo la differenza si ricava che:

$$(\log 2) / \left( \frac{d \log Z}{dR} \right) = R - R_{\odot}$$

Per il gradiente assunto, si ottiene una variazione, rispetto alla posizione solare (8.5 kpc), pari a: 4.3 kpc. Il limite superiore diventa pari a: 12.8 kpc, che è in accordo con quanto si ricava, come valore medio, dal grafico precedente di Fig.1 (b) degli autori, per una massa pari ad 1/3 della massa terrestre. Per il limite inferiore, dallo stesso grafico, prendendo una massa pari a tre volte la massa terrestre si ottiene un valore medio di circa 4 kpc. Tenendo poi conto della dispersione del gradiente, i valori dati in Tab. 2.1, appaiono essere ragionevoli.

## 2.2 Maree galattiche planari sulla nube di Oort e sistemi analoghi

*De Biasi et al. (2015)* indagano sulla possibilità che effetti mareali possano perturbare le orbite di comete appartenenti alla Nube di Oort e sistemi analoghi (v. Sez. 1.1) causando una iniezione di questi oggetti nel sistema planetario interno e ciò potrebbe comportare drastiche conseguenze nel delimitare la GHZ. Una nube cometaria analoga alla Nube di Oort, è probabilmente una caratteristica comune attorno ai sistemi planetari extrasolari sparsi in tutta la Galassia. Diverse perturbazioni esterne sono in grado di cambiare le orbite delle comete. La più importante di queste è la marea Galattica. Per identificare i maggiori fattori che influenzano il processo di iniezione delle comete, *De Biasi et al. (2015)* hanno dedicato il lavoro alla marea Galattica proveniente dal contributo della massa del bulge, del disco e dell'alone di materia oscura, per diversi valori della distanza dal centro Galattico della stella centrale e parametri diversi per le comete.

Prima di procedere oltre, è doveroso, però, notare che gli impatti cometari non sempre sono "catastrofici"; diciamo che la loro pericolosità dipende da quando essi accadono; infatti, prima della comparsa della vita in un pianeta, se è vero che nelle zone più interne della Galassia, le perturbazioni mareali (come vedremo) gene-

rano variazioni forti sulle dinamiche cometarie (iniezione cometaria verso i pianeti interni), è altresì vero che quelle stesse perturbazioni, e quindi gli impatti, potrebbero essere l'origine della comparsa dell'acqua su di un pianeta con una storia simile alla Terra; le comete, infatti, contengono moltissima acqua. Di conseguenza, paradossalmente, un certo periodo nella zona più vicina al centro Galattico potrebbe incrementare il meccanismo di generazione dell'acqua in un pianeta; ammesso che questa sia davvero portata dalle comete. La questione è ancora aperta e si rimanda alla Sez 3.3 per una sintesi sugli aggiornamenti di questo argomento..

### 2.2.1 Limiti del lavoro sulla marea

Nel lavoro citato si considerano maree planari, che possono diventare non trascurabili in presenza di perturbazione dei bracci a spirale. Per vedere l'indipendenza degli effetti di marea dal sistema di riferimento, gli autori hanno descritto tali effetti in tre differenti sistemi di riferimento: uno galattico e due eliocentrici con e senza l'approssimazione di Hill sviluppata per un potenziale assisimmetrico in 3D, (*Appendice B*). Si verifica così la consistenza generale tra i tre sistemi di riferimento. I contributi del bulge, disco e alone oscuro sono considerati separatamente e viene valutato il loro apporto alla marea Galattica totale. Uno dei risultati principali raggiunto è che l'approssimazione di Hill risulta essere potente nel prevedere l'importanza relativa tra le componenti Galattiche che producono la perturbazione di marea sulla Nube di Oort e su nubi cometarie analoghe. Il punto fondamentale consiste nel fatto che il contributo di ogni componente Galattica alla marea dipende dal contributo alla velocità circolare della stella centrale sul disco e dal corrispondente gradiente logaritmico di velocità. Inoltre i risultati finali mostrano una forte dipendenza della variazione del perielio della cometa dalla combinazione di longitudine galattica e direzione del moto. Orbite delle comete con la stessa longitudine galattica, ma direzione opposta del movimento, hanno segni opposti della variazione media del perielio. Questa dipendenza è più forte man mano che il sistema Sole-Cometa si avvicina al centro Galattico. L'andamento armonico della distanza media del perielio in funzione della longitudine e delle direzioni di movimento (v. Fig. 2.16) è qualitativamente spiegato dall'applicazione delle equazioni planetarie di Lagrange, che qui però non consideriamo. L'esistenza di nubi cometarie analoghe a quella di Oort, in differenti sistemi planetari sparsi in tutta la Galassia, è suggerita da recenti evidenze di eccessi di polvere sui dischi di detriti nei sistemi di pianeti extrasolari osservati dallo Spitzer a 70 micron (*Greaves & Wyatt, 2010*). La marea Galattica può re-iniettare le comete della Nube di Oort verso la parte interna del sistema planetario producendo un flusso cometario con possibili impatti su di esso. Gli effetti della marea Galattica sulle comete della Nube di Oort sono stati studiati da diversi autori (es. *Heisler & Tremaine, 1986; Matese et al., 2002-2005; Fouchard et al., 2007*). Di solito la marea è scomposta nella componente radiale,



trasversale e ortogonale (rispetto al piano del disco). Alla distanza solare dal centro Galattico la marea ortogonale è stata stimata essere circa dieci volte più efficace di quella radiale, nella perturbazione delle comete nella nube di Oort nel Sistema Solare (*Heisler & Tremaine, 1986; Morbidelli, 2005*). A questa distanza, sembra essere l'effetto perturbante dominante non solo ora, ma anche nel futuro a lungo termine (*Heisler, 1990*). Nonostante ciò, il contributo della marea planare (radiale e trasversale), che è il solo ad essere considerato nel lavoro di *De Biasi et al. (2015)*, diventa non trascurabile quando la distanza della stella madre dal centro Galattico si modifica, rispetto a quella attuale del Sole, come dimostra *Masi et al. (2009)* per le comete della Nube di Oort, e *Veras & Evans (2013)* nella loro analisi sulla dinamica di pianeti extrasolari. In particolare la componente planare della marea può perturbare fortemente il moto cometario se la stella centrale diminuisce la sua distanza e/o la sua massa rispetto a quella attuale solare. Inoltre, i suoi effetti in presenza di perturbazioni dovute ai bracci a spirale possono essere fortemente potenziati, come anche *Kaib et al. (2011)* hanno già anticipato e come confermato nei risultati preliminari di *De Biasi (2014)*. L'introduzione dei bracci a spirale influenza le orbite delle comete e il movimento del Sole e causa una sua migrazione (*Kaib et al., 2011*) dal limite interno ( $\simeq 4$  kpc) alla posizione attuale sul disco Galattico (8 kpc). Per testare le conseguenze che la migrazione può comportare sulle dinamiche delle comete, si prende in considerazione, in questo lavoro, l'azione della marea Galattica per due valori estremi delle distanze: 4 e 8 kpc. Vanno inoltre riviste le condizioni per definire una GHZ per quanto riguarda l'effetto della marea in funzione della dipendenza della posizione sul disco del sistema planetario. L'approssimazione di Hill viene incontro a questa esigenza, assegnando a priori l'intensità della marea Galattica, per unità di lunghezza, in funzione della posizione.

Si descriverà di seguito il modo in cui il potenziale Galattico è stato modellato utilizzando le sue componenti dinamiche più importanti: bulge, disco e alone di materia oscura.

### 2.2.2 Estensione della Nube di Oort e Potenziali galattici

Come discusso nella Sez. 1.1, la Nube di Oort è una nube sferica di comete posta tra 20000 e 100000 UA. Alcuni autori (*Gonzalez, 2005*) delimitano la Nube di Oort suddividendola nella "inner Oort Cloud" fra 1000-20000 UA e nella "outer Oort Cloud" fra 20000-50000 UA (v. Fig. 2.8, sopra).

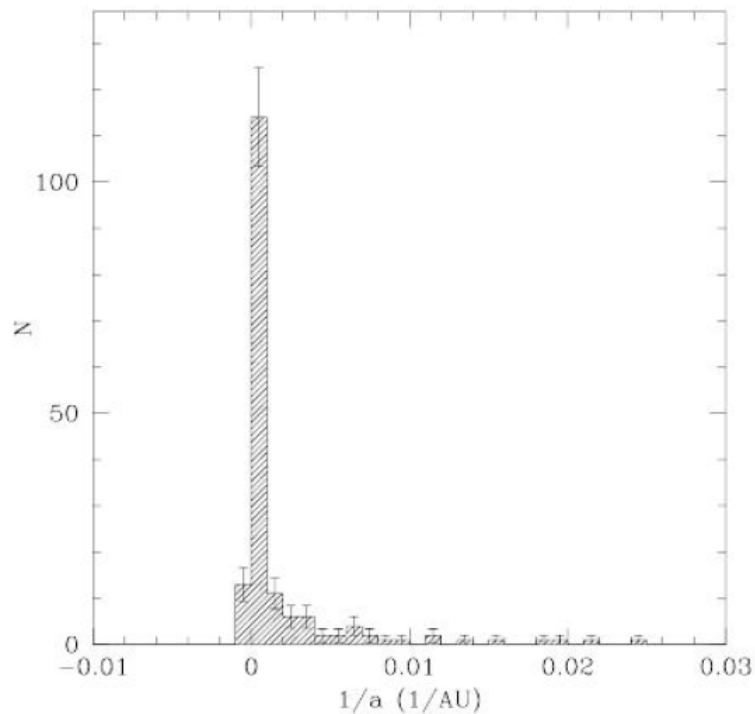
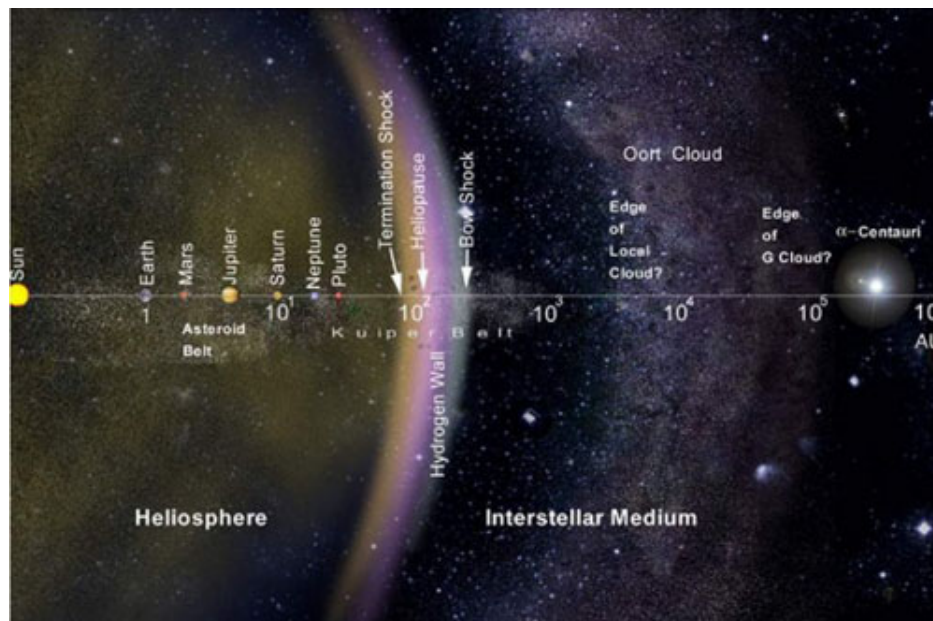


Figura 2.8: Sopra: struttura della Nube di Oort e il suo collocamento rispetto al Sistema Solare (e  $\alpha - Centauri$  come riferimento), si vedono anche: l'*eliosfera*, dove il vento stellare è supersonico, e la *termination shock*, dove il vento stellare diventa subsonico e poi passa a velocità circa nulla nell'*eliopausa*; si rappresenta anche il muro di idrogeno ipotetico (che si pensa sia presente dopo l'eliopausa) e il *bow shock*, dove il vento stellare cala bruscamente a contatto con la magnetopausa del Sole, che collega l'eliopausa con il mezzo interstellare (tali zone sono ancora soggette a vari studi, specialmente grazie alla sonda della *Nasa Voyager 1 (1977)* [e]; la sonda era a circa 134.7 UA dalla Terra all'inizio del 2016). Sotto: la distribuzione dell'inverso del semiasse maggiore ( $a$ ) delle comete della Nube di Oort con l'evidente picco attorno a  $3.7 \cdot 10^{-5} UA^{-1}$  corrispondente ad un afelio di circa 54000 UA (*De Biasi, 2010*).

Le comete nella Nube di Oort sono solo debolmente legate alla gravità del Sole

e per questo motivo sono facilmente perturbabili. La distribuzione nell'inverso del semiasse maggiore  $a$ , presenta un picco attorno a  $3.7 \cdot 10^{-5} UA^{-1}$  corrispondente ad un afelio di circa 54000 UA e ad un periodo di  $\simeq 4.4$  milioni di anni (v. Fig. 2.8, sotto). A grandi distanze dal Sole, la forza di marea Galattica (*Masi et al., 2009; Matese & Lissauer, 2002; Heisler & Tremaine, 1986*) è una delle perturbazioni dominanti delle orbite delle comete assieme alle perturbazioni stellari (*Hills, 1981*) e alle nubi molecolari giganti (GMC) (*Bailey, 1986*). Trattiamo la prima, tralasciando le altre due. Per studiare gli effetti mareali sulle comete della Nube di Oort, *De Biasi et al. (2015)* hanno considerato un corpo cometa come una particella di prova (per la marea Galattica) e scelto una cometa appartenente al guscio esterno della nube di Oort, dove la forza gravitazionale solare è inferiore e le perturbazioni Galattiche sono più efficaci. La cometa ha afelio iniziale di 140000 AU, perielio iniziale di 2000 AU, inclinazione sul piano Galattico pari a zero e la longitudine Galattica (v. Fig. 2.11) che copre  $360^\circ$  con un passo di  $15^\circ$ <sup>6</sup>. La cometa presa in considerazione da *De Biasi et al. (2015)* è più slegata rispetto alla media delle comete della Nube di Oort, infatti, essa ha periodo dell'orbita di 18.4 Myr (contro un periodo medio di 4.4 Myr). La Fig. 2.11 si riferisce, tuttavia, alla longitudine  $3\pi/2$ . La direzione di movimento può essere diretta o retrograda. Per ogni sistema di riferimento l'orbita è stata integrata dagli autori per 100 Myr.

Il punto di partenza per lo studio del comportamento dinamico di una nuvola cometaria nel potenziale Galattico è quello di costruire una realistica descrizione delle più importanti componenti dinamiche della Via Lattea. Nel presente studio si adotta un semplice modello a simmetria assiale e si decompone la distribuzione di massa totale nelle sue diverse componenti Galattiche, ossia il bulge, il disco e l'alone di materia oscura (DM). Questo approccio non tiene conto delle irregolarità e asimmetrie nella distribuzione delle masse (come la struttura a spirale, o la forma triassiale del bulge) poiché per gli scopi di questo lavoro, i loro effetti possono essere trascurati. Questo rende il modello di massa più facile da integrare. La presenza del disco obbliga all'uso di un modello assi-simmetrico per il potenziale totale della Galassia  $\Phi(R, z)$  con  $R$  raggio Galattocentrico e  $z$  distanza sul piano del disco. Gli effetti dinamici della Galassia possono essere espressi mediante la somma dei potenziali del bulge ( $\Phi_{BG}$ ), del disco ( $\Phi_D$ ) e dell'alone di materia oscura ( $\Phi_{DH}$ ):

$$(\Phi_{gal}) = (\Phi_{BG}) + (\Phi_D) + (\Phi_{DH}) \quad (2.1)$$

Il bulge è la componente meno estesa della nostra galassia. Possiamo considerare come buona approssimazione il modello sferico di Plummer (*Binny & Tremaine, 2008*) con la seguente espressione analitica del potenziale gravitazionale:

---

<sup>6</sup>Lo sarà di  $45^\circ$  nel lavoro di *Masi et al. (2009)* che analizzeremo più avanti.

$$\Phi_{BG}(r) = -\frac{GM_{BG}}{\sqrt{r^2 + r_c^2}} \quad (2.2)$$

dove  $M_{BG}$  è la massa totale del bulge e  $r_c$  il raggio del core (*Flynn et al., 1996*). Il disco presenta un mix di composizione di età, metallicità, velocità sistematica, dispersione di velocità delle sue stelle che rende difficile un suo modellamento sul raggio e sulla distribuzione verticale di massa-luminosità. Una vasta letteratura (es.: *Binney & Tremaine, 2008*) è presente per modellare un disco assi-simmetrico tridimensionale distinguendo i suoi due contributi principali, *disco spesso* e *sottile*, come scoperto da *Burstein (1979)*. L'esistenza di queste due componenti come componenti distinte sembra essere ancora incerta (*Bovy et al., 2013*) e dato che il contributo del *disco spesso* alla densità superficiale totale è stimato essere solo di circa il 5%, a distanza solare (*Dehnen & Binney, 1998; De Biasi, 2010*), come prima approssimazione, ci limitiamo a considerare solo il *disco sottile*. Partiamo dal riferimento principale che è il modello infinitamente sottile di Freeman (*Freeman, 1970*), con una distribuzione esponenziale della densità di massa superficiale data da:

$$\Sigma(R) = \Sigma_0 e^{-R/R_d} \quad (2.3)$$

dove  $\Sigma_0 = 359 M_\odot pc^{-2}$  è la densità di massa superficiale centrale del disco e  $R_d = 4.1 kpc$  è la lunghezza di scala in accordo con le osservazioni (*Lewis & Freeman, 1989*); la densità superficiale, a distanza solare, è pari a:  $\Sigma_0(R_\odot) = 50 M_\odot pc^{-2}$ , (*Kuijken & Gilmore, 1991*). Il corrispondente potenziale per la distribuzione di massa  $\Sigma(R)$ , è:

$$\Phi_D(R) = -\pi G \Sigma_0 R [I_0(R/2R_d)K_1(R/2R_d) - I_1(R/2R_d)K_0(R/2R_d)] \quad (2.4)$$

dove  $I_n$  e  $K_n$  sono funzioni modificate di Bessel di differenti ordini  $n$ . Anche se con le trasformazioni di Hankel e le funzioni cilindriche di Bessel si può ottenere un potenziale gravitazionale bidimensionale  $\Phi_D(R, z)$ , questo tipo di modello è soggetto a due difficoltà: la tipica estensione verticale delle orbite delle cometa risulta essere inferiore all'altezza della scala osservata per il disco Galattico, che è di circa 200 pc. La conseguenza è che solo una frazione dell'intera massa del disco viene coinvolta nella marea; inoltre questa parametrizzazione del potenziale del disco è lenta da integrare. Si possono superare entrambi i problemi combinando tre dischi di Miyamoto-Nagai (*Miyamoto & Nagai, 1975*) di diverse lunghezze di scala e masse:

$$\Phi_{MN}(R, z) = -\sum_{n=1}^3 \frac{GM_n}{\sqrt{R^2 + [a_n + \sqrt{b^2 + z^2}]^2}} \quad (2.5)$$

Il parametro  $b$  è legato all' altezza di scala del disco,  $a_n$  sono le lunghezze di scala e  $M_n$  sono le masse delle componenti dei tre dischi. Elenchiamo i valori delle costanti  $a$ ,  $b$ ,  $M_n$ , secondo *Flynn et al. (1996)*, nella tabella successiva. Si deve sottolineare che l'andamento del potenziale dato dalla Eq. (2.4) risulta in buon accordo con quello dell' Eq. (2.5) sul piano  $z = 0$ .

Component	Parameter	Value
Bulge	$M_{BG}$	$1.6 \times 10^{10} M_{\odot}$
	$r_c$	0.42 kpc
Disk	$a_1$	5.81 kpc
	$a_2$	17.43 kpc
	$a_3$	34.86 kpc
	$b$	0.3 kpc
	$M_1$	$6.6 \times 10^{10} M_{\odot}$
	$M_2$	$-2.9 \times 10^{10} M_{\odot}$
	$M_3$	$3.3 \times 10^9 M_{\odot}$
Dark Halo (MPI)	$r_H$	12.36 kpc
	$\rho_0$	$0.01566 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$
	$V_{\text{Tot}}(R_{\odot})$	$196.003 \text{ km s}^{-1}$
	$R_{\text{vir}}/r_H$	20

Tabella 2.2: Valori dei parametri per ogni componente Galattica.

La distribuzione di massa Galattica dell'alone di DM è ancora incerta e ci sono diversi modelli in letteratura. La rappresentazione generale della distribuzione sferica di DM appartiene alla classe di profili radiali di densità di Zhao (*Zhao, 1996*):

$$\rho(r) = \frac{\rho_S}{\left(\frac{r}{r_H}\right)^{\gamma} \left[1 + \left(\frac{r}{r_H}\right)^{\alpha}\right]^{\frac{\beta-\gamma}{\alpha}}} \quad (2.6)$$

dove  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono tre parametri di pendenza e  $r_H$  e  $\rho_S$  sono due parametri di scala, per il raggio e la densità. Introducendo la normalizzazione del profilo generale (Eq. (2.6)) a  $r_H$ , il valore di  $\rho_S$  diventa:  $\rho_S = \rho(r_H)2^{\chi}$  con  $\chi = (\beta - \gamma)/\alpha$ . Questi modelli hanno una distribuzione di densità come legge di doppia potenza con pendenza limite  $-\gamma$  verso il centro dell' alone ( $r \rightarrow 0$ ) e  $-\beta$  verso l'esterno ( $r \rightarrow \infty$ ). All'interno di questa classe generale di distribuzione della DM, invece del classico profilo di densità Navarro-Frenk-White (NFW) (*Navarro et al., 1997*), viene assunto il profilo modificato pseudo-isotermo (MPI) (*Spano et al., 2008*) che è stato introdotto per ottenere le migliori interpolazioni delle curve di rotazione, ad alta risoluzione, nelle spirali e per le LSB (galassie a bassa luminosità superficiale), probabilmente dominate da DM. La scelta tra i due modelli precedenti per il profilo di densità dell'alone di DM rientra nella problematica, detta del "cusp/core", considerata in (*Bindoni, 2008*). Il MPI può essere espresso all'interno della formulazione generale dei profili di Zhao (Eq. (2.6)) con  $(\alpha, \beta, \gamma) = (2, 3, 0)$ . Il potenziale gravitazionale corrispondente è dato da:

$$\Phi_{DH}^{MPI}(r) = -4\pi G \rho_0 r_H^2 \left( \frac{\ln \left( r/r_H + \sqrt{1 + \left( \frac{r}{r_H} \right)^2} \right)}{r/r_H} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{r}{r_H} \right)^2}} \right) \quad (2.7)$$

con  $\rho_0$  densità centrale dell'alone oscuro. Per scegliere i valori adatti per i parametri  $\rho_0$  e  $r_H$ , seguiamo il modello proposto da *Klypin et al. (2002)*, in particolare il modello A1 (senza scambio di momento angolare), con redshift di formazione  $z_F$ . In una cosmologia CDM, con  $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  e  $\Omega_0 = 1$ , fissata la massa viriale dell'alone di DM in:  $M_{vir} = 10^{12} M_\odot$ , usando la subroutine di *Navarro et al. (1997)*, si ottiene:  $z_F = 2.68$  con il corrispondente valore di sovradensità  $\delta_c = 1.179 \times 10^5$  (in unità di densità critica a  $z = 0$ ) per il profilo di NFW. Quindi il profilo MPI è determinato assumendo che entrambi i profili raggiungano lo stesso valore della densità ai loro corrispondenti raggi scala  $r_H$ . Per concludere la modellazione della Galassia, si deve verificare se il *trend* della velocità circolare totale ottenuta sia in accordo con quello osservato nell'ambiente Solare. I valori forniti dal modello per la velocità circolare totale vicino al Sistema Solare sono inferiori al valore medio osservato di  $V_{tot}(R_\odot) = 220 \text{ km s}^{-1}$  (v. Tab. 2.2), ma si trovano all'interno della barra di errore misurata per queste distanze (*Klypin et al., 2002*). I contributi al *trend* di velocità circolare totale *vs.*  $r$ , dati dalle diverse componenti Galattiche, sono riportati nella Fig. 2.9. La distribuzione di massa, per ogni componente, è data in Fig. 2.10.

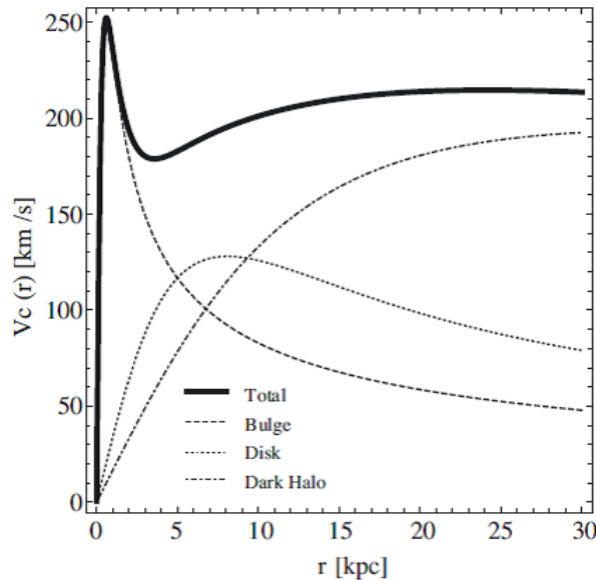


Figura 2.9: Contributi alla velocità circolare plottati contro  $r$  per le differenti componenti Galattiche. L'alone di DM ha un profilo MPI.

E' interessante notare come vedremo più avanti (Fig. 2.15) che, nel sistema di Hill, la componente di marea Galattica dovuta all'alone di DM diventa dominante

solo oltre i 15 kpc. Questo corrisponde, in Fig. 2.10, alla distanza in cui la massa dell'alone domina su quella delle altre componenti. Un discorso analogo si può fare per il bulge la cui massa domina sotto  $\simeq 6\text{kpc}$ , anche se l'effetto mareale, in questo caso, arriva fino a  $\simeq 7\text{kpc}$  (v. Fig. 2.15).

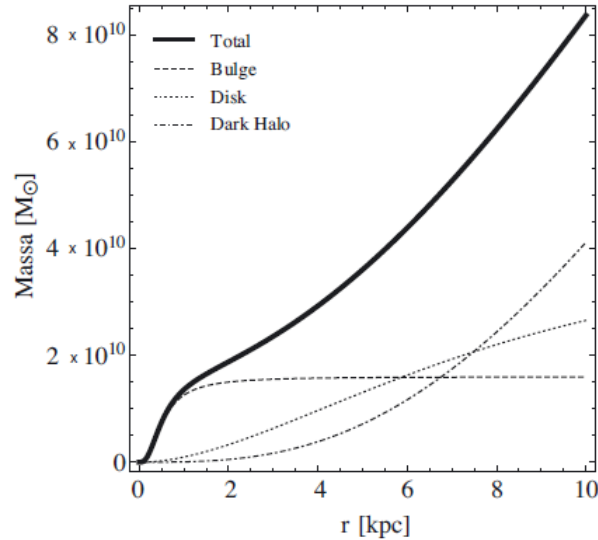


Figura 2.10: Contributi alla distribuzione di massa plottati contro  $r$  per differenti componenti Galattiche. L'alone di DM ha profilo MPI.

La modellazione del potenziale Galattico a questa distanza più piccola, risulta più critica per i nostri obiettivi rispetto ad una modellizzazione a grande distanza. Indubbiamente il modello dinamico di *Bovy & Rix (2013)*, basato su grandi insiemi di dati nello spazio delle fasi per singole stelle, deve essere considerato come un contributo molto importante per costruire il potenziale gravitazionale della Milky Way nel range  $4\text{kPC} \leq R \leq 9\text{kPC}$ . Il modello prevede un bulge di Hernquist con massa inferiore a quella tipicamente considerata, ma la loro curva di rotazione a  $R \geq 4\text{kPC}$  è comunque simile a quella ottenuta secondo *Binney & Tremaine (2008)*.

### 2.2.3 Sistema corotante in approssimazione di Hill

L'approssimazione di Hill (*Binney & Tremaine, 2008*) adatta il formalismo del problema ristretto dei tre corpi per il caso in cui la dimensione del sistema satellitare (es.: Sistema Solare) è molto più piccola di quella del sistema ospite (es.: la Galassia). La condizione precedente è adatta al nostro problema in cui il sistema Sole-cometa raggiunge la dimensione di circa 1 pc, mentre le distanze dal centro Galattico sono circa maggiori di tre ordini di grandezza. In questo tipo di situazione possiamo anche assumere che la variazione del potenziale gravitazionale lungo le orbite delle comete sia molto *soft*, rendendo possibile la *distant-tide approximation* (*Binney & Tremaine del 2008, cap. 8*); (*Appendice B*).

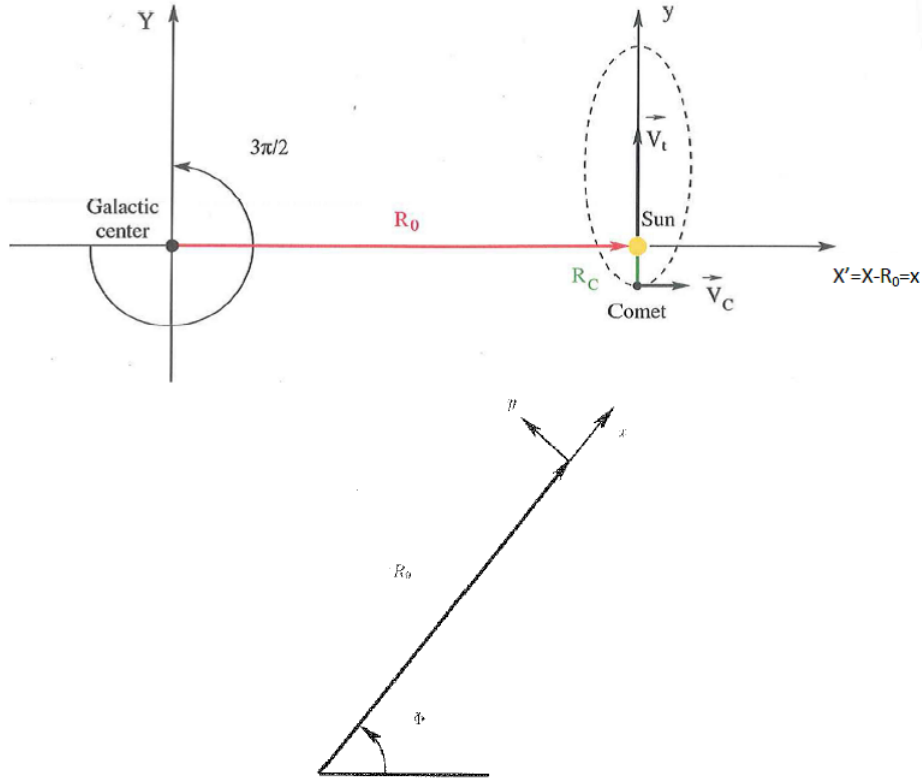


Figura 2.11: Immagine della posizione iniziale per un' orbita della cometa con longitudine galattica  $3\pi/2$  nel sistema di riferimento con l'origine sul centro Galattico  $(X, Y)$ . Sotto si evidenziano le coordinate rotanti  $(x, y)$  eliocentriche del sistema di riferimento sinodico usato in approssimazione di Hill (De Biasi, 2010).

L'approssimazione di Hill è svolta usualmente in sistemi sferici. Naturalmente il nostro problema non gode di questo tipo di simmetria per la presenza del disco. Così l'abbiamo riconsiderata in 3D modificando la simmetria del potenziale del sistema ospite da sferica ad assiale (v. *Appendice B*). Si segue l'analisi del moto della cometa nel sistema corotante centrato nel Sole dove il piano  $x$ - $y$  coincide con il piano orbitale stellare,  $\hat{e}_x$  indica la direzione dal centro del sistema ospite al Sole e  $\hat{e}_y$  quella del moto orbitale del satellite (v. Fig. 2.11). Questo sistema di riferimento è chiamato sinodico e ruota con frequenza  $\Omega_0 \equiv \Omega_0 \hat{e}_z$  e in questo sistema l'equazione dell'accelerazione della particella è descritta dall' Eq. (2.8) dove l'effetto della forza di Coriolis (secondo termine) è separato dall'effetto centrifugo (terzo termine) e dove  $\Phi_T$  è il potenziale totale agente sulla cometa considerata come particella di prova:

$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -\nabla \Phi_T - 2\Omega_0 \times \frac{d\mathbf{x}}{dt} - \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \mathbf{x}) \quad (2.8)$$

Il termine  $\Phi_T$  può essere scomposto in due parti come segue:

$$\nabla \Phi_T = \nabla \Phi_S + \sum_{j,k}^3 \Phi_{jk} x_k \hat{x}_j \quad (2.9)$$

con  $\nabla \Phi_S$ , uguale a  $GM_\odot/r^2$  nel caso solare, che rappresenta il contributo del



potenziale gravitazionale dovuto al sistema satellitare e il secondo termine che viene invece dalla *distant-tide approximation* mediante lo sviluppo in serie di Taylor del potenziale gravitazionale del sistema ospite  $\Phi(R, z)$  partendo dal centro di massa del sistema satellitare. Questo termine, sviluppato in un potenziale assisimmetrico, esprime la marea Galattica lungo le tre direzioni (x, y, z) come variazione (al secondo ordine) della forza gravitazionale esercitata dal sistema ospite, a partire dal Sole per la distanza Sole-cometa. Dal confronto con la precedente formulazione (*Heisler & Tremaine, 1986; Levison et al., 2001; Brassier et al., 2010*), l' Eq. (2.8) include il contributo della variazione della forza centrifuga alla marea Galattica ed inoltre la forza di Coriolis, così da ottenere il sistema completo di equazioni del moto della cometa, secondo *Binney & Tremaine (2008)*, in approssimazione di Hill. Nel nostro sistema di coordinate il centro del sistema ospite (Galassia) è in  $X' = (-R_0, 0, 0)$  e  $\Omega_0 = (0, 0, \Omega_0)$ . Introducendo il sistema di riferimento satellitare  $x = (x, y, z)$  (v. Fig. 2.11) (*Levison et al., 2001*), si ha che:  $\Phi_{xx} = \Phi''(R_0)$ ;  $\Phi_{yy} = \frac{\Phi'(R_0)}{R_0} \neq \Phi_{zz}$ ;  $\Phi_{xy} = \Phi_{xz} = \Phi_{yz} = 0$  (*Appendice B*). Esprimendo le equazioni del moto nel seguente modo:

$$\begin{aligned}\ddot{x}(t) &= 2\Omega_0\dot{y}(t) + [\Omega_0^2 - \Phi''(R_0)]x(t) - \frac{\partial\Phi_S}{\partial x} \\ \ddot{y}(t) &= -2\Omega_0\dot{x}(t) + \left[\Omega_0^2 - \frac{\Phi'(R_0)}{R_0}\right]y(t) - \frac{\partial\Phi_S}{\partial y} \\ \ddot{z}(t) &= -4\pi G\bar{\rho}z(t) - \frac{\partial\Phi_S}{\partial z}\end{aligned}\tag{2.10}$$

con  $\bar{\rho} = 0.1 M_\odot pc^{-3}$  densità nei dintorni Solari a  $z=0$  (*Brassier et al., 2010*). Si utilizza poi la relazione  $\Phi'(R_0) = R_0\Omega_0^2$ , grazie all'assunzione del moto circolare del Sole attorno al centro Galattico e si introducono le costanti di Oort:

$$\begin{aligned}A(R) &= \frac{1}{2} \left( \frac{v_c}{R} - \frac{dv_c}{dR} \right) = -\frac{1}{2} R \frac{d\Omega}{dR} \\ B(R) &= -\frac{1}{2} \left( \frac{v_c}{R} + \frac{dv_c}{dR} \right) = -\left( \Omega + \frac{1}{2} R \frac{d\Omega}{dR} \right)\end{aligned}\tag{2.11}$$

così che  $\Omega_0 = A - B$  è la velocità angolare di rotazione Galattica misurata alla distanza  $R = R_0$  dal centro Galattico.

### Contributi di marea in approssimazione di Hill

Come abbiamo detto, l'effetto dinamico completo della Galassia può essere espresso dalla somma dei potenziali del Bulge ( $\Phi_{BG}$ ), del disco ( $\Phi_D$ ) e dell'alone di materia oscura ( $\Phi_{DH}$ ), nel modo seguente: il potenziale gravitazionale totale è  $\Phi_G = \Phi_{BG} + \Phi_D + \Phi_{DH}$ ; inoltre grazie all'assunzione del movimento circolare del Sole, segue che

il corrispondente contributo alla velocità circolare e angolare da parte di ciascuna componente dinamica,  $V_{ci}$  e  $\Omega_{oi}$  rispettivamente, risulta:

$$\frac{v_{ci}^2}{R_0} = (-\nabla\Phi_i)_{R_0} = \Omega_{oi}^2 R_0; \quad i = BG, D, DH. \quad (2.12)$$

Nella prima equazione del sistema in Eq. (2.10), la seguente trasformazione vale per il termine tra parentesi quadre non appena ci si riferisca ad una specifica componente dinamica:

$$\Omega_{oi}^2 - \Phi_i'' = (-2\Omega_i\Omega_i'R)_{R_0} = 2\frac{v_{ci}^2}{R_0^2} \left(1 - \frac{d\ln v_{ci}}{d\ln R}\right)_{R_0} \quad (2.13)$$

La componente  $x$  di marea della Galassia risulta essere dipendente dal contributo alla velocità circolare di ogni componente Galattica e da quello dei suoi gradienti logaritmici; la componente  $y$  della marea della Galassia (seconda equazione nel sistema di Eq. (2.10)) è completamente compensata dalla corrispondente variazione della forza centrifuga lungo la coordinata  $y$  in modo che il termine tra parentesi

$$\Omega_{oi}^2 - \Phi_i'(R_0)/R_0 \quad (2.14)$$

risulta essere zero a prescindere dalla componente considerata. Dal sistema di Eq. (2.10), è chiaro che, per una particella a riposo nel sistema sinodico e in un potenziale cilindrico, la marea planare per unità di lunghezza è dovuta soltanto alla differenza tra la variazione, lungo l'asse  $x$ , della accelerazione centrifuga e da quella gravitazionale dovuta al sistema ospite (il termine tra parentesi quadre nella prima equazione del sistema di Eq. (2.10)). Viceversa la componente analoga lungo l'asse  $y$  è completamente compensata. Quest'ultima formulazione ha un notevole vantaggio: se l'obiettivo è il contributo Galattico totale della marea, abbiamo solo un sistema di equazioni differenziali da integrare. Infatti il contributo di tutte le componenti Galattiche si trova all'interno delle velocità angolare totale  $\Omega_0$  grazie alla additività dei potenziali e per l'assunzione del movimento circolare del Sole sul piano Galattico. Un sistema di equazioni analogo vale comunque per ogni componente Galattica, permettendo di evidenziare lo specifico contributo dinamico di ciascuna di esse alla marea totale.

## 2.2.4 Effetto della marea Galattica su un ammasso globulare

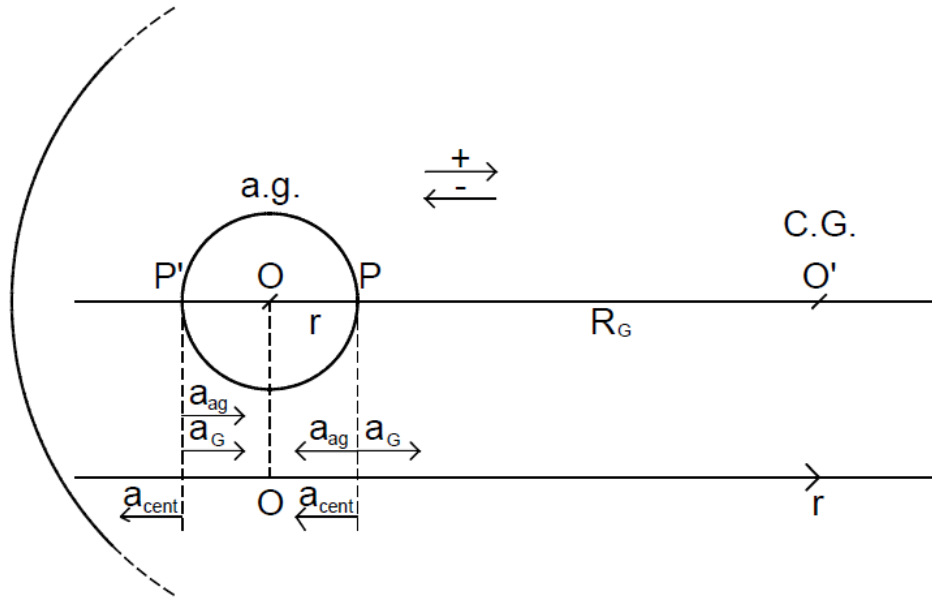


Figura 2.12: L'effetto della marea della Galassia su un ammasso globulare, v. Tab. 2.3.

Cerchiamo di capire la *marea* con un esempio molto efficace (Secco, 2016). Consideriamo un ammasso globulare (a.m.) centrato in  $O$  ad una certa distanza dal centro della Galassia ( $G$ ) centrata in  $O'$  e riportiamo in Tab. 2.3 la legenda della Fig. 2.12.

C.G.	centro Galattico
a.g.	ammasso globulare
$R_G = OO'$	distanza del centro dell' a.g. dal C.G.
$OP = r$	raggio dell' a.g.
$m_{ag}$	massa dell' a.g.
$M_G(R_G)$	Massa della Galassia entro la sfera di raggio $R_G$
$a_{ag}$	accelerazione sul punto P dall'ammasso
$a_G$	accelerazione sul punto P dalla Galassia
$a_{cent.}$	accelerazione centrifuga sul punto P
$M_G(R_G) \simeq M_G(R_G - r)$	perchè $r \ll R_G$

Tabella 2.3: Legenda della Fig. 2.12.

Consideriamo l'accelerazione nel punto P come somma dell'accelerazione dovuta all'ammasso globulare ( $a_{ag}$ ), alla Galassia ( $a_G$ ) e alla componente centrifuga ( $a_{cent.}$ ) per la rotazione dell'ammasso attorno al centro Galattico:

$$a(P) = a_{ag} + a_G + a_{cent.} = -\frac{Gm}{r^2} + \frac{GM_G}{(R_G - r)^2} - \Omega^2(R_G - r) \quad (2.15)$$

Nel punto  $O$  si ha l'equilibrio centrifugo:  $\frac{GM_G}{R^2} = \Omega^2 R_G$ . Raccolgo  $R_G^2$  nel termine di  $a_G$  e  $R_G$  nel termine di  $a_{cent.}$  della Eq. (2.15):

$$a(P) = -\frac{Gm}{r^2} + \frac{GM_G}{R_G^2(1 - \frac{r}{R_G})^2} - \Omega^2 R_G(1 - \frac{r}{R_G}) \quad (2.16)$$

Essendo  $r/R_G \ll 1$ , applico lo sviluppo in serie per il binomio di Newton  
 $\frac{1}{(1 - \frac{r}{R_G})^2} \simeq 1 + \frac{2r}{R_G}$ .

L'Eq. (2.16) diventa:

$$\begin{aligned} a(P) &\simeq -\frac{Gm}{r^2} + \frac{GM_G}{R_G^2} \left(1 + \frac{2r}{R_G}\right) - \Omega^2 R_G \left(1 - \frac{r}{R_G}\right) = \\ &= -\frac{Gm}{r^2} + \frac{GM_G}{R_G^2} \left(1 + \frac{2r}{R_G}\right) - \frac{GM_G}{R_G^2} \left(1 - \frac{r}{R_G}\right) = \\ &= -\frac{Gm}{r^2} + \frac{GM_G}{R_G^2} \left(1 - 1 + \frac{2r}{R_G} + \frac{r}{R_G}\right) = -\frac{Gm}{r^2} + \frac{3r}{R_G^3} GM_G \end{aligned} \quad (2.17)$$

Questa formula può essere scritta in tre termini nel seguente modo

$$a(P) \simeq -\frac{Gm}{r^2} + 2r \frac{GM_G}{R_G^3} + r \frac{GM_G}{R_G^3} \quad (2.18)$$

così da evidenziare la variazione della forza di gravità Galattica su unità di massa (accelerazione) passando da  $R_G \rightarrow R_G - r$  (secondo addendo dell'Eq. (2.18)) e la variazione della forza centrifuga (accelerazione) passando da  $R_G \rightarrow R_G - r$  a parità di  $\Omega$  (terzo addendo dell'Eq. (2.18)). Infatti,  $F_G = -GM_G/R_G^2$  derivata rispetto a  $R_G$  fornisce  $dF_G/dR_G = 2\frac{GM_G}{R_G^3}$  che con  $\Delta R_G = R_G - r$ , ridà il secondo termine della Eq. (2.18) e cioè  $(dF_G/dR_G)\Delta R_G = 2\frac{GM_G}{R_G^3}r$  (per unità di massa), mentre  $F_{cent.} = \Omega^2 R_G$  derivata rispetto a  $R_G$  fornisce  $dF_{cent.}/dR_G = \Omega^2$  e moltiplicando per  $\Delta R_G$  dà il terzo termine della Eq. (2.18):  $(dF_{cent.}/dR_G)\Delta R_G = \Omega^2 \Delta R_G$ , (per unità di massa). Si vede allora che se al posto dell'ammasso galattico considero il Sole, la accelerazione nel punto P (punto della cometa soggetta alla accelerazione del Sole, della Galassia e centrifuga), e se P dista r dal Sole, la (2.18) fornisce la prima formula dell'Eq. (2.10), con  $a(P) \rightarrow \ddot{x}(t)$ :

$$\ddot{x}(t) = 2\Omega_0 \dot{y}(t) + [\Omega_0^2 - \Phi''(R_0)]x(t) - \frac{\partial \Phi_S}{\partial x} \quad (2.19)$$

dove il primo termine è la accelerazione di Coriolis, il secondo,  $[-\Phi''(R_0) + \Omega_0^2]x(t)$ , fornisce la variazione dell' accelerazione della Galassia quando ci si sposta dal Sole a "x" più la variazione dell' accelerazione centrifuga dal Sole a "x". Trascurando la componente dovuta a Coriolis, si nota che:

$$\ddot{x}(t) = -\frac{\partial \Phi_S}{\partial x} + [-\Phi''(R_0) + \Omega_0^2]x(t) \quad (2.20)$$

e che:

$$a(P) \simeq -\frac{Gm}{r^2} + \left[ \frac{dF_G}{dR_G} r + \Omega^2 r \right] \simeq -\frac{Gm}{r^2} + \left[ \frac{dF_G}{dR_G} + \Omega^2 \right] r \quad (2.21)$$

Dal confronto dell'Eq. (2.20) con l'Eq. (2.21) si vede che corrispondono e che i termini  $\frac{dF_G}{dR_G} + \Omega^2$  e  $-\Phi''(R_0) + \Omega_0^2$  sono entrambi termini di marea per unità di lunghezza. La marea è la somma algebrica della variazione della accelerazione di gravità Galattica più quella centrifuga. Calcoliamo ora l'accelerazione in P'; segno positivo verso destra (v. Fig. 2.12):

$$\begin{aligned} a(P') &= a_{ag} + a_G + a_{cent.} = +\frac{Gm}{r^2} + \frac{GM_G}{(R_G - r)^2} - \Omega^2(R_G - r) \simeq \quad (2.22) \\ &\simeq \frac{Gm}{r^2} + \frac{GM_G}{R_G^2} \left(1 - \frac{2r}{R_G}\right) - \Omega^2 R_G \left(1 + \frac{r}{R_G}\right) = \\ &= \frac{Gm}{r^2} + \frac{GM_G}{R_G^2} \left(1 - 1 - \frac{2r}{R_G} - \frac{r}{R_G}\right) = \frac{Gm}{r^2} - \frac{3r}{R_G} GM_G \end{aligned}$$

Dall'ultimo pezzo dell'Eq. (2.22) si nota che la marea è opposta a quella di prima ( $-\frac{3r}{R_G} GM_G$ ). Infatti in P la gravità della Galassia è più alta che in O e la forza centrifuga troppo bassa per compensarla. In P' la gravità della Galassia è più bassa che in O e la forza centrifuga troppo alta per essere compensata.

E' interessante notare che ponendo:  $a(P) = a(P') = 0 \rightarrow \frac{Gm}{r^2} = \frac{3rGM_G}{R_G^3}$ , si ottiene:

$$r = r_{tidal} = \sqrt[3]{\frac{1}{3} \frac{m}{M_G}} R_G \quad (2.23)$$

Il raggio ricavato viene detto anche raggio di *von Hoerner (1958)*, raggio di Hill, raggio di Jacobi o raggio di Roche per ammassi globulari: entro quel raggio domina l'azione dell'ammasso mentre, oltre, quella della Galassia (v. *Appendice A*).

### 2.2.5 Discussioni e osservazioni sugli effetti di marea a diverse distanze

Le crescenti evidenze circa la possibilità di una migrazione del Sole e la scoperta di differenti esopianeti nella Galassia, permettono di affrontare molti studi sulle conseguenze che un ambiente Galattico diverso da quello riferito al Sistema Solare attuale, può produrre su un sistema planetario come il nostro ed eventualmente su una nube cometaria analoga a quella di Oort attorno ad esso. *Brasser et al. (2010)* hanno indagato sui processi di formazione e sulla struttura interna della Nube di Oort mediante simulazioni numeriche, per le diverse collocazioni del Sole (2, 8, 14 e 20 kpc). L'importanza cruciale della collocazione rispetto al centro della Galassia è

anche sottolineata in *Veras & Evans (2013)*, che hanno messo in evidenza l'effetto non trascurabile delle componenti planari della marea Galattica sulla dinamica di un sistema planetario, collocato a distanze inferiori di 3,5 kpc. Anche nel lavoro di *De Biasi et al. (2015)* ci si concentra sull'evoluzione delle comete sotto l'effetto di una marea Galattica prodotta da un ambiente diverso da quello attuale Solare, per capire come una diversa collocazione di un sistema planetario possa influenzare il processo di iniezione cometario a causa della marea Galattica. Si studiano gli effetti della marea Galattica planare sulle orbite delle comete a seconda del valore dei tre parametri principali: la distanza dal centro Galattico della stella, la longitudine Galattica e la direzione di movimento dell'orbita della cometa. L'effetto principale della marea Galattica è la variazione del perielio che si manifesta sia attraverso la precessione dell'asse maggiore che con la variazione della distanza del perielio  $q$ . Per verificare l'influenza della distanza dal centro Galattico su  $q$ , *De Biasi et al. (2015)* hanno integrato l'orbita con gli stessi valori iniziali indicati precedentemente con longitudine =  $3\pi/2$ , moto diretto, per le distanze  $r = 4$  e  $8$  kpc, decomponendo la perturbazione di marea totale nei contributi dei singoli componenti Galattici. I due valori limite di 4 e 8 kpc sono stati scelti per tener conto che il Sole (o la stella centrale nelle analoghe nubi di Oort) potrebbe aver subito una migrazione a causa dell'effetto dei bracci a spirale. Il contributo maggiore della perturbazione è causato dal disco Galattico a 8 kpc (Fig. 2.13). L'effetto totale della perturbazione Galattica di marea aumenta verso il centro della Galassia (Fig. 2.14). Inoltre, per un'orbita cometaria più vicina al centro Galattico (4 kpc), l'effetto maggiore sul perielio è dovuto al bulge, mentre il disco ha solo un effetto secondario. Questo risultato è quasi completamente indipendente dal sistema di riferimento considerato ed è riportato per il sistema eliocentrico in approssimazione di Hill. Per capire come il ruolo dei diversi componenti Galattici cambi con la distanza, questo sistema è quanto mai adatto. In esso siamo in grado di vedere chiaramente quale sia il *trend* della marea per le varie componenti dinamiche. Il termine di marea tra parentesi quadre nella prima equazione del sistema Eq. (2.10) ci dà la componente  $x$  di marea Galattica (la componente  $y$  è sempre compensata) separata in ogni componente Galattica dall' Eq. (2.13). In Fig. 2.15 si vede il contributo alla marea Galattica totale, dovuto separatamente al bulge, disco e alone di DM. La marea data dal bulge domina fino a circa 7 kpc dal centro, quella del disco è prevalente nel range di circa: 7-15 kpc, mentre per le più grandi distanze Galattiche l'alone di DM ha l'effetto di marea dominante rispetto a quelli precedenti. È notevole che si possa prevedere quale sarà la componente Galattica che produce l'effetto di marea più intenso anche sulle analoghe nubi di Oort, intorno a nuovi sistemi planetari extrasolari, semplicemente guardando la posizione della sua stella centrale, sul plot di Fig. 2.9, tradotto dall' Eq. (2.13) in quello di Fig. 2.15, che può portare a una ridefinizione dei confini per la zona abitabile galattica. Tutto questo indipendentemente dalla massa della stella

centrale, dalla longitudine della cometa e dalla direzione di rotazione.

*De Biasi et al. (2015)* hanno anche testato la dipendenza degli effetti mareali dalla longitudine Galattica e dalla direzione di rotazione. Gli effetti di marea risultano essere diversi per le orbite delle comete, dirette o retrograde (Fig. 2.16). Infatti, per le orbite con le stesse condizioni iniziali, la marea Galattica può causare un aumento o una riduzione della distanza del perielio, con una variazione associata della forma orbitale dovuta alla perturbazione dell'eccentricità, a seconda della direzione di rotazione. Al fine di quantificare questa variazione in funzione della longitudine galattica e della direzione del movimento, gli autori hanno calcolato la distanza media del perielio,  $\bar{q}_G(t)$ , facendo la media su un tempo di integrazione di 1 Gyr (*Komar et al., 2009*), per le diverse longitudini e moto sia diretto che retrogrado:

$$\bar{q}_G(t) = \frac{1}{t} \int_0^t q_G(t) \quad (2.24)$$

dove  $q_G(t)$  è la distanza istantanea del perielio. L'analisi mostra una forte dipendenza della variazione di distanza del perielio della cometa sulla combinazione di longitudine Galattica e direzione del movimento. Come mostrato in Fig. 2.16, le orbite delle comete con la stessa longitudine Galattica, ma direzione opposta del movimento, hanno segni opposti per la variazione media del perielio. Si noti che questa dipendenza è più forte quando il sistema Sole-cometa si avvicina al centro Galattico.

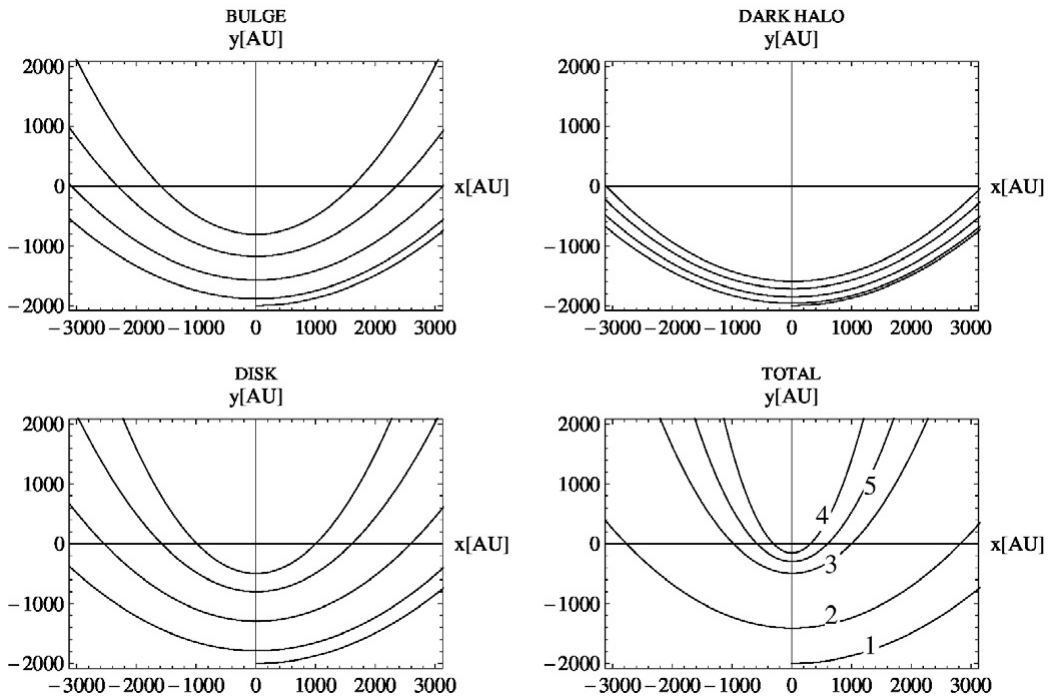


Figura 2.13: Zoom della zona del perielio per l'orbita della cometa a 8 kpc dal centro Galattico (approssimazione di Hill). Sono mostrati i diversi contributi delle componenti Galattiche alla variazione del perielio. L'ordine di sequenza-tempo è caratterizzato da numeri nel caso "Total" (*De Biasi et al., 2015*).

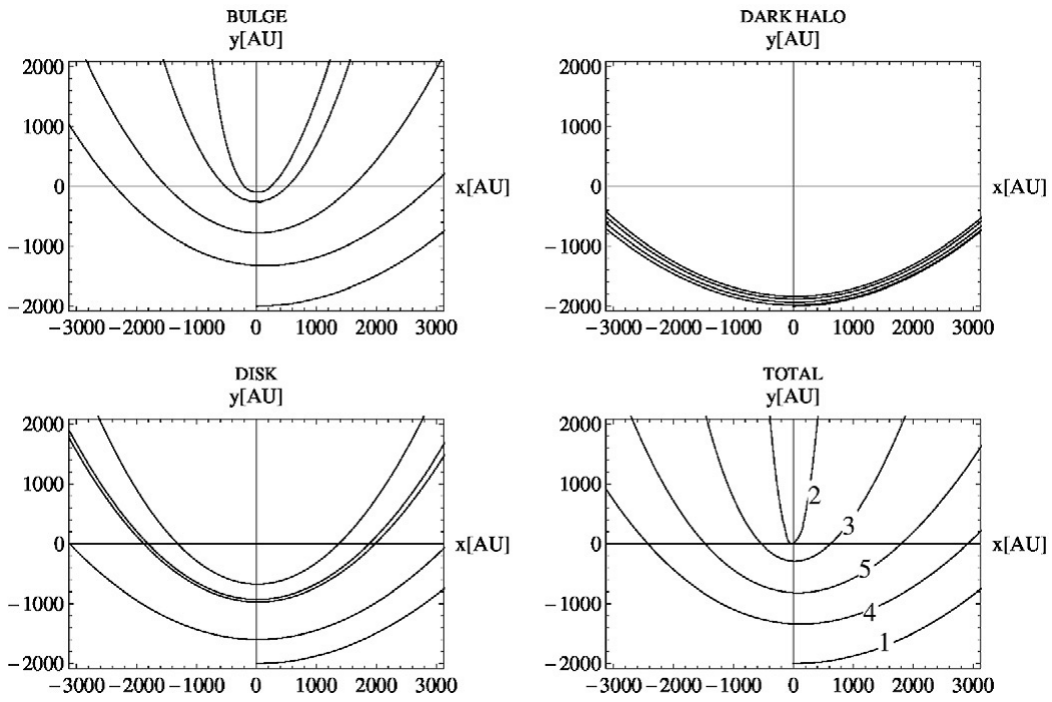


Figura 2.14: Zoom della zona perielio per l'orbita della cometa a 4 kpc dal centro Galattico (approssimazione di Hill). Sono mostrati i diversi contributi delle componenti Galattiche alla variazione del perielio. L'ordine di sequenza-tempo è contrassegnato da numeri nel caso "Total" (*De Biasi et al., 2015*).

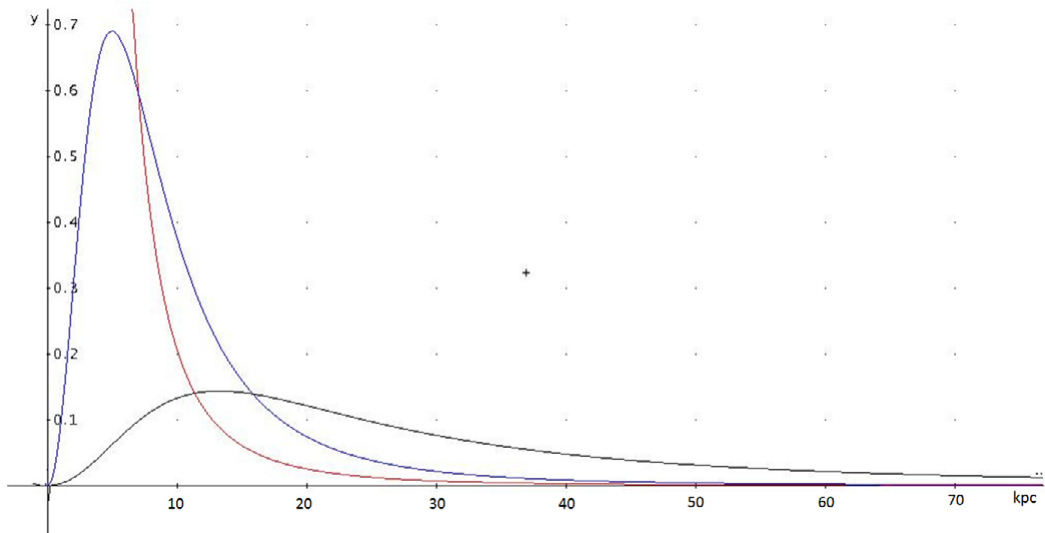


Figura 2.15: Componenti di marea Galattica: da bulge (rosso), disco (blu), alone di DM (grigio), in funzione della distanza dal centro Galattico (in kpc). Il bulge domina fino a circa 7 kpc, il disco nel range di 7-15 kpc, l' alone DM oltre 15 kpc. Un fattore di amplificazione di  $10^3$  è stato utilizzato sull' asse y (*De Biasi et al., 2015*).



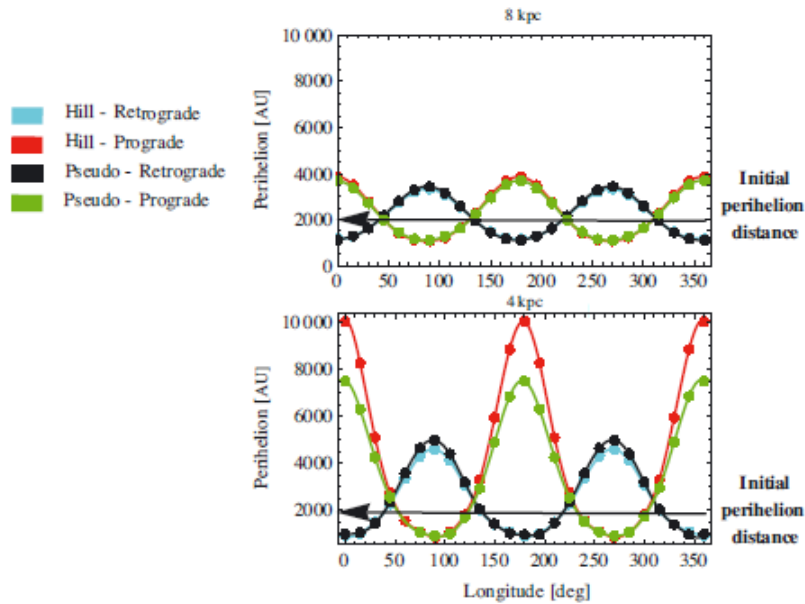


Figura 2.16: Andamento medio del perielio per le diverse distanze ( $R_0 = 4, 8$  kpc) dal centro Galattico in funzione della longitudine per le due diverse direzioni di movimento; vengono evidenziate anche le differenze dei risultati fra i sistemi di riferimento (v. *De Biasi et al., 2015*).

Queste caratteristiche non sono facili da spiegare analiticamente a causa del fatto che il problema (a tre corpi) è tipicamente non lineare. E' importante sottolineare come, ancor prima delle procedure di calcolo, la Fig. 2.15 riesca a definire le intensità relative delle componenti di marea che entrano in gioco in funzione della distanza della stella dal centro Galattico; cosa che viene confermata dalla Fig. 2.13 e dalla Fig 2.14, costruite con metodi di calcolo sofisticati dagli autori: a 8 kpc l'effetto mareale del disco accorcia il perielio, mentre a 4 kpc è l'effetto mareale del bulge che accorcia il perielio. Inoltre, nella Fig. 2.15 non si richiede nè la longitudine nè il verso di rotazione (diretto o retrogrado) della cometa, ne la massa della stella centrale.

## 2.2.6 Conclusioni sugli effetti mareali

La Nube di Oort, a causa della sua posizione periferica all'interno del nostro sistema planetario, è particolarmente sensibile all'azione delle maree della Galassia soprattutto quando il Sole (o la stella centrale) si trova più vicino al centro Galattico. La distribuzione reale cometaria, così fortemente concentrata attorno ad un semi asse maggiore  $a \simeq 10^4 AU$ , potrebbe essere il risultato di un forte impoverimento della popolazione cometaria già avvenuto per effetto dell'iniezione di comete nel tempo prodotta dalla migrazione del Sole dall'interno della Galassia verso la posizione attuale. *De Biasi et al. (2015)* hanno costruito le orbite di nubi cometarie, attorno a una stella con la stessa massa del Sole, ma con posizioni diverse nella Galassia. In conclusione si può affermare che:

- i) il disco ha forte peso nella perturbazione per la distanza Solare attuale;
- ii) le maree planari Galattiche diventano molto più efficaci nel perturbare le comete non appena la stella centrale si avvicina al centro Galattico;
- iii) fino a circa 7 kpc domina ancora la marea del bulge;
- iv) gli effetti diversi sulla cometa per diverse longitudini Galattiche e differenti versi di rotazione indicano che la distanza del perielio e la forma delle orbite sono fortemente influenzate da questi due fattori.

L'andamento medio del perielio (Fig. 2.16) presenta una sorprendente regolarità in funzione della longitudine dell'orbita con un periodo sinusoidale pari a  $\pi$  in longitudine in direzione prograda di movimento. In direzione opposta c'è una variazione di fase di  $\pi/2$  in longitudine rispetto al *trend*. Tutti i tre parametri analizzati: distanza, longitudine e direzione di rotazione sembrano giocare un ruolo importante per una discussione completa sulla perturbazione della marea Galattica sulle orbite delle comete.

E' interessante sovrapporre le immagini di Fig. 2.15 e di Fig 2.2, per capire quali siano le componenti di marea che entrano in gioco sulla GHZ in funzione della distanza dal centro Galattico (Fig. 2.17); i limiti delle componenti mareali sono indipendenti dalla massa della stella centrale, dalla longitudine dell'orbita cometaria e dal verso di percorrenza.

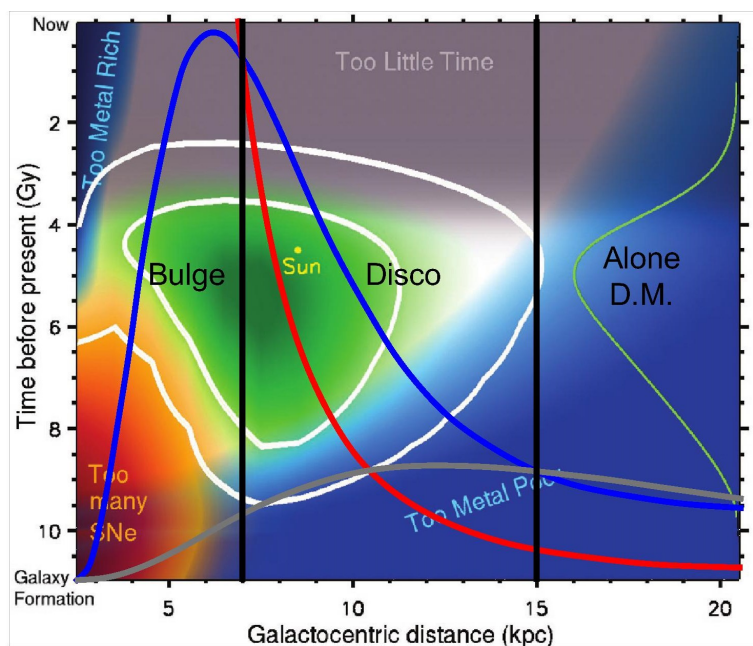


Figura 2.17: Sovrapposizione delle immagini in Fig. 2.15 e con quelle Fig. 2.2: si evidenzia l'immediato contributo sulla GHZ di ogni componente di marea Galattica in funzione della distanza dal centro Galattico, bulge (linea rossa) fino a 7 kpc, disco (linea blu) da 7 a 15 kpc e alone di DM (linea grigio scura) da 15 kpc in su.

Inoltre, data l'importanza della migrazione Solare per il concetto di abitabilità, è bene verificare e quantificare il valore della marea nelle zone più interne della

Galassia, dove il Sole ha iniziato, probabilmente, la sua formazione. A tal proposito, calcoli precisi, in base al gradiente di metallicità, vengono riportati nel Cap. 3.

Qui di seguito, invece, avendo ricostruito, semplicemente con *Derive 6.0*, i grafici che hanno portato *De Biasi et al. (2015)* alla Fig. 2.15, siamo riusciti a valutare il contributo della marea del bulge a 3 e a 6 kpc, per calcolare il suo effetto rispetto a quello nella posizione corrente Solare di 8 kpc. Dalla velocità circolare dovuta al bulge (Fig. 2.18), al disco (Fig. 2.19) e all'alone (Fig. 2.20), abbiamo ricostruito la Fig. 2.21 che rappresenta tutte le componenti di marea, in base alla distanza dal centro Galattico. Questa, poi, è stata ingrandita (Fig. 2.22) per valutare il valore della componente di marea del bulge e del disco a 3 e a 6 kpc.

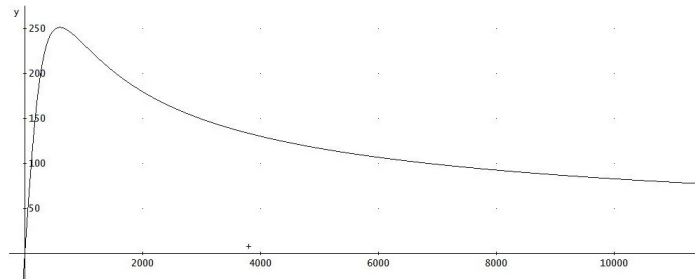


Figura 2.18: Velocità circolare dovuta al bulge Galattico.

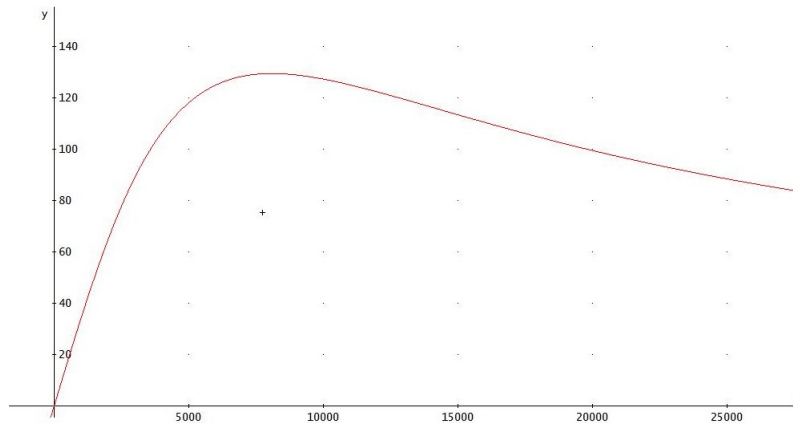


Figura 2.19: Velocità circolare dovuta al disco Galattico.

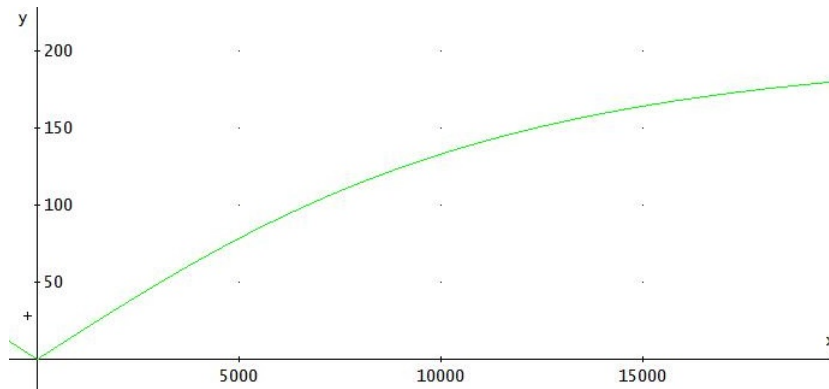


Figura 2.20: Velocità circolare dovuta all'alone Galattico.

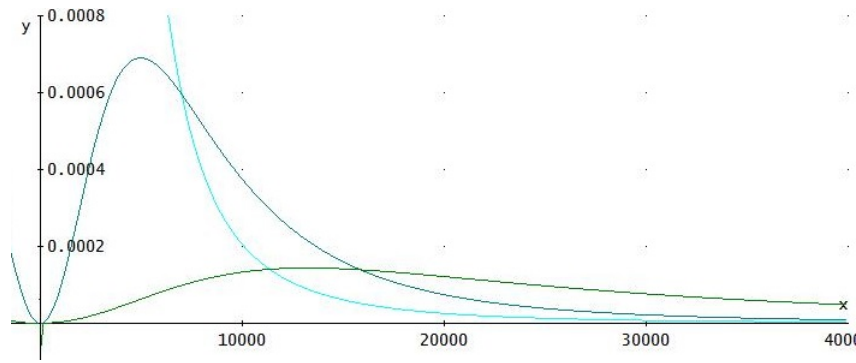


Figura 2.21: Riproduzione delle componenti di marea della Galassia della Fig. 2.15: disco (blu), bulge (verde acqua), alone (verde scuro), a partire dai *trend* di velocità circolari delle Fig.re (2.18, 2.19, 2.20).

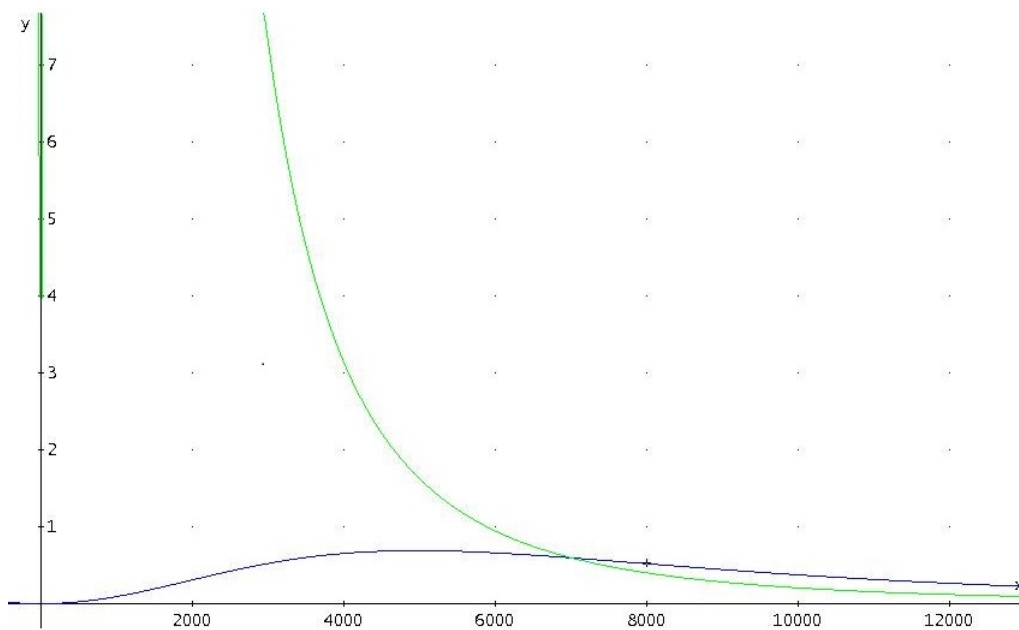


Figura 2.22: Marea del bulge (verde) e del disco (blu) riscalata per i nostri scopi fra 3-6 kpc.

Si ricava, quindi, che l'effetto di marea del bulge a 3 kpc risulta aumentato di un fattore pari a  $x=13.47$  e a 6 kpc, invece, è  $x=1.79$  rispetto al valore della marea a 8 kpc. E', perciò, evidente che il grande effetto mareale dovuto al bulge nelle zone più interne della Galassia può portare a variazioni importanti sulle orbite delle comete della Nube di Oort, generando iniezioni cometarie nella zona dei pianeti interni del Sistema Solare, le quali potrebbero avere conseguenze rilevanti per ridefinire i limiti della GHZ.

## 2.3 Conclusioni sulla GHZ

Anche se i limiti della GHZ della nostra galassia sono difficili da definire in modo inequivocabile, le indagini da noi riportate coprono un buon ventaglio di conoscenze

raccolte in questi ultimi anni. Le probabilità viste dai vari autori, hanno fornito preziose informazioni per cercare di rendere sempre più precisi i valori dei bordi, interno ed esterno, della GHZ: a seconda della posizione dal centro Galattico considerata, *Lineaweaver et al. (2004)* e *Prantzos et al. (2006)* hanno dato una serie di parametri per valutare tali limiti come metallicità, possibilità di sopravvivere ad eventi di esplosioni di supernove, un giusto tempo per sviluppare la Vita complessa, la possibilità di sopravvivere alla presenza di pianeti giganti gassosi; ciò definisce un *range* per la GHZ tra i 4 e gli 11 kpc.

Grazie, poi, al lavoro di *De Biasi et al. (2015)*, si è potuto valutare l'importanza dei vari effetti perturbativi delle componenti di marea a seconda della distanza dal centro Galattico, sulla Nube di Oort e sistemi analoghi, dando degli elementi aggiuntivi per definire meglio la GHZ. Il *pericolo effettivo* dell'iniezione cometaria verso i pianeti interni di un sistema planetario, dovuta alla marea, verrà ripreso nella Sez. 3.3. Inoltre, in vista di quanto verrà trattato nella Sez. 3.2, abbiamo ritenuto opportuno calcolare il valore della marea del bulge a distanze di 3 e 6 kpc, data la possibilità, che in tali zone, possa essersi formato il nostro Sole e da lì poi possa aver migrato verso l'attuale posizione di circa 8 kpc (v. Sez. 3.3.1-3.3.2).

# Capitolo 3

## Metallicità della Galassia

Scopo di questo capitolo è quello di comprendere quale potrebbe essere stata la posizione iniziale del Sole: se all'interno o no della GHZ. E' infatti molto probabile che la sua distanza dal centro Galattico, al momento della formazione, non sia stata quella attuale di  $\simeq 8 \text{ kpc}$ , dato che la sua metallicità è di circa 20% in più di quanto compete a quella posizione (Fig. 2.1, Fig. 3.1, Fig. 3.2). Guardando infatti anche solo la Fig. 2.1 presa da *Lineweaver et al (2004)*, si vede che, all'epoca di formazione, circa 4.5 Gyr rispetto ad ora, la curva che corrisponderebbe al Sole è sotto di 0.1 dex rispetto a quella Solare di riferimento. Se individuiamo con  $R_0$  questa posizione spazio temporale, si avrà che:

$$\log \left( \frac{Fe}{H} \right)_{R_0} - \log \left( \frac{Fe}{H} \right)_{R_\odot} = -0.1 \quad (3.1)$$

il che significa una

$$\frac{(Fe/H)_{R_0} - (Fe/H)_{R_\odot}}{(Fe/H)_{R_\odot}} \simeq -0.20 \quad (3.2)$$

cioè un 20% in meno in  $R_0$  rispetto a  $R_\odot$ . Se partiamo da una metallicità Solare,  $Z_\odot = 0.0126$  (*Naab & Ostriker, 2006*), risulta infatti che:  $Z_{R_0} = 10^{-0.1} Z_\odot = 0.01$ , come nella Fig. 2.1 tratta da *Lineweaver et al. (2004)*. Quindi una variazione di 0.1 dex corrisponde ad una variazione in  $Z$  del 20%. Questo dai modelli; la Fig. 3.1 e la Fig. 3.2 riportano, invece, le osservazioni (*Pagel, 1997*). Il problema della metallicità della Galassia e del suo gradiente, ancora oggi, è senza una precisa risposta; molte le incertezze e molti i dubbi, sia sul suo valore, presente e passato, sia sulla sua evoluzione. Nel passato la pendenza del gradiente potrebbe essere stata più ripida o più piatta di quanto sia oggi valutata. Ad esempio: se il Sole, come sembrerebbe, avesse davvero migrato da una zona più interna della Galassia alla posizione attuale, come calcolare il gradiente di metallicità della Galassia stessa? Se molte stelle avessero trascorso parte della loro evoluzione vagabondando per il disco, una specifica valutazione ed evoluzione del gradiente sarebbe assai difficile. A fronte di tali incertezze, vi è tuttavia una coerenza intrinseca nei modelli chimico-dinamici

reperibili in letteratura. Il confronto tra i modelli ed alcuni dati osservativi specifici può essere critico, ma il confronto tra alcuni *output* dei vari modelli (ad esempio riguardanti i "trends") può essere molto significativo.

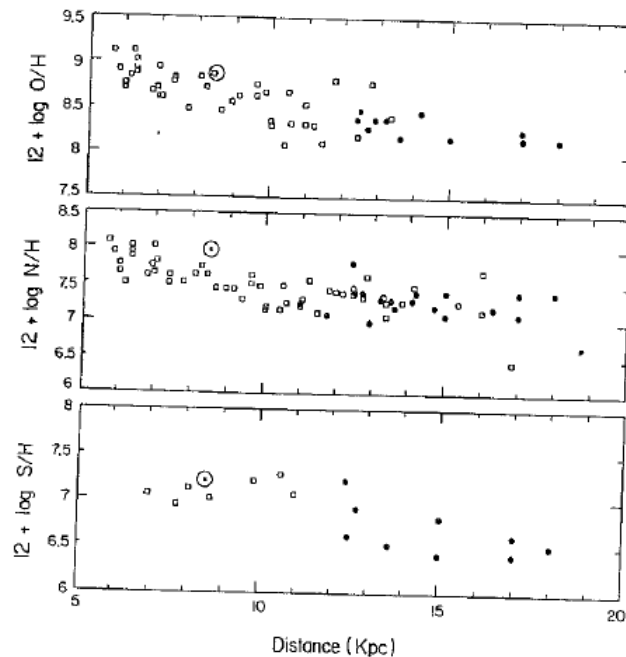


Figura 3.1: Abbondanze chimiche nelle regioni galattiche HII, in funzione della distanza Galattocentrica, con il Sole mostrato per il confronto. Adattato da *Shaver et al. (1983)*, *Fitch & Silkey (1991)* e *Vilchez & Esteban (1996)* (v. *Pagel, 1997*).

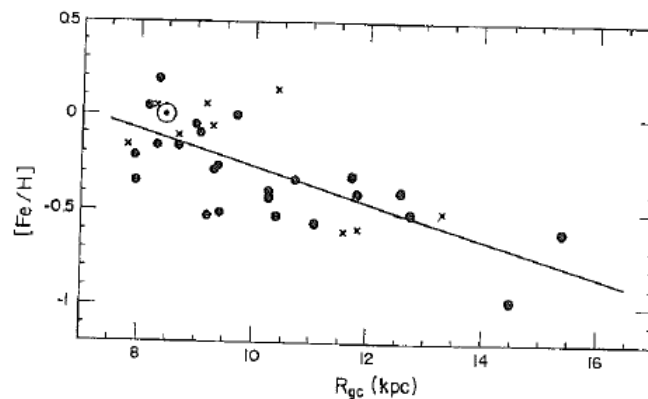


Figura 3.2: Abbondanza di Ferro in ammassi aperti di età intermedia come funzione della distanza Galattocentrica, con il Sole come confronto. La linea corrisponde ad un gradiente di  $-0.1 \text{ dex kpc}^{-1}$ ; adattato da *Friel & Janes (1993)* (v. *Pagel, 1997*).

Costruire il gradiente di metallicità del disco sottile della Galassia non è un compito facile. Anche il modello più semplice ha a che fare con:

- i) la storia di formazione del disco della Galassia all'interno dell'ambiente cosmologico;
- ii) la sua evoluzione dinamica;

iii) la locale prescrizione di formazione stellare;

iv) l'evoluzione chimica standard, una volta assunta una determinata funzione iniziale di massa e un modello per l'evoluzione spettrale delle popolazioni stellari.

Da un lato la descrizione di tanti processi fisici che compongono l'intero quadro, necessita l'introduzione di molti parametri, dall'altro lato il confronto con le osservazioni, abbinate a tali parametri, ha un grande *spread*. Ci sono molti buoni modelli che considerano l'evoluzione cosmologica, dinamica e chimica (*es.*: Pagel, 1997; Portinari & Chiosi, 1999; Chiappini et al., 2001; Fenner & Gibson, 2003; Lineweaver et al., 2004; Naab & Ostriker 2006; Piovan et al., 2011) e che sono in grado di riprodurre in modo coerente la funzione di distribuzione di metallicità media (MDF) e il rapporto età-metallicità (AMR).

### 3.1 Il modello di Naab e Ostriker (2006)

Naab & Ostriker (2006) presentano un modello relativamente semplice per l'evoluzione delle galassie a disco. Adottano tre numeri provenienti dalle osservazioni del disco della Via Lattea:  $\Sigma_d$  il valore locale della densità superficiale di massa,  $r_d$  la lunghezza di scala stellare (assunto il disco esponenziale),  $v_c$  il valore della velocità circolare di rotazione, assunta una curva piatta. Inoltre, considerano la dinamica di formazione stellare da Kennicutt,  $SFR(M_\odot/yr) = 7.7 \cdot 10^{-42} L(H_\alpha)$  (Kennicutt, 1998), con  $L(H_\alpha)$  luminosità in  $H_\alpha$ , le equazioni di evoluzione chimica standard, assumendo una funzione di massa iniziale (IMF) di Salpeter e un modello per l'evoluzione spettrale di popolazioni stellari (che qui non tratteremo). Tutto questo determina l'evoluzione dettagliata del modello con la sola aggiunta delle scale cosmologiche standard (v. Sez. 3.1.1). Ne segue una ricchezza sorprendente di specifiche dettagliate anche per il *tasso di infall* gassosi in funzione del raggio e del tempo, la distribuzione in età delle stelle e loro metallicità, sempre in funzione del tempo e del raggio, profili di luminosità superficiale, per la Galassia, a diverse lunghezze d'onda, colori e altro ancora.

Negli ultimi dieci anni, i modelli di evoluzione chimica sono stati utilizzati per esplorare la formazione della Galassia e per tentare di riprodurre le proprietà dei dintorni del Sole, gradienti di abbondanza, distribuzioni di metallicità, proprietà fotometriche e altro ancora (Pardi & Ferrini, 1994; Pagel & Tautvaisiene, 1995; Prantzos & Aubert, 1995; Chiappini, Matteucci & Gratton, 1997; Molla, Ferrini & Diaz, 1997; Allen, Carigi & Peimbert, 1998; Prantzos & Silk, 1998; Boissier & Prantzos, 1999; Portinari & Chiosi, 1999; Hou, Prantzos & Boissier, 2000; Romano et al., 2000; Chiappini, Matteucci & Romano, 2001; Chang, Shu & Hou, 2002; Casuso & Beckman, 2004). Molti di questi modelli definiscono il *tasso di infall* in funzione del tempo e del raggio (ad esempio, esponenziale nel tempo con tempi scala dell'esponenziale crescenti con il raggio) (v. Boissier & Prantzos, 1999) o *tassi*



*infall* a forma gaussiana (Prantzos & Silk, 1998) per far tornare alcune proprietà locali come densità superficiale del gas, gradienti di abbondanza o la distribuzione di metallicità.

Alcuni autori hanno usato i rapporti di scala cosmologici per valutare la possibile gamma di proprietà del disco di oggi. Tuttavia, l'evoluzione cosmologica dei dischi con il tempo, che è governata dal *tasso infall* (per lo più esponenziale), è stata fissata per far tornare le caratteristiche attuali. In questi modelli, tuttavia, la *rate* di *infall* non è direttamente collegata all'evoluzione cosmologica (v. Jimenez et al., 1998; Boissier & Prantzos, 2000). In questo lavoro, invece, si segue un percorso diverso: si assume che l'evoluzione del *tasso di infall* della Galassia sia completamente vincolata al modello cosmologico e a quel piccolo insieme di condizioni al contorno sopra descritte; alla fine si indagano le proprietà della galassia che ne risulta, confrontate quindi con quelle della Via Lattea. Sappiamo già che un tale modello, che ha lo scopo di riprodurre proprietà globali di galassie di disco *early-type*, non sarà probabilmente in grado di riprodurre tutte le osservazioni dettagliate della Galassia come, ad esempio, il colore, che dipende molto dalla recente storia di formazione stellare. Tuttavia, poichè si considera che la Via Lattea sia una tipica galassia a spirale, il modello deve essere in grado di riprodurre le sue proprietà globali. Dato il piccolo numero di parametri iniziali e dei processi fisici coinvolti, è sorprendente quanto bene il modello di Naab & Ostriker (2006) sia in grado di riprodurre alcune proprietà della Milky Way.

### 3.1.1 La fase cosmologica

Gli autori prendono la materia oscura, in gran parte assemblata in aloni auto-gravitanti, come un dato di fatto cosmologico primario. In uno scenario CDM, sappiamo che la distribuzione delle masse degli aloni segue, grosso modo, quella di Press-Schechter (1974):

$$\frac{dN(m, t)}{d \ln m} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \left(\frac{n+3}{6}\right) \left(\frac{m}{m_*(t)}\right)^{(n+3)/6} e^{\{-m/2m_*(t)\}^{(n+3)/3}} \quad (3.3)$$

dove  $n$  è l'indice spettrale primordiale (Lacey & Cole, 1994) ed  $m_*(t)$  è la massa che inizia il regime non lineare al tempo  $t$ . Per l'alone di un sistema come la nostra galassia, si pensa che esso si sia assemblato tramite *merging*, fino a  $t_f$  momento in cui la sua massa ha raggiunto  $\approx 10^{12} M_\odot$  corrispondente al  $m_*(t_f)$ . Quindi, inizialmente la struttura segue l'evoluzione generale cosmologica e quando l'alone raggiunge l'attuale velocità viriale, comincia la seconda fase. Viene assunto che il disaccoppiamento dall'evoluzione cosmologica, avvenga per l'alone alla sua virializzazione ( $t_{form}$ ), dopo di che, la velocità, rimane costante. Nel modello di collasso sferico, la densità media entro il raggio viriale è  $\rho_{vir} \simeq 200 \rho_{crit}$ , si ha quindi:

$$\rho_{crit} = H^2 \frac{3}{8\pi G} \Rightarrow M_{vir} = \frac{4}{3}\pi r_{vir}^3 \rho_{crit} \Rightarrow M_{vir} = 100 r_{vir}^3 \frac{H^2}{G} \quad (3.4)$$

D'altra parte, l'equilibrio viriale implica che:

$$\frac{GM_{vir}}{r_{vir}} = v_{vir}^2 \Rightarrow v_{vir} = \sqrt{\frac{GM_{vir}}{r_{vir}}} = \sqrt{\frac{100 r_{vir}^3 H^2}{r_{vir}}} \quad (3.5)$$

Da queste segue che:

$$r_{vir} = \frac{v_{vir}(t)}{10 H(t)}; \quad M_{vir} = \frac{v_{vir}^3(t)}{10 GH(t)} \quad (3.6)$$

Queste relazioni valgono solo all'equilibrio viriale.

Per  $t \geq t_{form}$ , si ha che  $v_{vir}(t) = v_{vir}(t_{form})$ . Tuttavia, si può definire anche ad ogni istante  $t < t_{form}$  una velocità ad un certo raggio, legati da:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{GM}{\bar{r}}} \quad (3.7)$$

che vengono indicati, impropriamente, dagli autori come "viriali" e connessi alla cosmologia mediante:

$$\bar{r} = \frac{\bar{v}(t)}{10 H(t)} \quad (3.8)$$

Si tratta in realtà di una velocità circolare per avere l'equilibrio centrifugo al raggio  $\bar{r}$ .

Assumiamo che il disco di gas che si forma dentro l'alone abbia un raggio di scala che è una frazione fissa,  $f_r$ , del raggio viriale dell'alone:

$$r_d(t \geq t_{form}) = f_r r_{vir} = f_r \frac{v_{vir}(t_{form})}{10 H(t)} = r_d(t_{form}) \frac{H(t_{form})}{H(t)} \quad (3.9)$$

Una relazione analoga vale anche per  $t < t_{form}$ :

$$r_d(t < t_{form}) = f_r \bar{r} = f_r \frac{\bar{v}}{10 H(t)} \quad (3.10)$$

### 3.1.2 Modello per l'evoluzione del disco

Descriviamo la struttura teorica di cui necessita il modello per la formazione e l'evoluzione di galassie di disco *early type*.

#### Scale del disco

Si assume che, in assenza di formazione stellare, il gas, in un dato alone, possa stabilirsi in un disco con una densità superficiale esponenziale:

$$\Sigma_d(r, t) = \Sigma_0(t) \exp[-r/r_d(t)] \quad (3.11)$$

dove la densità centrale superficiale  $\Sigma_0$  e la lunghezza di scala  $r_d$  cambiano col tempo. La distribuzione di massa cumulativa del disco è:

$$M_d(r, t) = M_d(t)[1 - (1 + r/r_d)\exp(-r/r_d)] \quad (3.12)$$

dove

$$M_d(t) = 2\pi\Sigma_0(t)r_d^2(t) \quad (3.13)$$

è la massa totale del disco. Nel limite di disco infinitamente sottile (*Freeman, 1970*) la sua velocità di rotazione è data da

$$v_d^2(r, t) = 4\pi G\Sigma_0(t)r_d(t)y(r, t)^2[I_0(y)K_0(y) - I_1(y)K_1(y)] \quad (3.14)$$

dove  $G$  è la costante di gravitazione,  $y(r, t) = r/[2r_d(t)]$  e  $I_i(y)$  e  $K_i(y)$  (con  $i=0,1$ ) sono le funzioni modificate di Bessel del primo e del secondo tipo (*Freeman, 1970*). Dischi reali hanno uno spessore finito e una velocità di rotazione leggermente inferiore. L'effetto è, tuttavia, piccolo e non influenzerà i risultati qui presentati. La velocità di rotazione massima nel disco (Fig. 3.3) si ottiene, a  $r_{2.2}(t) = 2.15r_d(t)$ , con  $y=1.075$  nella precedente Eq. (3.14); vale a dire:

$$v_{d,2.2}^2(t) = 0.774\pi G\Sigma_0(t)r_d(t) \quad (3.15)$$

La massa all'interno di  $r_{2.2}$ , rappresenta il 64,5% della massa totale del disco ( $M_d(r, t)$ ). A  $r_{2.2}(t)$  il disco contribuisce con una frazione

$$f_v(t) = v_{d,2.2}(t)/v_c(t) \quad (3.16)$$

alla velocità circolare totale  $v_c(t)$ , la quale è assunta essere costante con il raggio. In generale  $f_v$  può variare con il tempo. L'esatto valore di  $f_v$  al tempo presente per le galassie a disco è ancora sotto discussione. Se i dischi galattici fossero "massimi", allora  $f_v = 0.85 \pm 0.1$  a  $r_{2.2}$ , che sembra essere corretto per la Milky Way (*Sackett, 1997*).

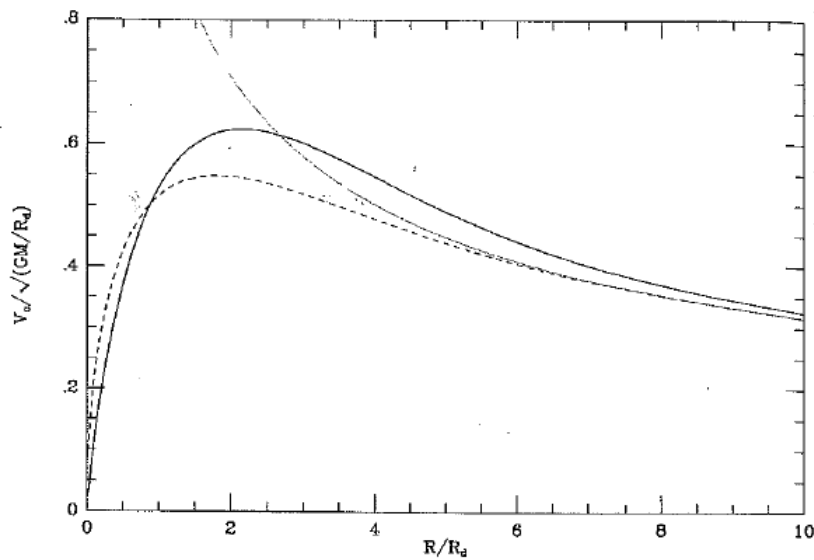


Figura 3.3: Curve di velocità circolare per: disco esponenziale (linea continua nera), un punto con la stessa massa totale (linea punteggiata), corpo sferico con  $M$  data dall' Eq. (3.12) (curva tratteggiata) (*Binney & Tremaine, 1987, Cap. 2, pag. 78*).

Tuttavia, utilizzando i dati provenienti da vicine galassie a disco, *Courteau & Rix (1999)* preferiscono un valore di  $f_v = 0.6 \pm 0.1$ , che è in buon accordo con il valore di  $f_v = 0.63$  derivato da *Bottema (1993)*. Il modello qui adottato ha un valore attuale di  $f_v = 0.61$  (Fig. 3.4).

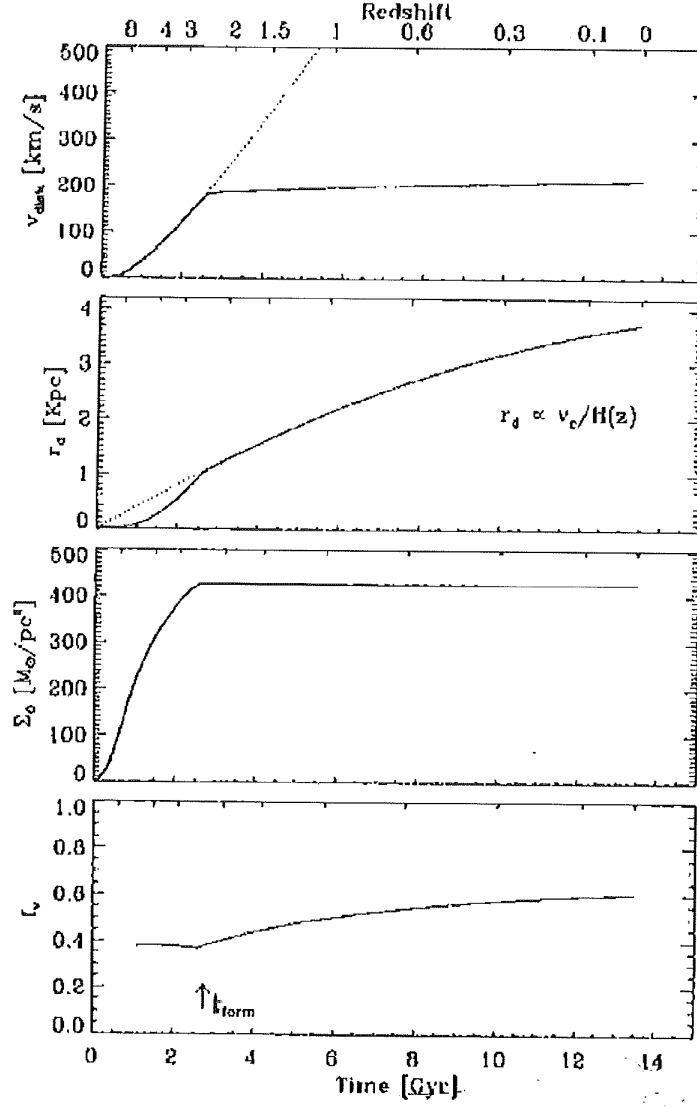


Figura 3.4: Pannello superiore: velocità circolare  $v_c$  del modello della Galassia in funzione del tempo cosmico (linea continua). La linea tratteggiata indica la velocità circolare di un comune alone ad ogni epoca. L'alone della Galassia raggiunge la sua velocità circolare finale ( $\approx 190 \text{ km s}^{-1}$ ) al tempo di formazione  $t_{\text{form}} \approx 2.5 \text{ Gyr}$  (indicato da una freccia nel pannello più basso;  $z_f$  è in accordo con  $z_f$  del nostro MPI). Successivamente,  $v_c$  aumenta a causa della crescita del disco fino al suo valore finale  $v_c = 210 \text{ km s}^{-1}$ . Secondo pannello: evoluzione della lunghezza di scala con il tempo cosmico secondo l'Eq. (3.9) e l'Eq. (3.10), assumendo  $f_r = 1/70$  (linea continua). La linea tratteggiata, per confronto, mostra l'evoluzione per  $r \propto H^{-1}$ . Terzo pannello: densità superficiale centrale totale del disco in funzione del tempo secondo l'Eq. (3.20) e l'Eq. (3.22) scalata al valore  $t = t_{\text{form}}$  per la Via Lattea e mantenuta costante successivamente. Pannello in basso: evoluzione temporale di  $f_v$  secondo l'Eq. (3.21) e l'Eq. (3.23).

Utilizzando i valori di scala di cui sopra, si può stimare la massa totale di materia oscura (assumendo una distribuzione sferica, ad esempio, la materia oscura non si concentra in modo significativo nel disco) all'interno di  $r_{2.2}$  utilizzando la seguente espressione:

$$v_c^2 = v_{dm}^2 + v_d^2 = \frac{GM_{dm}(r_{2.2})}{r_{2.2}} + v_d^2 \quad (3.17)$$

con  $M_{dm}G/r_{2.2} = v_c^2(1 - f_v^2)$ ; da cui si ottiene:

$$M_{dm}(r_{2.2}) = \frac{r_{2.2}}{G}v_c^2(1 - f_v^2) \quad (3.18)$$

che fornisce  $4.3 \times 10^{10} M_\odot (1.9 \times 10^{10} M_\odot)$  per  $f_v = 0.6$  ( $f_v = 0.85$ ). Assumendo una densità costante per un alone sferico di materia oscura fino al raggio solare, (*Binney & Evans (2001)* sostengono che nessun alone con una cuspidè più ripida di  $r^{-0.3}$  è praticabile), siamo in grado di stimare la densità di colonna all'interno di una altezza sul disco pari a  $z_{1.1} = 1, 1 \text{ kpc}$  utilizzando:

$$\Sigma_{dm}(r_{2.2}) = \frac{1}{4\pi Gr_{2.2}^2}v_c^2(1 - f_v^2)z_{1.1} \quad (3.19)$$

con  $r_{2.2} = 6.6 \text{ kpc}$ ,  $v_c = 210 \text{ km s}^{-1}$  e  $f_v = 0.6$ , questo si tradurrebbe in una densità superficiale di materia oscura di 26.4 o 11,3  $M_\odot \text{ pc}^{-2}$  per il caso di disco massimo ( $f_v = 0,85$ ), valori che lasciano al solo disco un contributo paria a 45-60  $M_\odot \text{ pc}^{-2}$ , assumendo il valore totale dato da *Kuijken & Gilmore (1991)*, di 71  $M_\odot \text{ pc}^{-2}$ .

### Calcolo della rate di infall

Sfruttando l'Eq. (3.15), l'Eq. (3.16), l'Eq. (3.9) e l'Eq. (3.10) si ricava l'Eq. (3.20) e la Eq. (3.22) che danno l'andamento della densità centrale del disco prima e dopo la formazione (con le rispettive  $f_v$ , Eq. (3.21) ed Eq. (3.23)):

$$\Sigma_0(t < t_{form}) = \frac{1}{0.774\pi G} \frac{f_v^2(t)}{f_r} 10H(t)v_{vir}(t) \quad (3.20)$$

$$f_v(t < t_{form}) = cost \quad (3.21)$$

$$\Sigma_0(t \geq t_{form}) = \Sigma_0(t_{form}) \quad (3.22)$$

$$f_v^2(t \geq t_{form}) = 0.774\pi G \frac{f_r \Sigma_0(t_{form})}{10H(t)v_c(t)} \quad (3.23)$$

Il profilo totale di densità superficiale del disco è noto in qualsiasi momento ( $\Sigma_d(r, t) = \Sigma_0(t) \exp[-r/r_d(t)]$ ), pertanto, la densità di superficie del *tasso di infall* è data da

$$\Sigma_{IFR}(r, t) = \frac{\Sigma_d(r, t + dt) - \Sigma_d(r, t)}{dt} \quad (3.24)$$

Per riassumere, l'evoluzione del *tasso di infall* del disco è completamente vincolata dai tre parametri attuali (a cui inizialmente si era fatto riferimento): la velocità

circolare del disco,  $v_c$ , la lunghezza di scala del disco,  $r_d$ , (definita da  $f_r$ ), e la densità di superficie centrale del disco,  $\Sigma_0$ , (che definisce  $f_v$  a  $t_{form}$ ).

### Legge di formazione stellare

A questo punto si deve includere una legge di formazione stellare, nel modello per il disco, per seguire l'evoluzione della fase gassosa e stellare, separatamente. Dopo che il gas all'interno di un alone si è stabilito in un disco, inizia la formazione di stelle. *Kennicutt (1998)* ha dato due formulazioni alternative che descrivono correttamente la relazione tra la densità superficiale media del tasso di formazione stellare (SFR) e la densità superficiale totale di gas mediata per le galassie a disco osservate. La prima può essere empiricamente parametrizzata da una semplice legge tipo Schmidt:

$$\Sigma_{SFR} \propto \Sigma_{gas}^n \quad (3.25)$$

dove in media  $n \simeq 1.4$ . La  $\Sigma_{SFR}$  per le singole galassie può tuttavia scostarsi di anche un fattore di 7 da questa relazione. La seconda formulazione, che sembra, empiricamente, ugualmente valida, ed è fisicamente più motivata, è

$$\Sigma_{SFR} \propto \frac{\Sigma_{gas}}{\tau_{din}} \quad (3.26)$$

dove  $\tau_{din}$  è il tempo dinamico del sistema ( $\propto \Omega^{-1}$ ). Una legge di questo tipo è prevista nel caso in cui il passaggio di bracci a spirale giochi un ruolo importante per la formazione stellare (*Wyse & Silk, 1989*). Nella formulazione originale, *Kennicutt (1998)* ha trovato che in media il 21% della massa totale di gas, disponibile in ogni orbita all'interno del bordo esterno del disco, si trasforma in stelle, assumendo una legge di formazione del tipo:

$$\Sigma_{SFR} = \epsilon \frac{\Sigma_{gas}}{\tau_{orb}} \quad (3.27)$$

dove  $\tau_{orb} = 2\pi r_{out}/v_c$  è il periodo orbitale corrispondente al bordo del disco,  $r_{out}$ , e dove  $\epsilon \approx 0.1$  è l'efficienza di formazione stellare. In tutto il lavoro di *Naab & Ostriker (2006)* ad ogni raggio la densità superficiale della SFR è data da:

$$\Sigma_{SFR}(r, t) = \epsilon \frac{\Sigma_{gas}(r, t)}{\tau_{orb}(r, t)} \quad (3.28)$$

con

$$\tau_{orb}(r, t) = \frac{2\pi r}{v_c(t)} \quad (3.29)$$

con  $\epsilon = 0.1$ . *Wong & Blitz (2002)* hanno testato la validità delle formulazioni locali di cui sopra.

### Evoluzione chimica

Seguiamo l'evoluzione del modello dividendo la galassia a disco in anelli indipendenti, assumendo che non ci siano flussi radiali di gas e utilizzando una versione modificata del modello di evoluzione chimica di *Ostriker & Tinsley (1975)*. In ogni anello indipendente, la variazione della densità superficiale del gas  $\Sigma_g$  e della densità superficiale in stelle  $\Sigma_s$  è data da:

$$d\Sigma_g(r, t) = -\Sigma_{SFR}(r, t)dt + K_{ins}(r, t)dt + K_{late}(r, t)dt + \Sigma_{IFR}(r, t)dt \quad (3.30)$$

$$d\Sigma_s(r, t) = \Sigma_{SFR}(r, t)dt - K_{ins}(r, t)dt - K_{late}(r, t)dt \quad (3.31)$$

dove  $\Sigma_{SFR}$  è la SFR per unità d'area, data da  $\Sigma_{SFR}(r, t) = \epsilon \frac{\Sigma_{gas}(r, t)}{\tau_{orb}(r, t)}$  e  $\Sigma_{IFR}$  è la *rate* di *infall* del gas sulla Galassia per unità d'area (Eq. 3.24).  $K_{ins}$  è la massa per unità d'area in gas eiettata da stelle massive istantaneamente e  $K_{late}$  è la massa per unità d'area in gas eiettata in successive fasi evolutive delle stelle di piccola massa. La frazione di gas restituito viene considerata per una *single burst population*.

### Parametri di input del modello

In Tab. 3.1 si riportano i parametri di *input* del modello, sottolineando che l' *effective yield* ( $Y$ ), cioè il rapporto tra la massa in metalli ritornata all'IMS e la massa rimasta in stelle, calcolata con l'attuale GCE (Galactic Chemical Evolution), è dentro il *range* di seguito riportato.

Input parameters	
Solar radius	$r_\odot = 8 \text{ kpc}$
Circular velocity at $r_\odot$	$v_c = 210 \text{ km s}^{-1}$
Total disc surface density at $r_\odot$	$\Sigma_\odot = 50 \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-2}$
Disc collapse fraction	$f_r = 1/70$
Star formation IMF	Salpeter
Star formation efficiency	$\epsilon = 0.1$
Solar metallicity	$Z_\odot = 0.0126$
Effective yield	$Y = 0.0095\text{-}0.0135$
Z of infalling gas	$Z_{IF} = 1 \times 10^{-4}\text{-}3.7 \times 10^{-3}$

Tabella 3.1: Parametri di input per il modello del disco della Via Lattea.

### Formazione stellare globale e *rate* di *infall*

Le evoluzioni della formazione stellare e del *tasso* di *infall* totale per il modello della Galassia sono mostrati in Fig. 3.5.



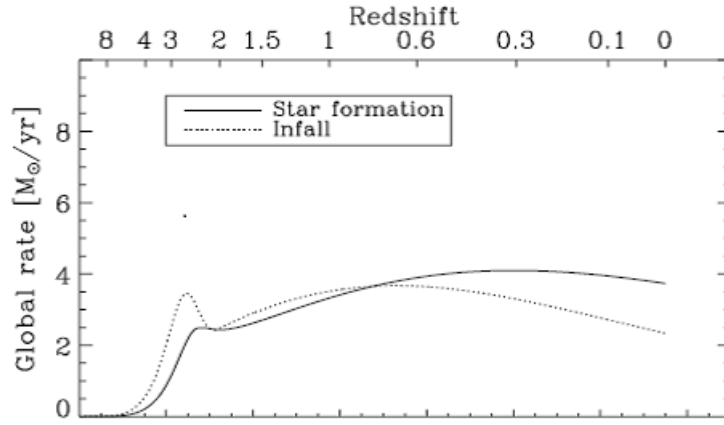


Figura 3.5: La linea continua mostra l'evoluzione globale della SFR e, con la linea punteggiata, è rappresentata la *rate* di *infall* totale (per la scala temporale, v. Fig. 3.4).

Entrambe le distribuzioni sono molto ampie, indicando tassi quasi costanti per un lungo periodo di tempo. La SFR ha avuto il suo massimo a  $\approx 3 \text{ Gyr}$  a partire da ora, che è ragionevolmente in accordo con le storie di formazione stellare delle galassie di massa simile (*Heavens et al., 2004*); il valore globale attuale è  $3,6 M_{\odot} pc^{-2} Gyr^{-1}$ . Il *tasso* di *infall* nella Galassia negli ultimi 10 miliardi di anni è compreso tra  $2 - 4 M_{\odot} yr^{-1}$  variando poco; il valore attuale di  $2,2 M_{\odot} yr^{-1}$ .

### Evoluzione della metallicità

L'incertezza sta nell'esatta composizione chimica del Sole. *Asplund et al. (2004)* hanno derivato l'abbondanza di ossigeno Solare con un tempo dipendente dal modello idrodinamico tridimensionale dell'atmosfera solare. I loro valori sono:  $\log \epsilon_{(O)} = 8.66 \pm 0.05$  per l'abbondanza di ossigeno e  $Z = 0,0126$  per la frazione di massa di metalli Solari; questi appaiono significativamente inferiori rispetto ai valori più comunemente usati:  $\log \epsilon_{(O)} = 8.93$  e  $Z = 0.0194$ , derivati da *Anders & Grevesse (1989)*.

*Naab & Ostriker (2006)* usano il valore di metallicità solare di  $Z_{\odot} = 0,0126$  per scalare il modello a 0,1 dex sotto la metallicità solare,  $Z = Z_{\odot} \times 10^{-0,1} = 0.01$ , al raggio solare e al tempo di 4,5 Gyr da ora, con un conseguente *yield* effettivo di  $Y = 0,0135$  (che, infatti, rientra nei limiti di Tab. 3.1). Nella Fig. 3.6 si mostra la distribuzione radiale della metallicità della ISM del disco nel modello. La distribuzione dopo 2, 4, 6, 8, 10 e 12 Gyr è indicata dalle linee tratteggiate.

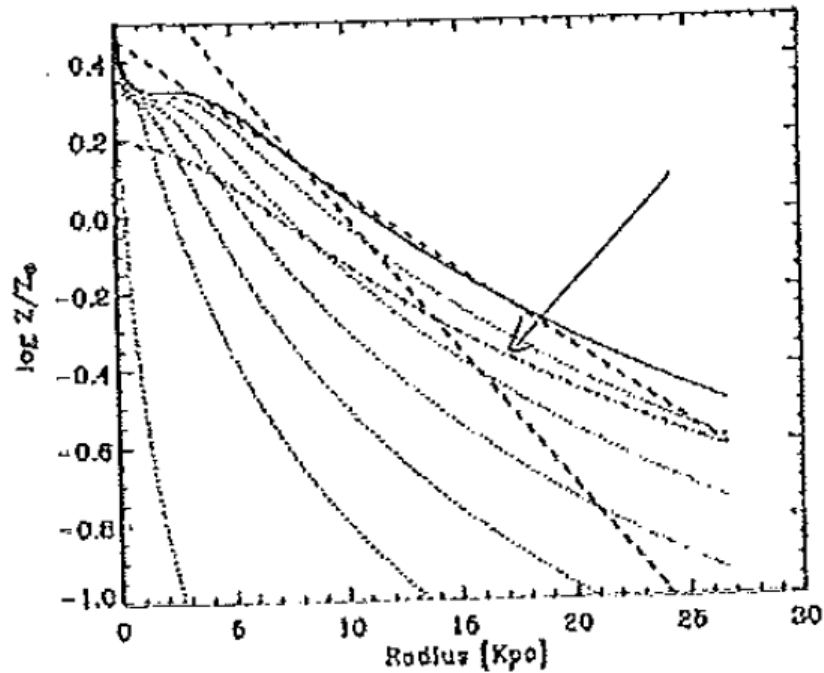


Figura 3.6: Distribuzione radiale della metallicità del gas dopo 2, 4, 6, 8, 10, 12 Gyr (linea punteggiata) e 13,6 Gyr (linea spessa). Le due rette tratteggiate indicano pendenza massima del gradiente (nel passato) di  $-0.07$  e minima (al presente) di  $-0.04 \text{ dex kpc}^{-1}$ . Il gradiente di metallicità è più ripido nel passato. La pendenza attuale della metallicità delle stelle è indicata dalla linea (punto-tratto indicata dalla freccia) che coincide con quella attuale del gas (linea spessa).

Al momento attuale, il gradiente di metallicità del modello è di circa  $d(Z)/dr = -0,046 \text{ dex kpc}^{-1}$ , in corrispondenza del raggio Solare. Il gradiente di metallicità è stato significativamente più ripido in passato,  $\simeq -0.07 \text{ dex kpc}^{-1}$ , (soprattutto nelle parti interne del disco). Il valore attuale nel modello è all'estremità inferiore dei gradienti di abbondanza osservati per gli elementi leggeri, X, che sono nell'intervallo  $-0.04 < d\log(X/H)/dr < -0.08 \text{ dex kpc}^{-1}$  (v. Rolleston et al., 2000; Chiappini et al., 2001). Esteban et al. (2004) hanno determinato il seguente gradiente di ossigeno  $d\log(X/H)/dr < -0,044 \pm 0,010 \text{ dex kpc}^{-1}$  (per confronto v. anche Tab. 3.2).

### Effetti di una differente IMF

Si analizza, in questa sezione, l'effetto di una IMF diversa da quella di Salpeter sulle proprietà del modello di Naab & Ostriker (2006). La IMF è una funzione empirica che descrive la distribuzione delle masse di una popolazione di stelle in base alla loro massa teorica iniziale al momento della formazione. È possibile ricavarla utilizzando la funzione di luminosità attuale e la relazione tra la massa delle stelle e la loro luminosità.

La IMF è spesso descritta in termini di una serie di leggi di potenza. Viene inizialmente fattorizzata la *birth-rate function*,  $B(t, M)dMdt$ , che dà il numero di

stelle che si formano nell'intervallo di tempo  $dt$  dentro il *range* di massa  $M \div M \pm dM$ , per unità di volume, nel seguente modo:  $B(t, M) = \psi(t)\varphi(M)$ , con  $\varphi(M) = \lambda M^{-\alpha}$ , con  $\alpha = 1 + x$  ( $x$  numero che dipende dall'intervallo di massa stellare considerato). La  $\varphi(M)$  è la IMF, a volte rappresentata anche con  $\xi(M)$ , tale che  $\xi(M)\Delta M$  dà il numero di stelle che si formano con masse nel *range*  $M \div M \pm \Delta M$ , per unità di volume.

Nel 1955 Edwin Salpeter determinò la seguente forma funzionale dell'IMF:  $\xi(M) \propto M^{-2.35}$ , con  $\alpha = 2.35$ . Da allora sono state ricavate altre forme per la IMF; riportiamo di seguito i valori per i vari autori (*Mo et al., 2010, pag. 442*):

- *Miller-Scalo (1979)*:  $m^{-2.45}$  (per  $m > 10 M_{\odot}$ ),  $m^{-3.25}$  (per  $1 M_{\odot} < m < 10 M_{\odot}$ ),  $m^{-1.80}$  (per  $0.2 M_{\odot} < m < 1 M_{\odot}$ );
- *Kroupa (2002)*:  $m^{-2.7}$  (per  $1.0 M_{\odot} < m < 100 M_{\odot}$ ),  $m^{-2.3}$  (per  $0.5 M_{\odot} < m < 1 M_{\odot}$ ),  $m^{-1.3}$  (per  $0.08 M_{\odot} < m < 0.5 M_{\odot}$ ),  $m^{-0.3}$  (per  $0.01 M_{\odot} < m < 0.08 M_{\odot}$ ),
- *Chabrier (2003)*, di seguito descritta.

*Naab e Ostriker (2006)* hanno testato, nel loro lavoro, la IMF di *Chabrier (2003)*, Eq. (3.32), che offre un'ampia opportunità di analisi per le stelle della Via Lattea, utilizzando i rispettivi modelli evolutivi di *Bruzual & Charlot (2003)*:

$$\xi(\log m) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[ -\frac{(\log m - \log m_c)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.32)$$

dove  $A$  è un coefficiente di normalizzazione, che dipende dall'intervallo di massa considerato,  $\log m_c$  e  $\sigma^2 = \langle (\log m - \langle \log m_c \rangle)^2 \rangle$  sono, rispettivamente, la massa media e la varianza nel  $\log m$ .

*Chabrier (2003)* presenta delle stime delle IMF per diverse componenti stellari della Galassia, come stelle del disco, del bulge e stelle giovani in ammassi globulari, trovando forme simili tra le diverse IMF. Per le stelle del disco, ad esempio, trova la seguente forma:  $\xi(m) \propto m^{-1.35}$  (per  $m > 10 M_{\odot}$ ) e  $\xi(m) \propto \exp \left\{ -[\log(m/0.2 M_{\odot})]^2 / 0.6 \right\}$  (per  $m < 10 M_{\odot}$ ).

A titolo di esempio, riportiamo, in Fig. 3.7, il confronto tra la IMF di Salpeter e quella di Scalo.

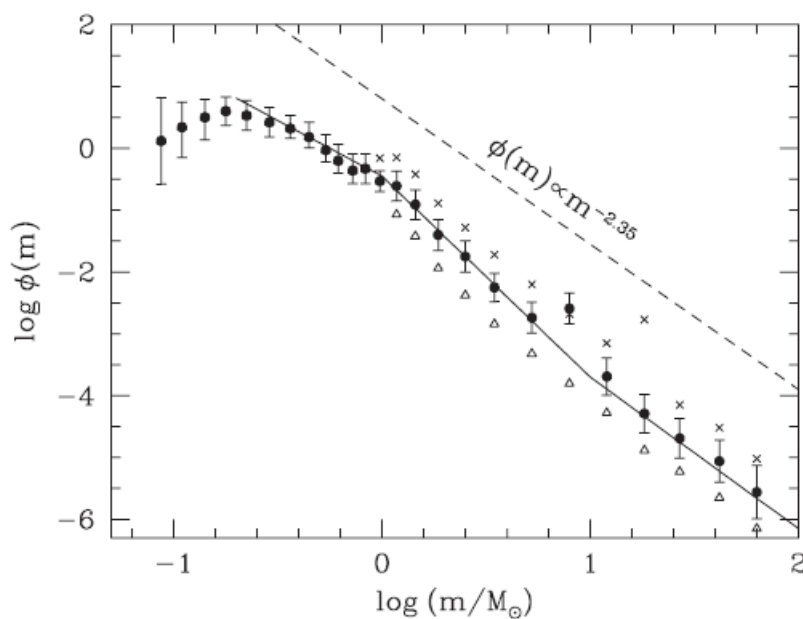


Figura 3.7: Confronto con la IMF di Scalo (linea continua) e la IMF di Salpeter (linea tratteggiata) (*Mo et al., 2010, pag. 442*).

Nella Fig. 3.8 si mostra un confronto tra la distribuzione di metallicità radiale della ISM per la IMF di Salpeter e la IMF di Chabrier; si nota che non c'è differenza sostanziale nell'attuale gradiente medio di metallicità per il gas; si ritrova sempre:  $-0.04 \text{ dex kpc}^{-1}$ . La IMF di Chabrier porta ad una metallicità più elevata nella zona centrale e l'attuale pendenza al raggio Solare è aumentata a  $-0.056 \text{ dex kpc}^{-1}$ . I risultati della IMF di Chabrier danno una frazione più grande di stelle con metallicità supersolare, al raggio Solare. Le proprietà del modello, utilizzando una IMF di Chabrier, sono anche in accordo con le osservazioni, in particolare per il gradiente di metallicità e la distribuzione di metallicità locale. Il valore locale della densità superficiale di gas potrebbe essere al limite superiore delle osservazioni (la distribuzione di gas al raggio Solare è molto difficile da misurare), ma potrebbe essere ridotto assumendo un'efficienza maggiore di formazione stellare. Pertanto, gli autori non possono concludere quale sia la IMF migliore, quello di Salpeter o quello di Chabrier, per modellare, in generale, le proprietà con le osservazioni.

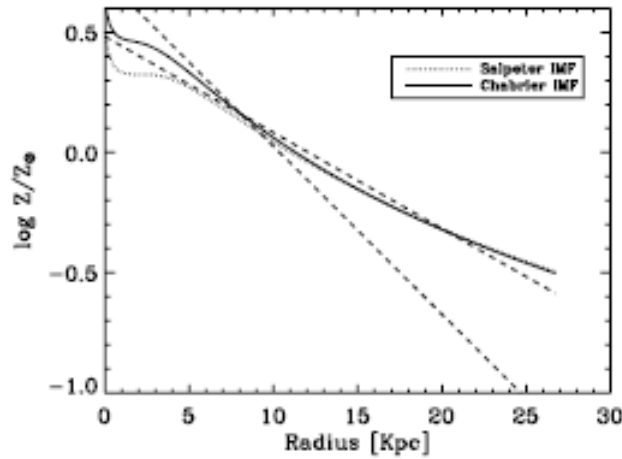


Figura 3.8: Distribuzione radiale attuale della metallicità del gas per la IMF di Salpeter (sottile linea punteggiata) e la IMF di Chabrier (linea continua spessa). Le due rette tratteggiate indicano, al solito, pendenze di  $-0.07$  e  $-0.04$  dex  $kpc^{-1}$ .

### Effetto delle soglie di formazione stellare

*Martin & Kennicutt (2001)* hanno dimostrato che le galassie a disco mostrano un troncamento nei loro profili esterni di  $H\alpha$ , dando prova dell'esistenza di una densità superficiale critica oltre la quale la formazione stellare è fortemente inibita. L'esistenza di questa soglia potrebbe spiegare i *cut-off* osservati nel profilo di dischi stellari (*van der Kruit, 1979; de Grijs et al., 2001*). Tuttavia, altre spiegazioni sono possibili (v. *van der Kruit 1987*). C'è evidenza osservativa che il disco stellare della Milky Way sia troncato ad un raggio di  $\approx 15$  kpc. Sulla base di vincoli osservativi, qualsiasi legge di formazione stellare, per le galassie a disco, possiede una soglia critica data da (*Kennicutt, 1998*):

$$\Sigma_{crit} < 5 - 10 M_{\odot} pc^{-2} \quad (3.33)$$

Tuttavia, in singoli casi, il valore di soglia effettivo può variare di un ordine di grandezza (*Martin & Kennicutt, 2001*). Per un lungo periodo di tempo, si è sostenuto che le instabilità gravitazionali potessero determinare la densità di soglia di formazione stellare (*Toomre, 1964; Kennicutt, 1989*). I criteri presi in considerazione riguardano solo il caso teorico di un disco puramente gassoso. In galassie reali, la componente stellare può avere un effetto destabilizzante sul gas (*Wang & Silk, 1994*). Per il modello di *Naab & Ostriker (2006)* il troncamento del disco avviene a  $\approx 12$  kpc.

## 3.2 Metallicità e GHZ

L'importanza del gradiente di metallicità e della sua evoluzione nella Galassia è essenziale per il concetto di abitabilità. Infatti, se è vero, come appare dal valore sovrametallico, che il Sole nella sua evoluzione sia migrato attraverso la Galassia, a

partire da una posizione più interna rispetto all'attuale, le condizioni di abitabilità del Sistema Solare si sarebbero potute modificare anche a causa dei diversi contributi di marea che hanno agito su di esso, in base alla diversa distanza dal centro Galattico. Questi contributi mareali, variando di intensità con la posizione occupata dal Sole, potrebbero aver influenzato le dinamiche cometarie della nube di Oort, fino a produrre condizioni di iniezione cometaria nella zona dei pianeti interni del Sistema Solare.

### 3.2.1 Posizione iniziale del Sole

Se il Sole ha subito una migrazione, come si può ricostruire il suo percorso sulla base della distribuzione di metallicità del disco? La generale incertezza delle osservazioni, che aumentano enormemente considerando le diverse specie chimiche (v. Tab. 3.2; *Portinari & Chiosi, 1999*), danno l'impressione che, se ci si riferisce ad una pendenza media della metallicità sperimentale, ciò potrebbe essere privo di significato.

tracer	reference	$\Delta r$	$\frac{d[O/H]}{dr}$	$\frac{d[N/H]}{dr}$	$\frac{d[S/H]}{dr}$
HII regions (optical)	Shaver et al. (1983) <sup>(1)</sup>	4-13	-0.07±0.015	-0.09±0.015	-0.01±0.02
	Fich & Silkey (1991)	12-18	—	~ 0	—
	Vilchez & Esteban (1996)	12-18	-0.036±0.02	-0.009±0.020	-0.041±0.020
HII regions (FIR)	Rudolph et al. (1997) <sup>(2)</sup>	0-17	-0.079±0.009	-0.111±0.012	-0.079±-0.009
	Afflerbach et al. (1997)	0-12	-0.064±0.009	-0.072±0.006	-0.063±0.006
OB stars	Smartt & Rolleston (1997)	6-18	-0.07±0.01	—	—
	Gummersbach et al. (1998)	5-14	-0.07±0.02	-0.08±0.02	—
Type II PNæ	Maciel & Köppen (1994)	4-14	-0.06±0.01	—	-0.07±0.01

Tabella 3.2: Gradienti di abbondanza osservati per vari elementi.  $\Delta r$  (in kpc) è il *range* della distanza radiale Galattocentrica, per ogni rispettivo contributo (in *kpc*). I gradienti sono espressi in *dex/kpc*. La nota (1) in tabella si riferisce al fatto che l'autore ha riscalato la distanza a  $R_{\odot} = 8.5 \text{ kpc}$ ; la nota (2) ricorda che *Rudolph et al. (1997)* includono i dati di *Simpson et al. (1995)* (v. *Portinari & Chiosi, Tab. 1, pg. 4*).

Ciò che si nota, però, è che i diversi modelli chimico-dinamici hanno un'autoconsistenza intrinseca, cioè, sono in grado di rilevare un valore medio per il gradiente di metallicità sul disco senza una così grande discrepanza tra i modelli stessi. Come riferimento, abbiamo preso il lavoro di *Naab & Ostriker (2006)*, appena descritto, e lo confrontiamo, in particolare, con quello di *Lineweaver et al. (2004)*, che segue un modello a doppio *infall* del gas (un primo episodio di *infall* genera le stelle dell'alone, a circa 0.5 Gyr; in un secondo momento, si creano le stelle del disco, dopo che sono passati ancora 1 Gyr). La differenza tra i due modelli consiste, fondamentalmente, nell' IMF adattata: come detto, *Naab & Ostriker (2006)* seguono la IMF di *Salpeter (1955)*, confrontandola poi con quella di *Chabrier (2003)*, mentre *Lineweaver et al. (2004)*, riferendosi all'articolo di *Fenner & Gibson (2003)*, usano una IMF di *Kroupa (1993)* a tre componenti, la quale ha una pendenza più ripida, per masse elevate, rispetto a quella di Salpeter, con una conseguente minore quan-

tità di materiale processato da stelle massicce. Ciò, come di seguito vedremo, non causa variazioni apprezzabili sui gradienti di metallicità. Per sottolineare la generale tendenza dei modelli ad essere consistenti tra loro, si ricorda, inoltre, che *Fenner & Gibson (2003)*, nel loro articolo confrontano il loro modello con quello, sempre a doppio *infall*, di *Chiappini et al. (2001)*, non evidenziando particolari differenze sui risultati ottenuti.

*Naab & Ostriker (2006)* trovano, al momento attuale, in prossimità Solare, una pendenza media della metallicità del gas, non molto diversa da quella delle stelle, pari a:

$$\frac{d\log Z}{dr} = -0.046 \text{ dex kpc}^{-1} \simeq -0.05 \text{ dex kpc}^{-1} \quad (3.34)$$

Il Sole è sovrametallico di:  $\Delta\log Z = 0.1 \text{ dex}$ , che corrisponde ad un  $\Delta Z$  pari al 20% in più rispetto al valore a 8 kpc (o 8.5 kpc). Un tale incremento implica una diminuzione di 2.17 kpc (si passa da 8 kpc → 5.83 kpc). Nello specifico, partendo da 8 kpc, al tempo presente, *Naab & Ostriker (2006)*, si ricava, come posizione iniziale del Sole,  $R_{\odot} \simeq 5.8 \text{ kpc}$ , mentre, partendo da 8.5 kpc, si trova  $R_{\odot} \simeq 6.3 \text{ kpc}$ .

Se nel passato, invece, il gradiente fosse pari a:

$$\frac{d\log Z}{dr} = -0.07 \text{ dex kpc}^{-1} \quad (3.35)$$

partendo da 8 e 8.5 kpc, si otterrebbero, rispettivamente, i seguenti risultati:  $R_{\odot} = 6.6 \text{ kpc}$  e  $R_{\odot} = 7.1 \text{ kpc}$ .

*Linweaver et al. (2004)* (v. Fig. 2.1), al tempo presente, ottengono anche loro un gradiente medio:

$$\frac{d\log Z}{dR} = -0.05 \text{ dex Kpc}^{-1} \quad (3.36)$$

(interpolando in Fig. 2.1) ricavando così:  $R_{\odot} = 6.0 \text{ kpc}$  (partendo da 8 kpc) e  $R_{\odot} = 6.5 \text{ kpc}$  (partendo da 8.5 kpc). Entrambi i gradienti hanno un errore di 0.01 dex che corrisponde al 20%. Considerando il limite superiore ed inferiore, partendo da 8 kpc, se il gradiente fosse 0.06, si avrebbe  $R_{\odot} = 6.3 \text{ kpc}$ , mentre, se il gradiente fosse 0.04, si otterrebbe  $R_{\odot} = 5.5 \text{ kpc}$ .

Riassumendo, al tempo presente, mediando i valori di *Naab & Ostriker (2006)*, (*NaO*), con quelli di *Linweaver et al. (2004)*, (*Lin*), si ha che:

$$\overline{(NaO) + (Lin)} = \frac{d\log Z}{dr} = (-0.05 \pm 0.01) \text{ dex kpc}^{-1} \quad (3.37)$$

ottenendo:  $R_{\odot} = 5.5 \text{ kpc}$ , se il gradiente è 0.04, e  $R_{\odot} = 6.3 \text{ kpc}$ , se il gradiente è 0.06; l'intervallo, al tempo presente, per la posizione di formazione del Sole, sarebbe, perciò:

$$R_{\odot} = 5.5 \div 6.3 \text{ kpc}. \quad (3.38)$$

Nel passato, *Lineweaver et al. (2004)* (interpolando in Fig. 2.1), ottengono un gradiente pari a:  $-0.071 \text{ dex/kpc}$ . Mediando ancora tra i dati degli autori citati si ottiene, per il gradiente in passato:

$$\overline{(NaO) + (Lin)} = \frac{d\overline{\log Z}}{dr} = (-0.07 \pm 0.01) \text{ dexkpc}^{-1} \quad (3.39)$$

e si ricava  $R_{\odot 1} = 6.57 \simeq 6.6 \text{ kpc}$ , partendo da 8 kpc. Inoltre, considerando di nuovo il limite superiore ed inferiore del gradiente, si otterrebbe, sempre da 8 kpc,  $R_{\odot 1} = 6.75 \text{ kpc}$  e  $R_{\odot 1} = 6.3 \text{ kpc}$ , rispettivamente. In questo caso, la posizione di formazione del Sole, sarebbe:

$$R_{\odot 0} = 6.3 \div 6.7 \text{ kpc} \quad (3.40)$$

Tenendo conto sia della media fra i due lavori, sia dell'errore, si ottiene, come *range* minimo:

$$R_{\odot 0} = 5.5 \div 6.7 \text{ kpc}. \quad (3.41)$$

in corrispondenza dei due limiti, per il gradiente medio di metallicità:

$$\frac{d\overline{\log Z}}{dR} = (-0.04 \div -0.08) \text{ dexkpc}^{-1} \quad (3.42)$$

Si nota anche che il gradiente logaritmico medio osservato dell'ossigeno sull'idrogeno nelle regioni HII della Galassia è considerato da *Pagel (1997)* essere:  $-0.071 \text{ dexKpc}^{-1}$ , così come riportato anche nella Tab. 3.2 (*Portinari & Chiosi, 1999*), che rientra nel *range* scritto sopra. Lo stesso valore è dato anche da *Mo et al. (2010)*, per caratterizzare la Via Lattea. Da notare, inoltre, che lo stesso valore del gradiente è stato usato da *Gonzaletz et al. (2001)*.

Anche considerando il limite inferiore, non c'è problema per il Sole, al momento della formazione, infatti, si trovava dentro la GHZ, data dalla Tab. 2.1. Dalla Fig. 2.15 si vede, però, che sotto i 7 kpc la marea, dovuta al bulge, ha una brusca impennata; a  $\approx 6 \text{ kpc}$  il fattore di amplificazione, rispetto all'attuale posizione Solare di 8 kpc, è 1.8, causando, molto probabilmente, effetti importanti sulle orbite meno legate delle comete nella Nube di Oort (v. Fig. 2.22) (*Secco, 2013*).

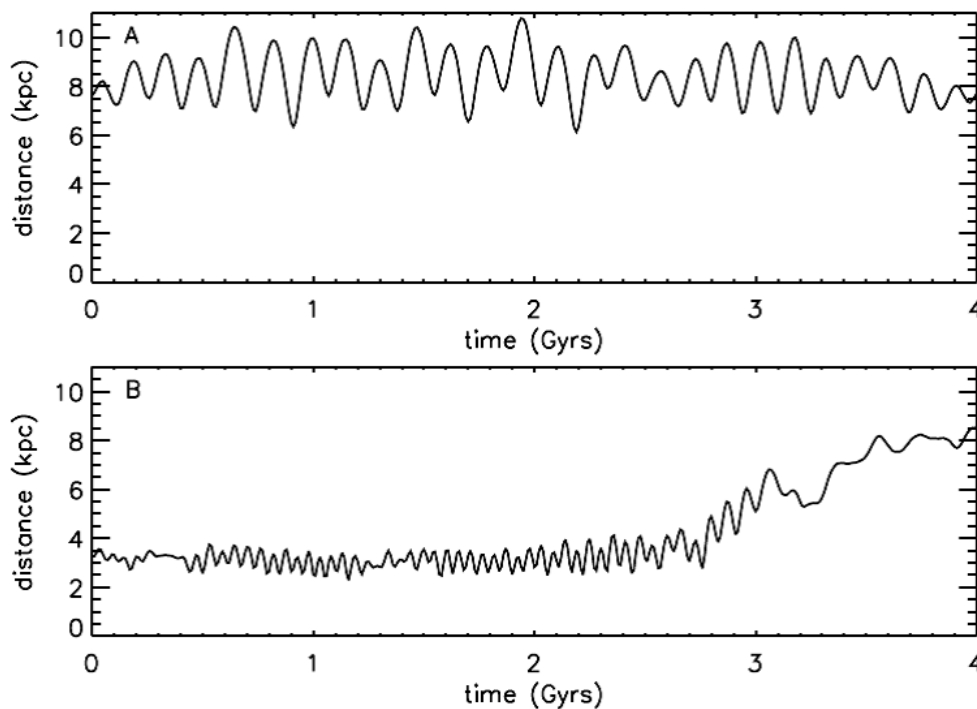
### 3.2.2 Migrazione del Sole e GHZ

La migrazione Solare all'interno del disco Galattico può diventare rilevante anche nell'ambito dell'abitabilità. Infatti, se il Sole non rimanesse in una posizione fissa dall'inizio della sua storia, potrebbe spendere una frazione significativa della sua vita al di fuori della regione Galattica più adatta alla Vita. Come abbiamo già osservato, la GHZ era identificata da *Lineweaver et al. (2004)* come una regione centrata nella posizione attuale del Sole che si allarga, poi, con il tempo. Da quanto visto nella



sezione precedente, il Sole avrebbe potuto iniziare la sua storia più vicino al centro Galattico, a circa 6 kpc.

Il percorso compiuto dal Sole è compatibile con le condizioni Galattiche che permettono il sorgere della Vita? Vediamo i percorsi ottenuti, mediante simulazioni, da *Kaib et al. (2011)*, per la migrazione Solare, causata con l'interazione dei bracci a spirale, in Fig. 3.9; sotto nella medesima figura, si riportano in tabella i valori del Sole e degli analoghi solari, per sottolineare che i percorsi sono entrambi compatibili con i dati considerati:



stars	age (Gyrs)	$r$ (kpc)	$z$ (pc)	$u$ (km/s)	$v$ (km/s)	$w$ (km/s)
Sun	4.57	$8.4 \pm 0.6$	25	10	$18 \pm 2$	7.2
Sun Analogs	$4.45 \pm 0.15$	$8.05 \pm 0.7$	$0 \pm 100$	$0 \pm 15$	$0 \pm 15$	$0 \pm 15$

Figura 3.9: Sopra: distanza Galattocentrica in funzione del tempo per due casi analoghi al Sole nella simulazione eseguita da *Kaib et al. (2011)*. Entrambe le simulazioni mostrano un cambiamento della posizione del Sole durante la sua storia: uno oscillante tra 6 e 10 kpc (percorso A), mentre l'altro presenta una variazione più forte da una posizione più interna (3 kpc) all'inizio della storia del Sole fino alla posizione Solare corrente (percorso B). L'origine nell'asse dei tempi corrisponde alla nascita del Sole. Sotto: confronto tra le proprietà cinematiche del Sole e dei criteri di selezione per l'analogo Solare nella Galassia simulata a  $t = 10$  Gyr. Le colonne sono (da sinistra a destra): nome delle stelle della categoria, età stellare, la distanza dal centro Galattico, la distanza dal piano mediano del disco, la velocità peculiare radiale, tangenziale e verticale. Le distanze Solari dal centro Galattico e al di sopra del piano mediano sono tratte da *Reid et al. (2009)* e *Juric et al. (2008)*, rispettivamente. I dati delle velocità solari sono presi da *Mc Millan & Binney (2010)*.

In Fig. 3.10 si sono proiettati sulla GHZ di Fig. 2.2 i percorsi plottati da *Kaib et al. (2011)*. Se è vero che il movimento del Sole, nel pannello di sinistra di Fig. 3.10 (percorso A in Fig. 3.9) è compatibile con le condizioni di abitabilità, ciò non accade per il tragitto stellare nel pannello di destra della Fig. 3.10 (percorso B in Fig. 3.9) il quale mostra un moto del Sole in totale disaccordo con la possibilità di Vita, infatti, l'ambiente della formazione e dell'evoluzione Solare è compromesso dalla metallicità troppo elevata e dall'effetto distruttivo di emissioni di supernove<sup>1</sup>. A questi effetti possiamo aggiungere quello della marea Galattica, dovuta al bulge, che risulta amplificata, per quasi 3 Gyr, di un fattore di circa 13.5, rispetto a quella che subisce il Sole a  $\simeq 8$  kpc (v. Fig. 2.22).

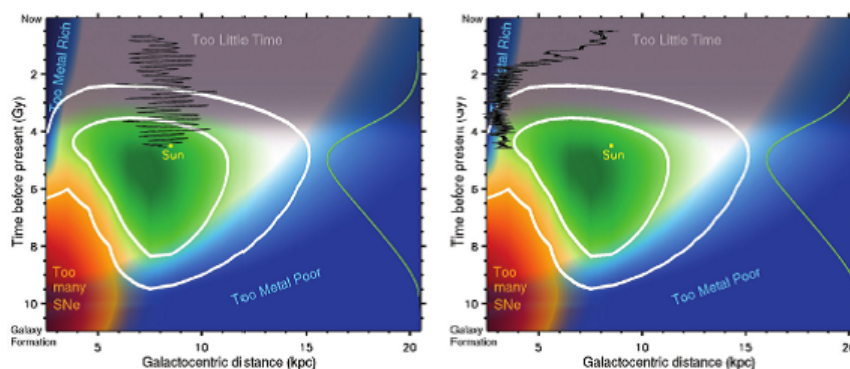


Figura 3.10: Percorsi solari per *Kaib et al. (2011)*, Fig. 3.9, sovrapposti alla GHZ *Lineweaver et al. (2004)*, Fig. 2.2. Nel lato destro è mostrata un'evoluzione Solare in disaccordo con le condizioni di abitabilità, mentre il percorso Solare sul pannello di sinistra è compatibile con il sorgere della Vita, anche se la posizione iniziale non tiene conto della sovrmetallicità Solare (*De Biasi et al., 2015*).

### 3.3 Da dove proviene l'acqua del nostro pianeta?

Per molto tempo questa domanda non ha avuto risposta e ancora oggi è soggetta a controversie. Le atmosfere dei pianeti formatesi dai vulcani costituiscono la base di una successiva evoluzione: il vapore d'acqua può condensarsi in goccioline che formano nubi, ricadendo al suolo sotto forma di pioggia. Tale processo in ambienti planetari dove la temperatura è tale da evitare il congelamento dell'acqua stessa, può aver generato oceani veri e propri. L'idea che gli oceani siano nati esclusivamente da gas vulcanici ripropone la difficoltà di costruire forme di vita ripartendo da zero: l'acqua fuoriesce a temperature molto elevate ed è quindi sterile o poco ricca di sostanze organiche complesse. Per fortuna, abbiamo un sostituto proveniente dall'esterno: l'acqua contenuta nelle comete e quella che ricopre i granuli di polvere interstellare è ricca di sostanze organiche. Quella porzione di sostanze che riesce a raggiungere il suolo può aver contribuito ad arricchire la Terra di acqua e di polimeri

<sup>1</sup>Da notare che il confronto non è invece fatto con la zona di abitabilità trovata da Prantzos in funzione dell'età.

prebiotici. Considerando le comete come vere e proprie montagne di ghiaccio e sostanze organiche, esse avrebbero potuto depositare sulla Terra, nel corso del grande bombardamento iniziale, miliardi di tonnellate d'acqua fino a formare una parte dei nostri oceani. Basti pensare che un nucleo cometario come quello della Hale-Bopp può contenere migliaia di miliardi di tonnellate d'acqua; per riempire almeno la metà degli oceani terrestri attuali, che hanno una massa di circa  $1.37 \cdot 10^{18}$  tonnellate, potrebbero bastare circa 14000 comete, un numero di collisioni non esagerato all'inizio della storia del Sistema Solare (*Galletta & Sergi, 2005*).

Questa ipotesi presenta ancora problemi non risolti. Prima di affrontarli possiamo definire due ambiti che sottolineano l'importanza della comprensione della provenienza dell'acqua:

1. *Ambito generale*: l'acqua è essenziale per la Vita complessa; circa il 70% della Terra è ricoperta da questo prezioso elemento e la stessa percentuale compone anche il corpo umano.
2. *Ambito specifico per il nostro lavoro*: da quando si è evidenziata la sovrapposizione solare, si è ipotizzato che la nostra stella si possa essere formata in regioni più interne della Galassia rispetto alla posizione attuale. In queste regioni le perturbazioni dovute alla componente del bulge della marea generano forti variazioni sulle orbite delle comete della Nube di Oort (o sue analoghe). Da questo fatto si è cercato di capire come gli impatti cometari potessero influenzare i limiti della GHZ. L'idea più discussa è che le iniezioni cometarie verso la regione dei pianeti interni di un sistema planetario creino catastrofici impatti sui pianeti stessi, non rendendoli luoghi idonei allo sviluppo della Vita. Abbiamo quindi analizzato quali potessero essere i percorsi solari che riuscissero a portare il nostro Sole nella zona abitabile al tempo attuale, a circa 8 kpc. Dalla Fig. 3.10 possiamo vedere come il percorso di sinistra (oscillante tra 6-10 kpc), secondo quanto detto, sia idoneo all'abitabilità e come, invece, quello di destra (partendo da una posizione più interna), generi un tragitto solare non idoneo all'abitabilità. Tutto questo ha una sua consistenza logica se gli impatti sono visti come catastrofici, ma approfondendo il discorso, si potrebbe ipotizzare che non sia sempre vero che gli impatti cometari siano dannosi in assoluto; infatti, se è vero che gran parte dell'acqua del nostro pianeta è stata portata dalle Comete, allora si potrebbe definire un fattore positivo la forte perturbazione subita da un analogo del Sistema Solare (e dal Sistema Solare stesso) causata dalla marea nelle regioni interne della Galassia. Tali perturbazioni, incrementando gli impatti cometari, avrebbero potuto rifornire il nostro pianeta di enormi quantitativi di preziosa acqua. Ciò potrebbe far rivalutare quei cammini solari che, proprio a causa degli eccessivi impatti, vengono di norma scartati (v. Fig. 3.10, percorso di destra). E' come se in un inferno primordiale di fuoco, polveri e vapore, il Sistema Solare si sia, a poco

a poco, nel suo peregrinare, preparato ad accoglierci: all'inizio della sua storia gli impatti cometri hanno portato l'acqua, successivamente, allontanandosi dal centro Galattico, gli impatti sono diminuiti; la Terra divenne allora un mondo più calmo e stabile con i giusti elementi per divenire la nostra casa.

### 3.3.1 Problemi non risolti

Ad oggi la chiave per stabilire la provenienza dell'acqua è analizzare il rapporto D/H (Deuterio/Idrogeno), questo perchè si pensa che il deuterio, distruggendosi nelle stelle, deve avere origine cosmologica<sup>2</sup>; tale era la sua abbondanza e tale è rimasta, ma andiamo per gradi. Come noto la molecola d'acqua è composta da due atomi di idrogeno e da uno di ossigeno ( $H_2O$ ). Il deuterio (simbolo  $^2H$  o D) è un isotopo stabile dell'idrogeno (anche se con solo 2.2 MeV di energia di legame) il cui nucleo (chiamato deutone o deuterone) è composto da un protone e un neutrone.

Dunque, alcune molecole d'acqua invece di avere idrogeno hanno deuterio al suo posto, ed è risultato essere importante il rapporto tra deuterio ed idrogeno (D/H). Questa proporzione, come detto, rappresenta un indicatore per la formazione e l'evoluzione del nostro Sistema Solare, almeno nelle sue fasi primordiali.

Simulazioni teoriche indicano, appunto, che la proporzione tra deuterio ed idrogeno varia con la distanza dal Sole e con il passare del tempo, almeno per i primi milioni di anni. Considerando tutto questo, diventa obiettivo importante misurare il valore D/H di differenti tipi di oggetti e confrontarlo con il valore D/H misurato negli oceani Terrestri, proprio per determinare quanto ognuno di tali oggetti possa aver contribuito alla massa d'acqua presente sulla Terra. Tra questi oggetti celesti proprio le comete rappresentano uno strumento unico per studiare il Sistema Solare ai suoi albori. Queste sono composte del materiale "avanzato" dal disco protoplanetario da cui si sono formati i pianeti. Quindi ne dovrebbero riflettere la composizione primordiale, ma le cose non sono così semplici, proprio per le dinamiche dell'evoluzione del Sistema Solare.

Nel caso della *Hale-Bopp* (periodo orbitale di circa 2534 anni), ad esempio, la quantità (D/H) nella cometa è maggiore di quella presente negli oceani terrestri (*sonda Giotto*). Inoltre, la violenza degli impatti cometari potrebbe facilmente disintegrare le sostanze presenti all'interno della cometa. Ciò fa pensare che sia difficile che le sostanze prebiotiche arrivino sulla Terra dalle comete.

Dal satellite *Polar* (orbitante attorno alla Terra) si è visto che piccole masse di ghiaccio tra 20 e 40 tonnellate, dette *piccole comete*, cadono continuamente sulla Terra. Essendo più piccole, vengono frenate nella caduta e si sbriciolano a circa 1000 Km di quota, evaporando e rilasciando le molecole d'acqua. Gli impatti di tali mini-comete in alta atmosfera sono milioni ogni anno e se il ritmo di collisioni è stato

---

<sup>2</sup>Una stima del D primordiale è data da Barrow & Tipler (1986):  $X(D) = 2 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-5}$  (in massa).

maggiore in passato esse potrebbero aver fornito una parte sostanziale dell'acqua degli oceani (*Galletta & Sergi, 2005*).

Nel 2011, però, le analisi spettrali effettuate dal telescopio spaziale Herschel dell'ESA su *Hartley 2* (periodo orbitale di circa 6.5 anni), una cometa ritenuta fra quelle della Fascia di Kuiper, sembrarono aprire un nuovo spiraglio: in quel caso il rapporto fra deuterio e idrogeno era assai più compatibile con quello riscontrato sulla Terra.

In tempi ancora più recenti abbiamo avuto altre notizie dallo spazio grazie alla sonda Rosetta dall'Agenzia Spaziale Europea lanciata nel 2004 e finita nel 2016. L'obiettivo della missione era lo studio della cometa *67P/Churyumov-Gerasimenko* (periodo orbitale di circa 6 anni). La missione era formata da due elementi: la sonda vera e propria, Rosetta, e il lander Philae, atterrato il 12 novembre 2014 sulla superficie della cometa. La missione si è conclusa il 30 settembre 2016, con lo schianto programmato dell'orbiter sulla cometa e la disattivazione del segnale. Cosa è stato scoperto? La sonda europea ha analizzato i vapori d'acqua emessi dalla cometa 67P (periodo orbitale di poco più di 6 anni) ed ha scoperto che il rapporto D/H della cometa (alto a destra in Fig. 3.11) è significativamente differente da quello dell'acqua presente sulla Terra: tre volte maggiore. Le analisi sono state effettuate durante il primo mese dall'arrivo in orbita intorno alla cometa con lo strumento di bordo ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis).

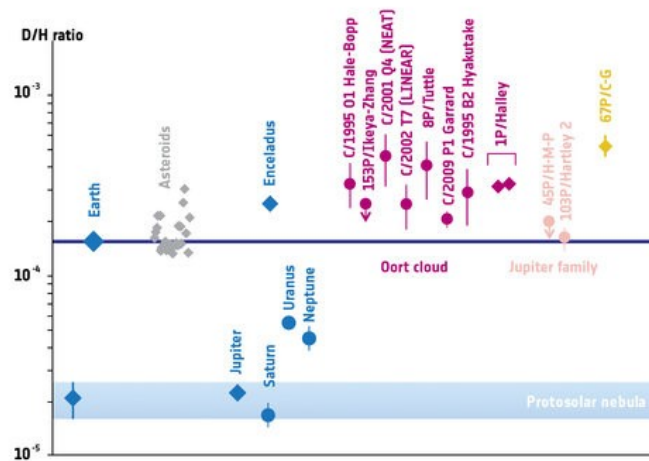


Figura 3.11: Rapporto D/H (deuterio su idrogeno) degli oceani terrestri (linea orizzontale), confrontato con quello di asteroidi, comete della Nube di Oort e della famiglia di Giove [z1, fonte ESA].

Si vede subito nella Fig. 3.11 che, evidenziando il livello di D/H terrestre con una linea orizzontale, i candidati per essere i portatori d'acqua sul nostro pianeta appaiono gli asteroidi, piuttosto che le comete della nube di Oort (che presentano

una maggiore quantità di D/H rispetto a quella presente negli oceani terrestri). Anche la famiglia cometaria di Giove (JFC) ha livelli compatibili di questo rapporto con quelli dei nostri oceani.

In conclusione, sembra, quindi, che ad avere un valore D/H compatibile con quello della Terra siano i meteoriti originariamente provenienti dagli asteroidi appartenenti alla fascia degli asteroidi, come accennato (Fig. 3.11). E ciò potrebbe sostenere l'ipotesi che, nonostante gli asteroidi abbiano un contenuto di acqua molto inferiore rispetto alle comete, un gran numero di impatti di oggetti di questo tipo con la Terra potrebbe essere stato sufficiente a generare parte degli oceani che vediamo oggi. Un'altra questione è se gli oceani abbiano mantenuto nel tempo il rapporto D/H ora osservato.

Ad oggi, comunque, secondo le teorie più accreditate nella comunità scientifica, all'inizio della formazione della Terra poco più di 4,5 miliardi di anni fa, l'acqua non poteva essere presente a causa delle temperature troppo elevate. Ci è arrivata in seguito, tra 4,1 e 3,8 miliardi di anni fa, durante un periodo conosciuto come Intenso Bombardamento Tardivo (LHB) caratterizzato da un gran numero di impatti di asteroidi e comete (non solo sulla Terra, ma in tutti i pianeti interni); detto questo, il problema della provenienza dell'acqua rimane, tuttavia, senza soluzione al momento attuale.

### 3.4 Conclusioni sulla metallicità e la migrazione solare

Dal modello considerato per l'evoluzione della Galassia di *Naab & Ostriker (2006)*, mediando i gradienti di metallicità (presente e passato) con quelli ottenuti da *Lineweaver et al. (2004)*, e valutando la condizione di sovrmetallicità del Sole, siamo stati in grado di definire i limiti dove la nostra stella ha, forse, cominciato il suo cammino verso l'attuale posizione dal centro Galattico ( $R_{\odot} = 5.5 \div 6.7 \text{ kpc}$ ). Grazie a quanto elaborato nel Cap. 2 (Fig. 22 e Fig. 2.17) abbiamo compreso che, a distanze di 3 e 6 kpc dal centro Galattico, si hanno forti perturbazioni dinamiche sulle orbite delle comete (di una Nube come quella di Oort) dovuta alla marea del bulge (rispettivamente di un fattore 13.5 e 1.8). Abbiamo poi cercato di capire quali potessero essere i cammini solari idonei a far rimanere il sistema planetario nella GHZ, sovrapponendo le simulazioni di *Kaib (2011)* alla GHZ (Fig. 3.10). Anche se appare evidente che nella, medesima figura, il percorso di sinistra sia compatibile con la permanenza del Sole in una zona abitabile e quello di destra no, ci siamo interrogati sull'importanza delle perturbazioni di marea su una Nube di Oort in regioni interne della Galassia, in quanto, potrebbe essere che tali sconvolgimenti dinamici primordiali del sistema planetario abbiano potuto rifornire i pianeti interni

di acqua. Tale supposizione, rimane una questione aperta, data la nostra ignoranza sull'origine dell'acqua nel nostro pianeta.

# Capitolo 4

## Abitabilità cosmologica

Cerchiamo di estendere quanto trattato sul concetto di abitabilità attorno ad una stella (CHZ) e in una zona particolare della Galassia (GHZ), all'intero universo. Indaghiamo sull'*abitabilità cosmologica* seguendo il lavoro di *Secco (2009) in "Questions of Modern Cosmology: Galileo's Legacy", di D' Onofrio et al. (2009)*.

Cominciamo analizzando il quadro cosmologico attuale. Il Principio Cosmologico è declinato in vari modi: quello copernicano, quello perfetto e quello antropico, debole e forte. Inoltre, è interessante capire quale interazione vi sia tra gli scenari cosmologici e lo sviluppo della Vita. Cerchiamo di approfondire tali argomentazioni per capire le tappe fondamentali che l'universo stesso ha compiuto perchè fosse permessa la Vita.

### 4.1 Abitabilità cosmologica (COSH)

Con tale termine non si intende, chiaramente, alcuna locazione privilegiata all'interno dell'Universo, ma semplicemente:

*"L'insieme dei fatti che connettono i fattori che condizionano gli aspetti del Cosmo e la sua storia con i requisiti irrinunciabili per la Vita. Da tali fatti si deduce che il fenomeno Vita è fortemente dipendente da tali fattori"* (Secco, 2009, pg.395).

Si tratta del Principio Antropico (PA) Debole Riformulato, (WRAP).

I fattori in oggetto, si possono ricondurre ad un insieme definito e limitato riassumibile in modo, sia pur sommario, nei seguenti settori:

- A) I valori delle varie costanti fisiche fondamentali.
- B) Proprieta globali del cosmo, caratterizzanti la sua storia (come si espande, come fabbrica gli elementi,...).
- C) Dimensionalità dello spazio.

Questi vanno poi legati ai requisiti irrinunciabili per la Vita, così come la conosciamo, la sola (quella sulla Terra) di cui abbiamo esperienza diretta:



- $\alpha$ - La presenza di mattoni, cioè degli elementi chimici basilari per la formazione dei composti organici: carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto ed inoltre del: fosforo, zolfo, ferro.
- $\beta$ - Un tempo lungo a sufficienza: l'esperienza terrestre insegna che, per l'apparire della Vita, occorrono, dopo la formazione del pianeta ( $\simeq 4,5 \cdot 10^9$  anni fa) ancora almeno  $\simeq 1 \cdot 10^9$  anni per la comparsa delle più antiche cellule fossili *unicellulari*. Devono poi passare ancora  $\simeq 2.7 \cdot 10^9$ , per avere i primi organismi *pluricellulari* (Dallaporta & Secco, 1993; Curtis & Barnes, 1987, Cap. 4, pg. 62).

Ed inoltre ai requisiti del sito dove la Vita si è sviluppata:

- $\gamma$ - Stabilità dell'orbita planetaria, quindi della temperatura, della pressione, dell'atmosfera..... I composti organici debbono non solo venir formati, ma poter essere stabili.
- $\delta$ - L'ambiente deve essere adatto alla formazione di lunghe catene molecolari biologiche.

Per la Vita umana, i requisiti potrebbero essere anche più stringenti. Una volta connessi fra loro fattori e requisiti, va indagata la sensibilità di tale legame.

Il requisito  $\beta$ ) e già stato preso in considerazione per la GHZ (Cap. 2) con cui, ovviamente s'intreccia. Dal punto di vista specifico della COSH, esso comporta un limite inferiore per l'età dell'Universo che si traduce nel valore non troppo inferiore ad 1 per  $\Omega_0$ . Se infatti il parametro di densità fosse inferiore, ad es. di 0.03, l'espansione sarebbe stata così rapida che, non solo la Vita non avrebbe avuto tempo di svilupparsi, ma né stelle, né galassie sarebbero riuscite a formarsi.

I requisiti  $\gamma$ ) e  $\delta$ ), fra loro connessi, fanno parte integrante delle condizioni per la CHZ (Cap.1).

#### 4.1.1 "Interplay" fra settori e requisiti

Per ogni settore considerato, esiste una ampia serie di valutazioni, dovute a vari autori (*es.:* Barrow & Tipler, 1986; Dallaporta & Secco, 1993; Rees, 2002; Barrow, 2003; Gingerich, 2007) che possono provare la connessione fra gli attuali scenari cosmologici e lo sviluppo della Vita. Faremo qualche esemplificazione solo per i settori A) e B), mentre per la comprensione di quanto speciale sia la dimensionalità dello spazio geometrico in cui viviamo, C), pari a N. 3, si rimanda alla Bibliografia (*es. Dallaporta & Secco, 1993, pg. 170*).

Analizzeremo, con particolare dettaglio, la formazione del Carbonio e dell'Ossigeno (oltre che dell'azoto e del fosforo), dopo aver ricostruito brevemente, le vicende che hanno portato alla formulazione del Principio Antropico (PA) in Fisica ed in Cosmologia ed al suo inserimento accanto ai Principi Cosmologici.

## 4.2 Sui Principi della Cosmologia

### 4.2.1 Principio Cosmologico Perfetto

Prima della scoperta della radiazione cosmica di fondo (CBR) da parte di Penzias e Wilson nel 1965 (*Barrow & Tipler, 1986, pag.368*) erano possibili due alternative opposte per quanto riguarda l'evoluzione cosmologica. Una era legata al Principio Cosmologico Perfetto, vale a dire: *l'universo è, in media, lo stesso ovunque, in tutte le direzioni e in tutti i tempi*. Su questo principio, *Bondi, Gold, Hoyle & Narlikar (1948, 1963-'64, v. Barrow & Tipler, 1986, pag.421)* definirono la loro *teoria dello stato stazionario* per la descrizione cosmica. Per ovviare al problema della mancanza di densità costante, causato dalla scoperta di *Hubble (1929)*, dell'espansione dell'universo con il tempo, *Bondi (1961)* suppone che vi sia la creazione di un atomo di idrogeno/litro ogni  $5 \times 10^{11}$  anni. *Hoyle (1948)* afferma che: *"Usando creazione continua di materia, dovremo tentare di ottenere, nel quadro della teoria generale della relatività, ma senza introdurre una costante cosmologica, un Universo che soddisfi il principio cosmologico perfetto e che mostri le caratteristiche di espansione necessarie"*. L'altra alternativa era che l'universo non fosse caratterizzato dalla "monotonia" imposta dal Principio Cosmologico Perfetto (cioè a densità costante) ma, al contrario, che avesse un alto livello di varietà e "fantasia", a causa del continuo cambiamento di densità e temperatura. La scoperta di *Penzias & Wilson (1965)* ha dimostrato che è secondo questa ultima modalità che l'universo si espande. In effetti, l'espansione secondo il Principio Cosmologico Perfetto è stata esclusa dalla distribuzione di energia della CBR, in perfetto accordo con quella di un corpo nero. Ciò evidenzia che la materia e la radiazione erano in equilibrio termodinamico nel remoto passato, anche se non lo sono ora. All'attuale densità cosmologica (di circa  $3 \text{ protoni}/\text{m}^3$ ) un fotone avrebbe bisogno di un tempo maggiore dell'età dell'universo per interagire con un elettrone (cioè con la materia). La conclusione è stata che la densità e la temperatura devono aver cambiato inesorabilmente i loro valori nel corso dell'evoluzione cosmica, dando vita ad uno scenario fantastico di evoluzione dell'universo, segnato da una sequenza di fenomeni fisici diversi, esattamente il contrario di quanto previsto dal Principio Cosmologico Perfetto. Quest'ultimo avrebbe sottratto all'universo tutta l'inventiva e la fantasia, relegando la sua storia ad un quadro piatto, semplicemente per obbedire alle nostre esigenze mentali basate sul Principio del Rasoio di Ockham<sup>1</sup>.

### 4.2.2 Principio Cosmologico

Nel frattempo, grandi *surveys* come, ad esempio, quella di 157,320 galassie dall'Anglo Australian Telescope (*Pavone et al., 2001*), o l'altra, che ha prodotto il ca-

<sup>1</sup> Proposto da Guglielmo di Ockham nel XIV secolo: *pluralitas non est ponenda sine necessitate*, che si traduce come "le entità non dovrebbero essere moltiplicate inutilmente".

talogo di Shane e Wirtanen (*Combes et al., 1995, pag. 293*), che contiene circa  $10^6$  galassie e la *survey* APM con oltre due milioni di galassie (*Longair, 1998*), hanno cominciato a permettere di mappare la struttura dell'universo su larga scala. Alla fine del 1989, è stato lanciato il Cosmic Background Explorer (COBE) ed è stata misurata la temperatura di corpo nero della CBR (circa 3 K) con le sue piccolissime fluttuazioni (dell'ordine di  $10^{-5}$ ), all'età dell'universo di circa 300.000 anni dopo il Big-Bang (*Coles & Lucchin, 1995*). Così la "tessitura" dell'universo, sia giovane che evoluto, sembrava essere caratterizzata da un elevato grado di omogeneità e isotropia in accordo al Principio Cosmologico: *su grande scala (maggiore di 200 Mpc) l'universo è, in buona approssimazione, omogeneo e isotropo in qualsiasi momento*. Per descrivere l'evoluzione cosmologica si deve, quindi, impostare una metrica spazio-temporale che tenga conto di questo Principio. Dal punto di vista di un osservatore fisico ciò significa che ogni iper-superficie che descrive l'universo in uno spazio quadridimensionale, gli deve apparire, in ogni momento, omogenea e isotropa e deve essere la stessa anche se cambia osservatore. In altre parole, il Principio Cosmologico implica il Principio Copernicano (*Pavone, 1999*): *"noi non siamo osservatori privilegiati dell'universo"*. Inoltre, se si trova che le galassie lontane stanno recedendo da noi in tutte le direzioni, questo non significa che abbiamo il privilegio di essere al centro fisso di un universo in espansione, ma che la natura dell'espansione cosmica è tale che *la recessione delle galassie lontane è quella che sarebbe osservata da ogni altro osservatore situato in qualsiasi altro punto dell'universo* (*Jones et al., 2003*). La conseguenza immediata è: una galassia lontana deve muoversi in tutte le direzioni perché non c'è una direzione speciale. Ma tutte le direzioni significa nessuna direzione, cioè è il sistema di riferimento che si espande.

### 4.2.3 Cosmologia Moderna e Centro dell'Universo

Dopo la conclusione del *Grande Dibattito*, che si è verificato presso l'Accademia Nazionale delle Scienze di Washinton, nell'Aprile del 1920, (*Mihalas & Binney, 1968, Cap.1*), tra H. Shapley e H.D. Curtis, la sequenza di spostamenti relativi del centro dell'Universo è arrivata al suo fine. Questo centro era stato spostato dalla Terra al Sole da Copernico (1543) e Galileo (1609). Dopo di loro, alla fine del XVIII secolo, W. Herschel aveva concluso che il Sole si trovava più o meno nel centro della sua prima mappa della Via Lattea. Fino all'universo di Kapteyn (*Kapteyn, 1922*) la singolarità della posizione eliocentrica è stata fortemente sostenuta. È stato H. Shapley che ha scoperto che il Sole, in realtà, era distante dal centro di circa 15 Kpc (tra 1915-1919) utilizzando la distribuzione degli ammassi globulari in longitudine galattica. L'ultimo atto della rivoluzione copernicana si identifica con la conclusione del *Grande Dibattito*: né la Terra, né il Sole, né la nostra galassia sono speciali. La cosmologia moderna conclude, infatti, che il centro dell'universo non esiste. Questo risultato, dall'inizio del 20° secolo, ha avuto, e anche oggi continua ad

avere, un enorme impatto a livello culturale. Se il sito dove si trova la vita, all'interno della trama dell'universo, era senza alcuna rilevanza, la vita stessa appare come "muffa" su un pianeta perduto nell'immensità dell'Universo. L'uomo e la sua vita apparivano come assolutamente marginali nel contesto cosmico, ed inoltre, secondo il Principio Copernicano, anche il punto di vista umano non era di alcuna importanza perché ciascun osservatore situato in qualsiasi punto dell'universo avrebbe visto l'universo nello stesso modo. L'uomo, accettando questa "tremenda umiliazione", è stato comunque in grado di costruire modelli cosmologici, sulla base del Principio Copernicano, che hanno, invece, portato di nuovo sulla scena la connessione tra Cosmo e Vita, sottolineando non tanto la centralità del sito della Vita, ma la Vita stessa.

#### 4.2.4 L'enigma dei Grandi Numeri

La storia del PA (Principio Antropico) è iniziata nel 1923 con A. Eddington, che ha suggerito che il numero totale di protoni all'interno dell'orizzonte dell'universo,  $N \simeq 10^{80}$ , potesse svolgere un ruolo nel determinare alcune costanti fondamentali della natura (*Barrow & Tipler, Capitolo 4, 1986*). Ci sono infatti alcune coincidenze basate sui *Grandi Numeri*: ad esempio, la costante di accoppiamento della forza gravitazionale è, in unità adimensionali:

$$\alpha_G = Gm_N^2/\hbar c \simeq 10^{-39} \quad (4.1)$$

dove  $m_N$  è la massa del nucleone,  $G$  è la costante di gravità e  $\hbar$  è la costante di Planck divisa per  $2\pi$ .  $\alpha_G$  risulta essere  $\simeq N^{-1/2}$ . Inoltre, il rapporto della forza elettrica tra l'elettrone e il protone e la loro forza gravitazionale fra di loro, risulta essere:

$$N_1 = e^2/Gm_p m_e \simeq 10^{39} \quad (4.2)$$

che è circa  $N^{1/2}$  ( $m_p$  e  $m_e$  sono, rispettivamente, le masse del protone e dell'elettrone). Anche il rapporto tra l'età dell'universo  $t_0$  e il tempo di attraversamento della luce del raggio classico dell'elettrone,  $r_e$  ( $\simeq 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ ), è dello stesso ordine di grandezza:

$$N_3 = \frac{t_0}{r_e/c} \simeq 6 \cdot 10^{39} \quad (4.3)$$

con  $c$  velocità della luce. Dal 1937 P. Dirac ha preso in considerazione, molto seriamente, queste coincidenze, concludendo che la gravità deve indebolirsi con l'aumentare del tempo cosmico.

Per comprendere il significato profondo di queste strane speculazioni, dobbiamo guardare a quello che sappiamo ora, grazie ai modelli cosmologici moderni. Le re-

lazioni tra i grandi numeri indicano, infatti, l'esistenza di un "misterioso" legame tra il macro-cosmo e il micro-cosmo (come oggi è stato dimostrato). La crescente complessità microscopica, all'inizio dell'universo (pensiamo, per esempio, all'epoca della *Ricombinazione* quando gli atomi si formarono), appare essere funzionale al fine di consentire la formazione di strutture di grandi dimensioni, che, a sua volta, consentirebbe alla complessità microscopica di crescere mediante il proseguimento della sintesi nucleare all'interno delle stelle, formatesi come sub-unità di queste strutture. Macro-cosmo e il micro-cosmo appaiono correlati in modo straordinario. A queste speculazioni interessanti degli anni trenta del novecento, si dovrebbe aggiungere il rapporto sottolineato da Dicke nel 1961 tra l'età dell'Universo e il tempo richiesto per formare il carbonio, necessario alla Vita, all'interno delle stelle, altro collegamento tra macro e micro cosmo.

#### 4.2.5 Principio Antropico

*B. Carter (1974)* per la prima volta ha sottolineato che la chiave di lettura dei collegamenti osservati fra macro e micro-cosmo era la Vita. Si deve a lui la prima formulazione del cosiddetto Principio Antropico (PA): "*quello che ci si può aspettare di osservare deve essere limitato dalle condizioni necessarie per la nostra presenza come osservatori*" (*Carter, 1974, pag.291*). *Barrow & Tipler (1986)* hanno ripreso l'idea di Carter riformulando il Principio Antropico in due modi, nella forma debole (WAP) come segue: "*i valori osservati di tutte le grandezze fisiche e cosmologiche non sono ugualmente probabili, ma devono sottostare alle richieste che esistano siti dove la vita basata sul carbonio possa evolvere e dal requisito che l'universo debba essere abbastanza vecchio per aver già provveduto a questo*". Nella forma forte (SAP) la formulazione è: "*l'universo deve avere quelle proprietà che permettono alla vita di svilupparsi all'interno di esso ad un certo punto della sua storia*". Qual è la rilevanza di questi due formulazioni? Si aprono le porte ad un ampio spettro di interpretazioni e a molte controversie che nascono dai diversi significati che le persone assegnano agli stessi concetti coinvolti. Ma la cosa più importante sta in questo: per la prima volta una connessione fisica tra la storia dell'universo e quella della Vita viene chiaramente enunciata. Per definire questi *principi*, una lunga catena di fenomeni fisici è stata raccolta da *Barrow & Tipler (1986)*, con tutte le particolari, sottili condizioni che la Vita richiede per apparire. Prima di tutto cerchiamo di sottolineare la profonda differenza tra il WAP e SAP. Si dovrebbe notare che la formulazione nel WAP si modifica nel SAP sostituendo *può* con *deve*. Ciò significa che la possibilità dello sviluppo della *Vita*, nella versione WAP, diventa necessità nel SAP. Ciò implica l'esistenza di una finalità metafisica in tutta l'evoluzione cosmologica. C'è, infatti, una componente metafisica nella formulazione del SAP. Al contrario, quando si analizzano le diverse caratteristiche di alcune fasi evolutive del cosmo o le proprietà chimico-fisiche di alcune sostanze coinvolte nei processi per

costruire la Vita, in questo caso non si scavalca il dominio della Scienza. Si deve semplicemente considerare la Vita stessa come un fenomeno complesso, guardandola come una funzione a molti parametri e testare quanto essa sia sensibile ad una piccola variazione delle sue variabili. Tenendo conto di tutti i parametri per l'insorgere della Vita e degli eventi compatibili ed indipendenti di cui la Vita stessa ha bisogno, è evidente che la probabilità di avere *vita* non può che tendere a zero; *"ma noi ci siamo!"*. Diceva Hoyle (1959): *"Non credo che ogni scienziato che abbia esaminato l'evidenza manchi di tirare la conclusione che le leggi della fisica nucleare siano state deliberatamente progettate per quanto riguarda le conseguenze che producono all'interno delle stelle. Se così fosse, allora le mie stranezze apparentemente casuali sono diventate parte di un programma previsto e profondo. Se, poi, così non fosse noi saremmo rimandati ad una sequenza mostruosa di accidenti"*. Allora la domanda sorge spontanea: *perché?* E' importante essere il più precisi possibile circa il limite tra i due domini, quello della Scienza e quello di tutto ciò che si trova al di sopra della scienza. Sopra la scienza si entra nel mondo della *Metafisica* (seguendo il significato originale relativo all'ordine di opere di Aristotele, *"metà tà fusikà"*, vale a dire, tutto ciò che è al di là della fisica) o della *Trascendenza*, che sono utilizzati come sinonimi in questo contesto. Il problema del rapporto *Scienza-Trascendenza* risale alle origini della Scienza moderna, nato grazie a Galileo. Anche se il dibattito è al di fuori di questa trattazione, tale rapporto entra nelle linee principali del problema al fine di individuare correttamente il WAP e il SAP. La Scienza si riferisce al dominio della quantità, della corporeità; la Metafisica si riferisce al dominio di ciò che sta al di là di esse. Le due metodologie sono completamente diverse (Dallaporta, 1997). I due domini si sviluppano lungo due assi ortogonali: quello orizzontale, la Scienza, quello verticale, la Trascendenza. All'interno del dominio della Scienza si trovano le domande sulle sottili e incredibili connessioni tra Cosmo e Vita che il WAP sottolinea. Al contrario, quando vogliamo aggiungere i *perché* alle possibili risposte a tali domande, come sostiene il SAP, stiamo andando oltre la Scienza. Le domande che il WAP presenta sono comunque così forti che l'aggettivo *debole*, forse, non appare molto adatto. Vediamo allora una riformulazione del WAP: *"è la raccolta dei fatti che collegano i fattori -determinanti le caratteristiche principali del cosmo e della sua evoluzione- con la Vita, mediante la quale è possibile dedurre quanto fortemente il fenomeno Vita dipenda da questi fattori"*. Tale riformulazione non è che il WRAP, già richiamato all'inizio del capitolo.

### 4.3 A ) I valori delle varie costanti fisiche fondamentali.

Come ben noto, le quattro forze fondamentali, o interazioni fondamentali, che sono alla base degli scambi di energia tra le particelle e che sono responsabili di tutta la

struttura dell'universo, sono:

- forza di gravità, descritta nella sua forma più completa dalla teoria della relatività generale;
- forza elettromagnetica, che descrive tutte le interazioni tra cariche elettriche e magnetiche;
- forza nucleare debole, che produce decadimenti di particelle di massa più elevata in quelle più stabili di minor massa;
- forza nucleare forte, descritta dalla cromodinamica quantistica.

Possono essere descritte mediante le loro costanti di accoppiamento (che definiscono l'intensità, in unità adimensionali, dell'interazione alla quale si riferiscono), accompagnate dal loro raggio d'azione e dalle caratteristiche dei loro mediatori. Vediamole, schematicamente, nelle Tabelle seguenti:

Costante di Accoppiamento della Forza Gravitazionale	$\alpha_G = \frac{Gm_n^2}{hc} \simeq 10^{-39}$ <i>m<sub>n</sub> : massa nucleone, G: cost. Gravitazionale)</i>
Mediatore	Gravitone, massa a riposo: $m_0 = 0$
Spin del mediatore	S=2
Range	Infinito

Tabella 4.1: Costante di accoppiamento, caratteristiche del mediatore (massa a riposo, Spin) e *range* d'azione per la Forza Gravitazionale.

Costante di Accoppiamento della Forza Elettromagnetica	$\alpha = \frac{e^2}{hc} \simeq \frac{1}{137} \simeq 7.3 \cdot 10^{-3}$ <i>e : carica elettrica elementare</i>
Mediatore	Fotone, massa a riposo: $m_0 = 0$
Spin del mediatore	S=1
Range	Infinito

Tabella 4.2: Come Tab. 4.1 per la Forza Elettromagnetica.

Costante di Accoppiamento della Forza Debole	$\alpha_W = \frac{g_W^2}{hc} \simeq 10^{-5}$ <i>g<sub>W</sub> : analogo di e</i>
Mediatore	Bosoni di carica positiva, negativa e neutra: $W^+, W^-, Z^0; m_0 \simeq 100 \text{ GeV}$
Spin del mediatore	S=1
Range	$\leq 10^{-16} \text{ cm}$

Tabella 4.3: Come Tab. 4.1 per la Forza Debole responsabile, ad es., del decadimento  $\beta : n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ , con  $n$  neutrone,  $p$  protone,  $e^-$  elettrone,  $\tilde{\nu}_e$  antineutrino elettronico.

Costante di Accoppiamento della Forza Forte	$\alpha_S = \frac{g_S^2}{\hbar c} \simeq 15$ $g_S : \text{analogo di } g_W$
Mediatore	Gluoni $m_0 = 0$
Spin del mediatore	S=1
Range	$\simeq 10^{-13} \text{cm}$

Tabella 4.4: Come Tab. 4.1 per la Forza Forte.

Queste costanti di accoppiamento variano, in generale, al variare dell'energia. Ad es.  $\alpha_W$  cresce più rapidamente di  $\alpha$  all'aumentare dell'energia in modo che, raggiunta una certa soglia, le due interazioni si unificano. L'unificazione elettrodebole è stata osservata al CERN ad energia intorno ai 100 GeV (*Rubbia e van der Meer, Nobel 1984*). Poichè le primissime fasi dell'evoluzione Cosmologica sono caratterizzate da variazioni enormi di energia, si ipotizza che, dopo l'unificazione elettrodebole (avvenuta a circa  $10^{-11} \text{sec}$ ), subentri, andando verso la singolarità e quindi a più alte energie ( $\sim 10^{15} \text{GeV}$ ), l'epoca cosiddetta della GUT ( $10^{-37} \text{sec}$ ), cioè di unificazione delle tre forze (elettromagnetica, debole e forte) ed inoltre, prima ancora, sotto il tempo di Planck ( $t_p \simeq 10^{-43} \text{sec}$ ), ad energie ancora maggiori ( $>10^{19} \text{GeV}$ ), la completa unificazione (TOE) di tutte e quattro le forze, compresa la gravità; si presenta una sintesi grafica di quanto descritto in Fig. 4.1 e, in Tab. 4.5, riportiamo schematicamente i valori di tempo, energia e temperatura alla fine delle fasi (Fase 0: TOE, Fase 1: GUT, Fase 2: Unificazione Elettrodebole (UE), Fase 3: Confinamento dei quark).

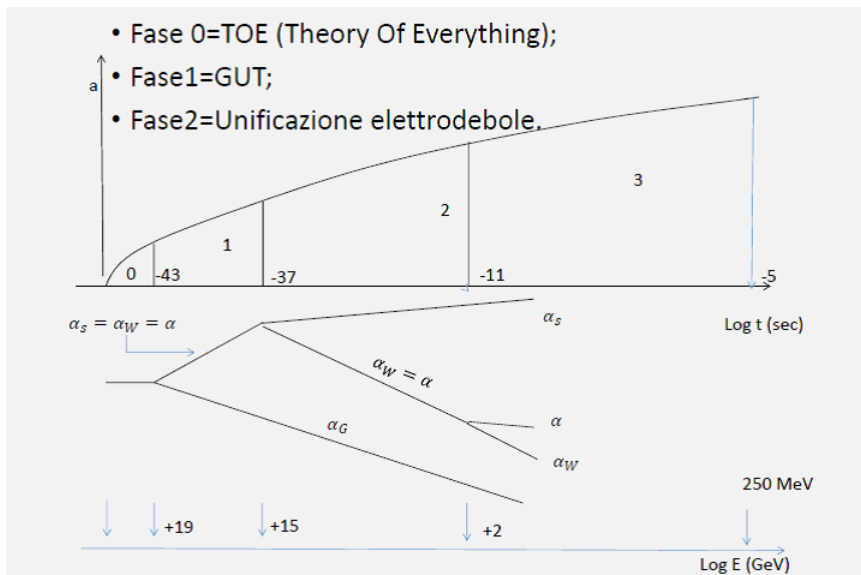


Figura 4.1: Percorso dell'unificazione delle quattro forze fondamentali in funzione del logaritmo dell'energia e del logaritmo del tempo (*Secco, Galaxy Dynamics, 2016*).



Fase	Tempo	Energia	Temperatura
Fine Fase 0: TOE	$10^{-43}(s)$	$10^{19}(GeV)$	$10^{32}(K)$
Fine Fase 1: GUT	$10^{-37}(s)$	$10^{15}(GeV)$	$10^{28}(K)$
Fine Fase 2: UE	$10^{-11}(s)$	$100(GeV)$	$10^{15}(K)$
Fine Fase 3 (conf. quarks)	$10^{-5}(s)$	$250(MeV)$	$10^{12}(K)$

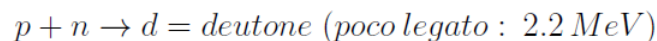
Tabella 4.5: Valori di tempo, energia e temperatura alla fine delle Fasi 0, 1, 2, 3 rispettivamente, TOE, GUT, Unificazione Elettrodebole (UE), confinamento dei quarks. Si ricorda che alla fine della GUT vi è asimmetria materia antimateria, *Inflazione*; alla fine della Fase 3 vi è il confinamento dei *quarks* nei nucleoni:  $p$ ,  $n$ .

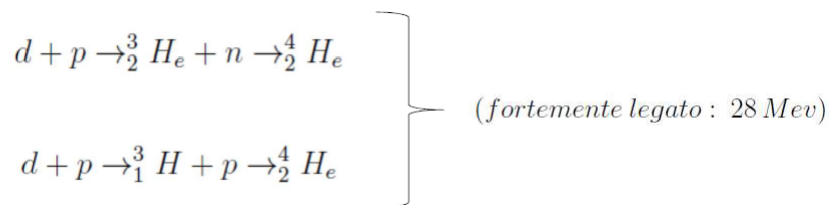
### 4.3.1 L'importanza delle costanti della fisica fondamentale per la Vita

I valori, appena descritti, con cui le forze si sono separate l'una dall'altra (a causa di rotture di simmetria) sono fondamentali nell'epoca della nucleosintesi primordiale (circa 200 sec). Infatti, se  $\alpha_s$  aumentasse solo dello 0,3%, si formerebbe anche il di-neutrone, mentre se  $\Delta\alpha_s/\alpha_s$  fosse solo maggiore del 3,4 %, anche il di-protone si legherebbe. Se, invece,  $\Delta\alpha_s/\alpha_s$  diminuisse meno del 9 %, il nucleo di deuterio non sarebbe legato (*Davies, 1972 in Barrow & Tipler, Capitolo 5, 1986*).

Questi piccole variazioni potrebbero avere conseguenze catastrofiche per la Vita. Ad esempio:

- Se non si lega il deuterio, le conseguenze per la nucleosintesi degli elementi necessari per lo sviluppo della Biologia, sarebbero notevoli perché *un anello fondamentale nella catena di nucleosintesi verrebbe a mancare* (*Barrow & Tipler, Capitolo 5, 1986*).
- Se, al contrario, l'interazione forte fosse "appena più forte", lo stato legato stabile del di-protone avrebbe la conseguenza che *tutto l'idrogeno nell'universo si sarebbe bruciato nel formare  ${}^2He$  (di-protone) durante le prime fasi del Big Bang e non esisterebbero, al giorno d'oggi, composti con l'idrogeno nè stelle stabili di lunga durata* (*Barrow & Tipler, Capitolo 5, 1986*). Infatti le reazioni nucleari per formare l' ${}^4He$  avrebbero trovato un canale di circa  $10^{18}$  volte più veloce rispetto a quello senza la formazione del di-protone. La riserva di idrogeno sarebbe stata rapidamente consumata senza consentire, ad esempio, la formazione successiva di acqua. Vediamo di seguito, sinteticamente, i passaggi della ncleosintesi primordiale:





Inoltre, la stabilità di un nucleo con *un numero di massa* ( $A$ ) e *numero atomico* ( $Z$ ) è legato al rapporto fra l'intensità della forza elettromagnetica e quella della forza forte, nel modo seguente:

$$\frac{Z^2}{A} \leq 49 \left( \frac{\alpha_s}{10^{-1}} \right)^2 \left( \frac{1/137}{\alpha} \right) \quad (4.4)$$

*"In modo che, se l'interazione elettromagnetica fosse più elevata ( $\alpha$  maggiore) o un' interazione forte un po' più debole ( $\alpha_s$  minore), oppure entrambe, allora nuclei biologicamente essenziali come il carbonio non esisterebbero in natura"* (Barrow & Tipler, Capitolo 5, 1986).

Questi sono solo pochi esempi di una vasta collezione data nel libro citato di Barrow & Tipler (1986).

## 4.4 B) Le proprietà globali dell'universo e della sua storia

### 4.4.1 Crescita della complessità

C'è un *trend* impressionante nell'intera storia dell'universo, che inizia fin dalle primissime fasi della sua evoluzione, a ridosso del Big-Bang, quando si rompono successivamente le simmetrie corrispondenti alle tre grandi unificazioni delle forze. Ad esempio, quando il meccanismo di Higgs inizia ad agire in modo da differenziare la forza elettromagnetica da quella debole, viene data una massa rilevante ai bosoni vettori  $W^\pm$  e  $Z_0$ , mediatori della forza debole, mentre invece la massa dei fotoni, mediatori della forza elettromagnetica, rimane nulla. E' come se l'obbiettivo dell'universo fosse quello di differenziarsi, di articolarsi in modo da crescere la sua complessità o, in altre parole, di aumentare la sua informazione termodinamica microscopica locale<sup>2</sup>,  $I$ , senza violazione alcuna del II° Principio della Termodinamica. Il medesimo paradigma viene seguito all'epoca della ricombinazione, quando si formano gli atomi. Dopo questa epoca le strutture su grande scala si formano arricchendo l'universo di straordinaria Bellezza e di complessità anche su scala macroscopica. Tutto avviene come se un processo di "sbozzatura" dell'universo fosse in atto. Ma questo è esattamente ciò di cui il prodotto finale, la Vita, ha bisogno.

<sup>2</sup>Secondo Layzer (1976),  $I = S_{max} - S$ , dove  $S_{max}$  indica il valore massimo che l'entropia del sistema può avere, non appena i vincoli che costringono il suo valore ad  $S$  vengono rilasciati.

Infatti, la Vita richiede un altissimo livello di strutturazione, di differenziazione, di locale informazione termodinamica. L'universo appare, in un certo senso, piegarsi a questa necessità.

#### 4.4.2 La sintonia fine (fine tuning) dell' espansione

Prima dell'introduzione del meccanismo di *inflazione* dovuto a Guth (1981) (Coles & Lucchin, 1995), uno dei problemi da risolvere nella cosmologia moderna era il problema della *piattezza dell'Universo*. Sembrava molto strano che, in qualsiasi universo fossimo (aperto, critico o chiuso), il corrispondente modello che lo descriveva avesse lo stesso limite per il *parametro di densità*  $\Omega$ , al tendere del tempo verso la singolarità<sup>3</sup>. Tutti i modelli non solo hanno come limite l'universo critico, vale a dire con  $\Omega = 1$ , ma vanno verso questo valore in un modo sorprendentemente *fine*: ad esempio, all'epoca di Planck,  $t_p = 10^{-43} \text{sec}$ , un universo aperto deve avere:  $\Omega(t_p) = 1 - 10^{-62}$ , uno chiuso,  $\Omega(t_p) = 1 + 10^{-62}$ . Inoltre, al tempo presente, all'età  $t_0$ , vale a dire, dopo circa  $14 \cdot 10^9$  anni, il *parametro di densità* non differisce molto da 1. I modelli accettabili per l'universo, infatti, sono caratterizzati da un valore attuale di detto parametro, dentro i limiti:  $0.03 < \Omega_0 < 2$ , ( $\Omega(t_0) = \Omega_0$ ). Significa che ognuno di tali universi deve ora differire da quello critico di meno di un fattore 100, quando, nel contempo la variazione della sua densità dal Big-Bang al momento attuale, è variata di 123 ordini di grandezza. I vincoli di  $\Omega_0$  non sono banali, perché sono strettamente correlati con l'età dell'universo e con la possibilità o meno che esso riesca a formare le strutture. Effettivamente:

- Se  $\Omega_0$  fosse maggiore di 2 l'universo collaserebbe su se stesso troppo presto, non raggiungendo nemmeno, per  $\Omega_0 \gg 1$ , le condizioni necessarie per la formazione degli atomi.
- Viceversa, se  $\Omega_0$  fosse minore del limite inferiore, l'espansione sarebbe così rapida che nè stelle, nè galassie riuscirebbero a formarsi.

In entrambi i casi la Vita non avrebbe avuto le condizioni necessarie per svilupparsi. L'*inflazione* sembra eliminare questa "scelta", così peculiare, fatta dall'universo al suo inizio, anche se il problema del *fine tuning* viene trasferito a quello, non ancora risolto, della modulazione della stessa *inflazione* (v. Coles & Lucchin, 1995, Cap. 7). Inoltre, la maggior parte dei modelli inflazionari predicono un Universo quasi *piatto*, con un valore molto speciale di  $\Omega_0 \simeq 1$ . Le stime dinamiche fornite dalle quantità della materia oscura e di quella ordinaria conducono ad un valore tipico di  $\Omega_0(\text{materia}) \simeq 0.3$ . Nel 1998 l'analisi della relazione tra distanza-redshift, usando

---

<sup>3</sup> $\Omega$  è il rapporto della densità di energia della materia (o della radiazione, se questa è prevalente) rispetto a quella che caratterizza l'universo critico, vale a dire, a geometria *euclidea*. L'universo aperto corrisponde ad  $\Omega < 1$ , quello critico si ha per  $\Omega = 1$  e quello chiuso con  $\Omega > 1$ .

per i redshift più elevati le supernove di tipo *Ia*, ha mostrato che a partire da circa l'epoca di nascita del Sole ( $z \simeq 0.5$ ), l'Universo si espande in modo accelerato (*Riess et al., 1998*). Il contributo dominante all'attuale *budget* di energia dell'Universo sarebbe allora una componente di *energia oscura*. L'aggettivo "oscura" viene dato perché è ignota la sua origine e perché la sua equazione di stato (la relazione tra pressione,  $p$ , e la densità di energia,  $\rho$  con  $c$  velocità della luce) è:  $p = \omega c^2 \rho$ , con  $\omega < -1/3$  che caratterizza un termine di pressione con effetto anti-gravitazionale. Una costante cosmologica positiva  $\Lambda_0$  con una equazione di stato avente  $\omega = -1$ , sarebbe in grado di riprodurre un tale fluido, ma questo richiederebbe un *fine tuning* molto serio. Una costante cosmologica di questo tipo sembra aver già generato un'espansione accelerata dell'Universo (*Inflazione*) all'epoca della GUT ( $\simeq 10^{-35} \text{sec}$ ), con una densità di energia che doveva essere  $\rho_\Lambda \simeq 10^{15} \text{GeV}^4$  (in unità naturali). All'epoca attuale, per ottenere un parametro di densità  $\Omega_{\Lambda_0} \simeq 0.7$  (in modo tale che  $\Omega_0 = \Omega_0(\text{materia}) + \Omega_{\Lambda_0} \simeq 1$ ), la densità di energia corrispondente a  $\Lambda_0$ , dovrebbe essere  $\rho_\Lambda \simeq 10^{-47} \text{GeV}^4$ . Ciò significa che (riferendosi alla scala di Planck e in  $\text{g/cm}^3$ ) la densità di energia oscura deve essere calata di circa 123 ordini di grandezza. Il mistero è proprio il motivo per cui dovrebbe essere divenuta così piccola, ma con un valore tale che il bilancio totale di *materia ordinaria + materia oscura + energia oscura* sia  $\Omega_0 \simeq 1$ . Una risposta interessante è data da *Rees (2002)*, il quale include, come una delle possibili soluzioni per il mistero di  $\Lambda$ , la seguente:

- "il suo tuning ... può essere una richiesta fondamentale per la nostra esistenza".
- Infatti, un valore più alto  $\Lambda$  prima o dopo la formazione delle galassie, avrebbe conseguenze catastrofiche impedendo (prima) o distruggendo (dopo) la loro formazione, a causa del suo effetto di repulsione opposto a quello attrattivo della gravità. Tale tipo di universo sarebbe *sterile*.

### 4.4.3 Nucleosintesi del Carbonio e dell'Ossigeno

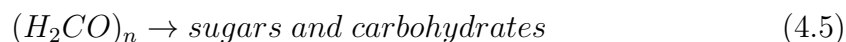
Ricordiamo un'altra delle tante incredibili "strette" attraverso le quali la storia evolutiva dell'Universo è costretta a passare per produrre la grande quantità di carbonio che la Vita richiede. Ciò avviene non appena la nucleosintesi, all'interno della prima generazione di stelle, trasforma tre nuclei di elio in uno di carbonio come segue:  $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ . In un primo momento due nuclei di elio si scontrano producendo il nucleo  $^8\text{Be}$ . Questo nucleo è instabile e dovrebbe decadere in circa  $10^{-7} \text{sec}$  a meno che non catturi un terzo nucleo di elio, in modo da fondersi in  $^{12}\text{C}$ . Questa catena alla temperatura di reazione di circa  $10^8 \text{K}$ , non produce abbastanza carbonio per la Vita a meno che l'ultima reazione non sia *risonante*, il che significa che deve esistere un livello nel nucleo di  $^{12}\text{C}$  circa uguale all'energia intrinseca dei due nuclei di  $^8\text{Be} + ^4\text{He}$ , più la tipica energia cinetica media di collisione a  $10^8 \text{K}$ , in

modo che la *rate* dell'ultima reazione possa crescere fortemente. Il livello energetico di risonanza esiste davvero e corrisponde a  $7.6549 \text{ MeV}$  come previsto da Hoyle nel 1954.

Questo canale di risonanza fu verificato, in laboratorio, da W. A. Fowler meritandogli, anche per questo, il Nobel nel 1983 (*Reeves, 1991, pg.61; Ortolan & Secco, 1996*). Si tratta di un buon esempio della capacità di previsione del WRAP, come si addice ad un Principio della Fisica.

Va notato che la reazione successiva a questa, vale a dire quella del bruciamento del carbonio che produce l'ossigeno deve anch'essa essere ben modulata, ma in modo opposto. Infatti, la seguente reazione:  $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$  *non deve essere risonante*. Se lo fosse, tutto il carbonio sarebbe trasformato in ossigeno. Per fortuna non è così, anche se c'è un livello di risonanza per il nucleo di ossigeno, ma con energia leggermente minore,  $7.1187 \text{ MeV}$ .

Così vengono prodotte quantità comparabili di carbonio e ossigeno per poter rendere molto comune la molecola di  $\text{CO}$ . Come conseguenza la formaldeide,  $\text{H}_2\text{CO}$ , risulta essere l'associazione di due delle molecole più comuni ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ) nell'Universo. A loro volta le molecole:



(zuccheri e carboidrati) sono facili da essere costruite (*Hoyle, 1991*). Notiamo, infine, che i livelli di energia nucleare del carbonio e dell'ossigeno sono strettamente dipendenti dalle costanti di accoppiamento:  $\alpha$  e  $\alpha_s$ . Se  $\alpha$  variasse più del 4 % o  $\alpha_s$  più dello 0,4 % la produzione del carbonio e dell'ossigeno cambierebbero di un fattore compreso fra 30-1000, (*Barrow, 2003*).

#### 4.4.4 Ciclo CNO e la rarità del Fosforo

Prima di concludere il capitolo, discutiamo, brevemente, altri due elementi essenziali alla Vita: Azoto (N) e Fosforo (P). Circa 70% del corpo umano è composto da acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), il rimanente da carbonio ( $\simeq 19.4\%$ ), idrogeno, ossigeno, azoto. L'azoto, è presente in una quantità considerevole: costituisce infatti circa il 2,5% del corpo umano (*Treccani.it*). Il P, presente in minore quantità nel corpo umano ( $\simeq 1.1\%$ ), è comunque essenziale perchè si trova negli acidi nucleici sotto forma di trifosfato ( $\text{PO}_3$ ) e permette il legame tra molecole di zucchero su cui si imperniano le basi azotate.

Come vedremo, N nelle reazioni stellari è un catalizzatore, dovrebbe essere processato e rimanere in piccolissime quantità; inoltre, nelle stelle massicce che bruciano ossigeno, il P prodotto è davvero una percentuale irrisoria. Eppure, questi due elementi appaiono in quantità non trascurabili sul nostro Pianeta<sup>4</sup>. Vediamo

<sup>4</sup>Si ricorda che l'atmosfera terrestre è composta dal 78% di N e il 21% di O (il rimanente 1%, che include anche la  $\text{CO}_2$ , è composto da vari gas). Il fosforo non si trova in natura allo stato

perchè ciò avviene (si rimanda ad una trattazione completa delle principali reazioni termonucleari in *Chiosi, 2012, pg. 200-216*).

### Cicli CN e CNO

Se nel materiale stellare sono inizialmente presenti gli elementi C, N e O e se la temperatura è sufficientemente elevata, possono avvenire due cicli di reazioni noti come CN e CNO che portano alla fusione indiretta di quattro  ${}^1H$  in un nucleo di  ${}^4He$ . Entriamo nel dettaglio: gli isotopi di C, N e O partecipanti alle reazioni vengono continuamente distrutti e creati dalle reazioni stesse e svolgono, pertanto, il ruolo di catalizzatori. E' importante, però, notare, fin da subito, che tra i prodotti della reazione, quella che trasforma l'azoto in ossigeno è la più lenta: a 20 milioni di K avviene in 1 milione di anni! Perciò l'azoto tende ad accumularsi divenendo un prodotto abbondante nel materiale stellare. Per dare l'idea dell'enormità del processo si pensi che nel core del Sole la fusione nucleare trasforma in energia 5 milioni di tonnellate di idrogeno ogni secondo (*Galletta, 2012; Galletta & Sergi, 2005; Chiosi, 2012*).

Lo schema del ciclo CN è il seguente:

Ciclo CN	Q (MeV)
${}^{12}C(p, \gamma){}^{13}N$	1.94
${}^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu$	1.51
${}^{13}C(p, \gamma){}^{14}N$	7.54
${}^{14}N(p, \gamma){}^{15}O$	7.29
${}^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^+ + \nu$	1.76
${}^{15}N(p, \alpha){}^{12}C$	4.96

La reazione  ${}^{15}N + p$  ha una certa probabilità (1/2500) di dar luogo a  ${}^{16}O + \gamma$  invece che  ${}^{12}C + \alpha$ , questo apre un'ulteriore serie di reazioni:

Ciclo CNO	Q (MeV)
${}^{15}N(p, \gamma){}^{16}O$	12.12
${}^{16}O(p, \gamma){}^{17}F$	0.60
${}^{17}F \rightarrow {}^{17}O + e^+ + \nu$	2.22
${}^{17}O(p, \alpha){}^{14}N$	1.19
${}^{17}O(p, \gamma){}^{18}F$	
${}^{18}F \rightarrow {}^{18}O + e^+ + \nu$	
${}^{18}O(p, \alpha){}^{15}N$	
${}^{18}O(p, \gamma){}^{19}F$	
${}^{19}F(p, \alpha){}^{16}O$	

L'insieme dei due gruppi di reazioni è noto come ciclo CNO. E' chiaro che, trattandosi di un ciclo, il gruppo CN può iniziare quando è presente uno qualunque elementare, ma sotto forma di fosfato (sale dell'acido fosforico), è abbondante in alcune rocce e nelle cellule degli esseri viventi, del cui metabolismo è un componente essenziale (come vedremo a breve).

degli elementi catalizzatori  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$  avendo assunto come elemento iniziale  $^{12}\text{C}$  solo a titolo di esempio. Esso può operare solo se le temperature sono dell'ordine di  $15 \cdot 10^6 \text{K}$ . Il secondo gruppo di reazioni, per essere attivo, richiede temperature ancora maggiori, attorno a  $20 \cdot 10^6 \text{K}$ .

Se la combustione dell'idrogeno avviene attraverso il ciclo CN, il modo in cui le abbondanze vanno all'equilibrio dipende dalle sezioni d'urto di  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  e  $^{15}\text{N}$ . La sezione d'urto più piccola è quella di  $^{14}\text{N}$  seguita da quella del  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  e  $^{15}\text{N}$ . Ci si aspetta pertanto che il 95% dei nuclei sia sotto forma di  $^{14}\text{N}$ . Partendo da  $^{12}\text{C}$ , prima si raggiunge il rapporto di equilibrio fra  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ , poi fra  $^{14}\text{N}$  e  $^{15}\text{N}$  ed infine le due coppie andranno all'equilibrio generale. Le abbondanze di equilibrio non sono le stesse per ogni temperatura, ma variano con questa. In genere, in materiale che non ha subito processi nucleari, il carbonio è dominante rispetto ad azoto ed ossigeno, mentre in materiale processato CN il carbonio è diminuito a favore di azoto ed ossigeno, infine in materiale processato CNO il carbonio ed ossigeno sono diminuiti a favore dell'azoto. Le abbondanze di equilibrio di  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$  per una temperatura di circa  $15 \cdot 10^6 \text{K}$  sono, in massa (v. *Chiosi, 2012, pg. 213-215; Schwarzschild, 1958*):

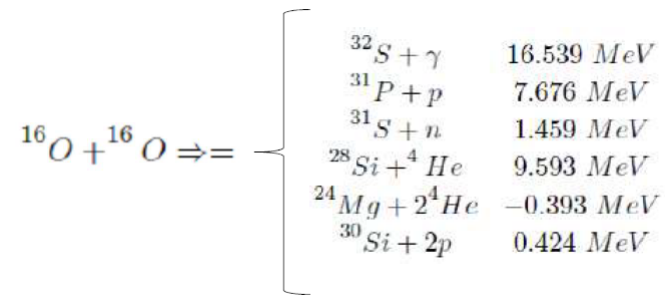
$$\frac{X(^{12}\text{C})}{X(^{13}\text{C})} = 4.3 \pm 1.6 \quad \frac{X(^{14}\text{N})}{X(^{15}\text{N})} = 2800 \pm 1200 \quad \frac{X(^{14}\text{N} + ^{15}\text{N})}{X(^{12}\text{C} + ^{13}\text{C})} = 21 \pm 8$$

### La rarità del Fosforo

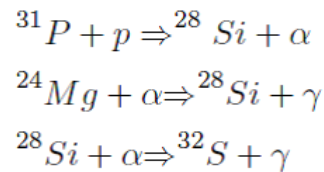
Sappiamo che la vita sulla Terra si basa su H, C, N, O, elementi tra i più abbondanti nell'universo; non comune, ma comunque essenziale è il fosforo (P), presente per esempio nel DNA, la cui abbondanza cosmica è minore di quella degli altri elementi degli acidi nucleici. Un elemento così poco abbondante appare, quindi, essenziale alla Vita. Da dove viene?

La ragione della sua scarsità risiede nel suo meccanismo di sintesi che avviene in buona parte col bruciamento dell'ossigeno a circa un miliardo di gradi; queste temperature vengono raggiunte solo nel nucleo di stelle massicce, dopo che sono stati sintetizzati C, N e O. Le stelle massicce sono meno numerose di quelle di piccola massa, perciò il fosforo sarà sempre minore degli altri elementi base per la Vita. In termini di abbondanze cosmiche ci sono circa 4 O ogni 10000 H con C e N presenti in percentuale, rispettivamente, pari a 1/2 e 1/8 rispetto ad O. Nel gas interstellare esistono solo 2 atomi di P ogni 100 milioni rispetto all'H.

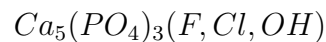
Riportiamo di seguito una sequenza di bruciamenti dell'ossigeno che arriva a produrre  $^{31}\text{P}$  (seconda riga) (*Galletta, 2012; Chiosi, 2012*):



seguite dalle:



Sulla Terra, ad esempio, i vulcani, oltre ad essere importanti per la formazione e la termo-regolazione dell'atmosfera, sono anche il luogo dove è possibile trovare il fosforo. Infatti, è presente in parecchi minerali vulcanici, specialmente nelle *apatiti*:



Disciolto nell'acqua marina forma  $\text{HPO}_4$  e precipita costituendo depositi che possono dar luogo anche a grandi giacimenti. Alcune *apatiti* così formate, le *fosforiti*, possono avere anche il 30% di fosforo. Nella Terra primordiale molecole contenenti fosforo come  $\text{P}_2\text{O}$ , che si trova oggi nei magmi acidi ad alto contenuto di  $\text{SiO}_2$ , dovevano essere presenti negli ambienti vulcanici: i vulcani potrebbero perciò essere indispensabili alla formazione di Vita basate sugli acidi nucleici. In tal caso, solo pianeti rocciosi abbastanza grandi da mantenere a lungo un'attività vulcanica, possono avere un ruolo fondamentale per permettere la Vita. Come alternativa, per spiegare l'impiego di un atomo così raro nelle molecole delle varie forme di Vita, è necessario pensare che il Sistema Solare sia nato in una zona con abbondanza di P elevata e che costituisca una eccezione rispetto ad altri sistemi planetari della Galassia. In effetti, il gas solare ha una percentuale di P, C, N e O 10 volte più elevata di quello interstellare. Attualmente il problema è ancora aperto (*Galletta & Sergi, 2005*).

## 4.5 Conclusione all'abitabilità cosmologica

Molto ancora ci sarebbe da discutere sulle innumerevoli e straordinarie condizioni che hanno reso possibile la nostra presenza in questo speciale mondo: un punto tra i miliardi di punti nell'infinito, ma Unici; ecco cosa siamo!



Senza indugio, penso che sia sufficiente concludere questo capitolo citando una domanda e una risposta di una delle persone più illustri del secolo passato. *Einstein* (1936) si chiese : «*Perché il mondo è comprensibile?*»

E si rispose:

«*L' eterno mistero del mondo è la sua comprensibilità*»

# Conclusioni sull'abitabilità

Come detto nell'introduzione, il percorso per comprendere la successione degli straordinari eventi che hanno portato alla nascita, al mantenimento e allo sviluppo della Vita, nel nostro meraviglioso pianeta, è tanto affascinante quanto complicato; qui abbiamo affrontato solo alcuni temi che ci hanno permesso di definire l'abitabilità da quella planetaria a quella cosmologica, attraverso la comprensione della CHZ (per il Sole e le altre stelle) e della GHZ nella nostra Via Lattea, ma ciò è stato sufficiente per comprendere quanto vasto ed interdisciplinare sia lo studio di questo argomento<sup>5</sup>.

E' come nelle migliori storie di eroi, dove epici personaggi, di straordinaria moralità e umiltà, rimangono nella mente e nel cuore, proprio perchè, nel momento di maggiore paura e difficoltà, non si abbandonano allo sconforo, ma intraprendono il pericoloso cammino per raggiungere l'obiettivo prefissato. E' la mia storia, di molti altri e, in fondo, del genere umano. Siamo immersi in un infinito spazio-tempo che ci accompagna nella ricerca delle risposte ai nostri più grandi interrogativi: *"Perchè siamo qui? Da dove veniamo? e... Siamo soli?"*

Per cercare risposta a tali quesiti abbiamo analizzato:

1. L'abitabilità planetaria e la zona abitabile attorno ad una stella, CHZ (Cap. 1); tante sono le condizioni che un pianeta (e la sua stella) deve soddisfare per poter essere idoneo ad ospitare la Vita, come:
  - (a) Distanza dalla stella tale da mantenere l'acqua allo stato liquido in superficie, inoltre, la stella deve avere i requisiti tali da garantire un flusso di radiazione abbastanza costante nel tempo verso il pianeta;
  - (b) Le dimensioni del pianeta devono essere tali da trattenere l'atmosfera, uno dei due scudi del nostro pianeta, che ci protegge da radiazioni letali senza impedire, però, il passaggio della luce e del calore; calore che sulla Terra da essa viene distribuito in tutto il globo, mantenendo una temperatura media superficiale, anche grazie all'effetto serra, generato dai gas come la

---

<sup>5</sup>Molti scienziati stanno cercando di approfondire l'argomento della abitabilità in sistemi extrasolari e in un prossimo futuro si avranno a disposizione modelli climatici sempre più precisi e sofisticati per definire limiti sempre più stringenti della CHZ; citiamo come esempio il lavoro di *Vladilo et al. (2013)* che hanno cercato di analizzare l'estensione della zona abitabile di pianeti simili alla Terra con un modello 2D di bilancio energetico che è anche funzione delle pressioni atmosferiche planetarie.

$CO_2$ , in modo da garantire il mantenimento dell'acqua allo stato liquido in superficie.

- (c) Il pianeta deve essere vivo; grazie alla *tettonica a placche* e ai processi vulcanici (e all' $H_2O$  nella reazione di Urey), la  $CO_2$ , viene intrappolata nelle rocce e liberata in atmosfera, in una sorta di equilibrio dinamico continuo.
  - (d) Il pianeta deve avere un satellite tale da garantirgli la stabilità dell'asse di inclinazione; sulla Terra la presenza della Luna ha mantenuto l'asse terrestre inclinato, in modo tale da garantire la ciclicità delle stagioni e una durata del giorno tale da fornire una giusta distribuzione del calore nella giornata. La ripetitività delle stagioni e la stabilità climatica sono indispensabili per rendere idoneo il sito allo sviluppo e al mantenimento della Vita.
  - (e) Il campo magnetico deve essere sufficientemente intenso da proteggere il pianeta dai raggi cosmici.
  - (f) Appare importante anche la presenza, nel sistema planetario, di pianeti giganti gassosi esterni che catturano gravitazionalmente corpi che potrebbero impattare nei pianeti interni, es.: Shoemaker-Levy 9 (*v. Fecchio, 2011*).
  - (g) Dalla perdita di  $H_2O$  per fotolisi alla condensazione della  $CO_2$  in nuvole, abbiamo potuto definire una sorta di legge per costruire la CHZ del Sole e di altre stelle; tale zona deve essere comunque considerata assieme a tutte le altre condizioni appena ripetute. L'estensione della CHZ del Sistema Solare è 0.95-1.37 UA (*Kasting et al., 1993*) e diminuisce in stelle più piccole rispetto al Sole (abbiamo calcolato la CHZ di una stella di tipo M come esempio).
2. Nel contesto Galattico, la GHZ; la possibile migrazione Solare (Cap. 2 e Cap.3); abbiamo cercato di estendere il concetto abitabilità ad una zona della Galassia, tale zona abitabile galattica deriva dall'aver analizzato vari fattori, tra i quali:
- (a) La distanza dal centro Galattico;
  - (b) Una giusta abbondanza di metalli tale da poter "costruire" pianeti rocciosi, senza averne troppi di gioviani.
  - (c) La possibilità di sopravvivere, per un pianeta, all'esplosione di Supernove;
  - (d) Un tempo idoneo allo sviluppo della Vita complessa.
  - (e) Gli effetti della marea planare sulla Nube di Oort e sistemi analoghi (*De Biasi et al. 2015*), in concomitanza con la migrazione Solare, da zone

più vicine al centro Galattico fino alla posizione attuale; per fare ciò nel Cap. 3 abbiamo dovuto cercare di comprendere l'importanza del gradiente di metallicità della Galassia (*Naab & Ostriker, 2006*) per derivare la possibile posizione iniziale del Sole e vedere se tutti o alcuni dei percorsi Solari possano o meno essere comparibili per la Vita (*Kaib et al., 2011*). Appare che nelle zone più interne (sotto i 7 kpc) la componente di marea del *bulge* domina sulle altre, dai 7 ai 15 kpc domina la perturbazione mareale del *disco*, oltre i 15 kpc, domina la componente di marea dell'*alone oscuro* (Cap. 2).

- (f) Ciò che emerge è che la GHZ è un'anello la cui dimensione varia con l'evoluzione della Galassia, centrato circa sulla posizione attuale del Sole; prendendo i limiti estremi tra gli autori considerati si ha che l'estensione della GHZ è tra i 4.5 (limite interno) e i 10 kpc (limite esterno) (*Gonzalez, Brownlee, Ward, 2001; Lineweaver, 2004; Prantzos, 2006*).
- (g) Sottolineiamo la possibilità che l'acqua sulla Terra sia stata portata dalle comete (anche se il valore del rapporto di D/H di alcune comete non coincide con quello presente negli oceani terrestri); la questione è ancora aperta. Se così fosse, le perturbazioni di marea, generate dal bulge quando (e se) il Sole si trovava a circa 6 kpc (o anche più internamente verso il centro Galattico), avrebbero potuto generare un incremento di impatti sui pianeti interni indispensabile per l'arrivo dell'acqua su di essi e quindi necessario allo sviluppo successivo della vita una volta che il Sole (o un suo analogo) si fosse trovato in un ambiente, per altri aspetti, già idoneo al suo sviluppo, come appare sia la posizione attuale di circa 8 kpc<sup>6</sup>.

3. Il contesto Cosmologico (Cap. 4): molte appaiono le strettoie che l'universo ha imboccato per generare gli elementi utili alla Vita; fin dai primi istanti successivi al Big Bang, valori molto limitati delle costanti di accoppiamento delle forze fondamentali, avrebbero generato le condizioni adatte alla formazione dei mattoni essenziali per la nostra esistenza. Tali circostanze vengono ben descritte dalla riformulazione proposta da *Secco (2009)* del Principio Antropico

---

<sup>6</sup>Citiamo, inoltre, un recente lavoro di *Morris et al. (2016)* i quali, dai loro modelli, con i dati del telescopio spaziale Herschel, indagando la nebulosa di Orione (zona di formazione stellare più vicina alla Terra), mostrano che la radiazione UV fornisce le condizioni favorevoli per la produzione a regime di  $CH^+$ ; dice Patrick Morris: «Ora scopriamo che la luce delle stelle è responsabile anche della formazione di sostanze chimiche di cui abbiamo bisogno per far sì che la vita abbia inizio».

Questo risultato ha numerose implicazioni, soprattutto per quanto riguarda la formazione di idrocarburi nella nostra e in altre galassie. Il fatto che all'interno delle galassie fosse possibile avere urti e turbolenze era noto, ma ora sappiamo che anche nelle regioni in cui è presente la radiazione ultravioletta possiamo avere la creazione di molecole fondamentali necessarie alla vita.

«È ancora un mistero come alcune molecole si formino nelle regioni centrali delle galassie», conclude Pearson, un altro degli autori dell'articolo. «Il nostro studio indica che anche in quelle zone, la luce ultravioletta delle stelle più massicce potrebbe giocare un ruolo importante». Facciamo notare quindi che parte degli idrocarburi arrivati sulla Terra, avrebbe potuto provenire grazie al fatto che il Sole si trovasse assai vicino al centro Galattico, nella zona ricca di esplosioni di SN.

Debole, WRAP: "è la raccolta dei fatti che collegano i fattori -determinanti le caratteristiche principali del cosmo e della sua evoluzione- con la Vita, mediante la quale è possibile dedurre quanto fortemente il fenomeno Vita dipenda da questi fattori".

Causalità o Progetto? Non possiamo di certo dare nessuna risposta scientifica a tale interrogativo. Anche se non tutto qui è stato detto di questa avvincente storia, di sicuro, si è, tuttaia, appreso quanto meticoloso sia stato il percorso svolto dal nostro Universo per permettere la Vita. Ciò che credo sia indispensabile sottolineare, è quanto prezioso sia il Mondo che ci ospita, intriso di Bellezza; che si sia credenti o atei... non conta! La nostra peculiarità è un fatto che non può passare inosservato.

*"Prezioso è il tempo, ammesso che esista; rubandoci la Vita, nel trascorrere inesorabile dei suoi attimi, ci ricorda quanto Essa sia preziosa e Unica. Possiamo solo ringraziare degli istanti donati e ricordarci che... se la Vita fosse un sogno e la Morte il risveglio?!" (Fecchio, 2003, appunti personali).*

# Appendice A

## Sulle orbite

### A.1 Tutorial di dinamica delle orbite

I movimenti all'interno del nostro Sistema Solare potrebbero essere spiegati e descritti, in prima approssimazione, utilizzando le leggi fondamentali della meccanica celeste, come le leggi di Keplero, la legge di gravitazione universale di Newton, il formalismo per il problema a due e a tre corpi limitato. Riassumiamo le nozioni più importanti di questi argomenti (*De Biasi, 2014*).

#### A.1.1 Leggi di Keplero per il moto dei pianeti

Keplero deriva le sue tre leggi del moto planetario tra il 1609 e il 1619, con un approccio empirico (*Murray & Dermott, 1999*). Dalle osservazioni, comprese quelle realizzate da Tycho Brahe, Keplero deduce che:

1. I pianeti si muovono in ellissi con il Sole che occupa uno dei fuochi.
2. Un raggio vettore dal Sole ad un pianeta spazza aree uguali in tempi uguali.
3. Il quadrato del periodo orbitale di un pianeta è proporzionale al cubo del suo semiasse maggiore.

La geometria implicita dalle prime due leggi è un'ellisse con due fuochi dove il Sole occupa uno di questi (prima legge) e con la regione ombreggiata che rappresenta l'area spazzata dal raggio vettore dal Sole a un pianeta orbitante in intervalli di tempo uguali; la seconda legge afferma che queste aree sono uguali (Fig. A.1). Il semi-asse maggiore ( $a$ ) dell'ellisse è definito come metà della lunghezza dell'asse lungo. La terza legge di Keplero si riferisce al semiasse ( $a$ ) e al periodo orbitale planetario ( $T$ ), ottenendo:

$$T^2 \propto a^3 \tag{A.1}$$

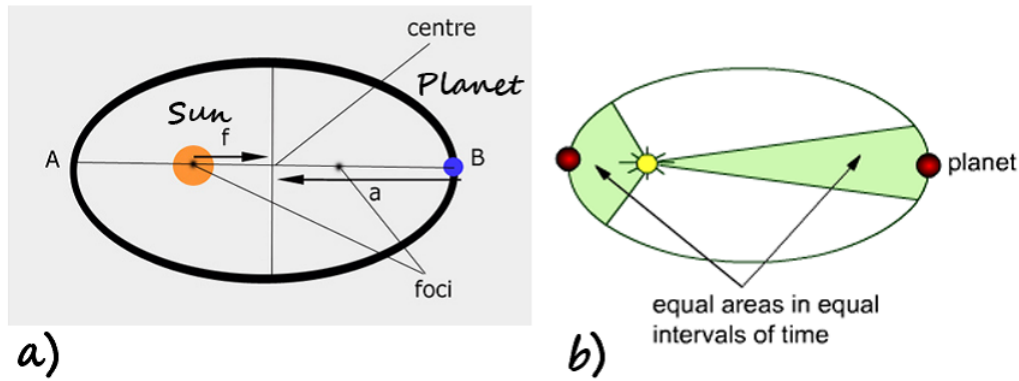


Figura A.1: Geometria della prima e seconda legge di Keplero.

È importante ricordare che le leggi di Keplero erano puramente empiriche: non aveva una comprensione fisica del perché i pianeti obbedivano alle leggi. Verrà fornita la spiegazione da Newton circa settanta anni dopo, generalizzando le leggi di Keplero non solo ai pianeti, ma ai movimenti dei diversi corpi celesti.

### A.1.2 La legge della gravitazione di Newton.

Nel 1687 Newton ha dimostrato che una semplice legge dell'inverso del quadrato della forza dà origine a tutto il movimento nel Sistema Solare (*Murray & Dermott, 1999*). Anche se lo stesso risultato è stato ottenuto da Robert Hooke (*Westfall, 1980*), è stato Newton a dimostrare che le leggi del moto di Keplero sono una conseguenza naturale di questa forza e il moto risultante è descritto da una sezione conica. Nella forma scalare, Newton propone che l'intensità della forza  $F$  tra due masse nell'universo,  $m_1$  e  $m_2$ , separate da una distanza  $d$  è data dalla nota formula

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (\text{A.2})$$

con  $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \text{Kg}^{-1} \text{s}^{-2}$  costante di gravitazione universale. Ne "I Principia", Newton propose le sue tre leggi del moto:

1. I corpi rimangono in uno stato di quiete o in moto rettilineo uniforme in linea retta a meno che non agiscano forze esterne.
2. La forza subita da un corpo è uguale al tasso di variazione della sua quantità di moto.
3. Per ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria.

La combinazione di queste leggi assieme alla legge di gravitazione universale ha fornito una profonda comprensione dell'universo. Estendendo la gravitazione newtoniana per più di due corpi si è dimostrato che la reciproca interazione gravitazionale può provocare ellissi che non sono fisse. Infatti nel nostro Sistema Solare, le orbite dei pianeti lentamente ruotano o *precedono* nello spazio su tempi scala di  $10^5$  anni. Ora sappiamo che la legge universale della gravitazione di Newton è solo un'ap-

prossimazione, seppure molto buona, e che un modello migliore di gravità è data dalla teoria della relatività generale di Einstein; l'approccio gravitazione classico è comunque sufficiente agli scopi di questo lavoro.

### A.1.3 Problema a due corpi

Il problema a due corpi è il più semplice problema integrabile nelle dinamiche del Sistema Solare (*Murray & Dermott, 1999*). Esso riguarda l'interazione di due masse puntiformi in movimento sotto una reciproca attrazione gravitazionale descritta dalla legge universale della gravitazione di Newton. Si consideri il moto di due masse  $m_1$  e  $m_2$  con vettori posizione  $\bar{r}_1$  e  $\bar{r}_2$  riferiti ad una certa origine  $O$  fissata nello spazio inerziale (Fig. A.2):

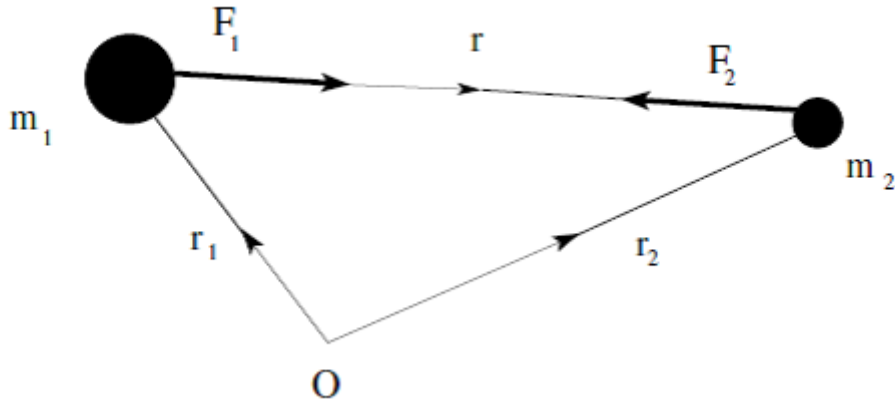


Figura A.2: Diagramma vettoriale delle forze agenti su due corpi  $m_1$  e  $m_2$  con posizione dei vettori  $\bar{r}_1$  e  $\bar{r}_2$  da  $O$ .

Il vettore  $\bar{r} = \bar{r}_1 - \bar{r}_2$  descrive la posizione di  $m_2$  rispetto a  $m_1$ . La forza gravitazionale e le conseguenti accelerazioni sperimentate dalle due masse sono, rispettivamente:

$$\bar{F}_1 = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \bar{r} = m_1 \ddot{\bar{r}}_1 \quad e \quad \bar{F}_2 = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \bar{r} = m_2 \ddot{\bar{r}}_2 \quad (\text{A.3})$$

Si ottiene così l'equazione

$$m_1 \ddot{\bar{r}}_1 + m_2 \ddot{\bar{r}}_2 = 0 \quad (\text{A.4})$$

che integrata due volte fornisce:

$$m_1 \dot{\bar{r}}_1 + m_2 \dot{\bar{r}}_2 = \bar{a} \quad e \quad m_1 \bar{r}_1 + m_2 \bar{r}_2 = \bar{a}t + \bar{b} \quad (\text{A.5})$$

con  $\bar{a}, \bar{b}$  vettori costanti. Se  $\bar{R} = (m_1 \bar{r}_1 + m_2 \bar{r}_2)/(m_1 + m_2)$  denota il vettore posizione del centro di massa l'equazione precedente può essere scritta nel seguente modo:



$$\dot{\bar{R}} = \frac{\bar{a}}{m_1 + m_2} \quad e \quad \bar{R} = \frac{\bar{a}t + \bar{b}}{m_1 + m_2} \quad (\text{A.6})$$

Ciò implica o che il centro di massa è fermo (se  $\bar{a} = 0$ ) o che si muova con una velocità costante in linea retta rispetto all'origine  $O$ . Ora consideriamo il moto di  $m_2$  rispetto a  $m_1$ . Questo ci permette di semplificare il problema senza perdere le sue caratteristiche essenziali. Scivendo  $\ddot{\bar{r}} = \ddot{r}_2 - \ddot{r}_1$  e usando l' Eq. (A.3) si ottiene l'equazione del moto relativo:

$$\frac{d^2\bar{r}}{dt^2} + \mu \frac{\bar{r}}{r^3} = 0 \quad (\text{A.7})$$

con  $\mu = G(m_1 + m_2)$ . Al fine di risolvere e trovare il percorso di  $m_2$  rispetto a  $m_1$  dobbiamo prima derivare diverse costanti del moto. Prendendo il prodotto vettoriale di  $\bar{r}$  con Eq. (A.7) abbiamo  $\bar{r} \times \ddot{\bar{r}} = 0$  che può essere integrato direttamente dando:

$$\bar{r} \times \dot{\bar{r}} = \bar{h} \quad (\text{A.8})$$

con  $\bar{h}$  vettore costante perpendicolare sia ad  $\bar{r}$  che a  $\dot{\bar{r}}$ . Quindi il moto  $m_2$  rispetto a  $m_1$  giace in un piano perpendicolare alla direzione definita da  $\bar{h}$ . Ciò implica anche che i vettori di posizione e di velocità si trovano sempre sullo stesso piano. L' Eq. (A.8) è comunemente denominata *momento angolare integrale*. Poiché  $\bar{r}$  e  $\dot{\bar{r}}$  si trovano sempre nel piano orbitale possiamo limitarli al movimento in quel piano. Ora considero un sistema di coordinate polari  $(r, \theta)$ , riferito ad una origine centrata sulla massa  $m_1$  e una linea di riferimento arbitraria corrispondente a  $\theta=0$ . Considero  $\hat{r}$  e  $\hat{\theta}$  vettori unitari rispettivamente parallelo e perpendicolare al raggio vettore, allora i vettori di posizione, velocità, accelerazione possono essere riscritti in coordinate polari come:

$$\bar{r} = r\hat{r}, \quad \dot{\bar{r}} = \dot{r}\hat{r} + r\dot{\theta}\hat{\theta}, \quad \ddot{\bar{r}} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\hat{r} + \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r^2\dot{\theta}) \right] \hat{\theta} \quad (\text{A.9})$$

sostituendo l'espressione per  $\dot{\bar{r}}$  nell' Eq. (A.8), si ha  $\bar{h} = r^2\dot{\theta}\hat{z}$  dove  $\hat{z}$  è un vettore unitario perpendicolare al piano dell'orbita formante una terna di vettori con  $\hat{r}$  e  $\hat{\theta}$  che segue la regola della mano destra. Si ha che:

$$h = r^2\dot{\theta} \quad (\text{A.10})$$

Considerando il moto della massa  $m_2$  in un intervallo di tempo  $\delta t$  (v. Fig. A.3).

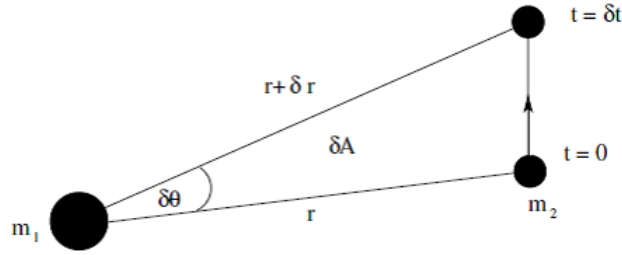


Figura A.3: Area  $\delta A$  spazzata nel  $\delta t$  come un vettore posizione che si muove attraverso un  $\delta\theta$ .

Al tempo  $t=0$ , esso ha coordinate polari  $(r, \theta)$ , mentre al tempo  $t+\delta t$  le sue coordinate polari sono cambiate come  $(r + \delta r ; \theta + \delta\theta)$ . L'area spazzata dal raggio vettore nel  $\delta t$  è:

$$\delta A = \frac{1}{2}r(r + \delta r)\sin\delta\theta \approx \frac{1}{2}r^2\delta\theta \quad (\text{A.11})$$

trascurando i termini di ordine superiore. Dividendo per  $dt$  e prendendo il limite per  $\delta t \rightarrow 0$  si ottiene

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}r^2\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2}h \quad (\text{A.12})$$

Dalla costanza di  $h$  si ha che aree uguali sono spazzate in tempi uguali e l' Eq. (A.12) è la forma matematica della seconda legge di Keplero del moto planetario. Questa non richiede che la forza abbia una legge che segua l'inverso del quadrato, ma solo che sia diretta lungo la congiungente tra le due masse. Si ottiene una equazione scalare per il moto relativo sostituendo l'espressione per  $\ddot{r}$  da Eq. (A.9) in Eq. (A.7), confrontando le componenti  $\hat{r}$ , si ha

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = -\frac{\mu}{r^2} \quad (\text{A.13})$$

Per risolvere questa equazione e trovare  $r$  in funzione di  $\theta$  si deve compiere la seguente sostituzione  $u = 1/r$  (*trasformazione di Binet*) ed eliminare il tempo con l'utilizzo di  $h = r^2\dot{\theta}$ . Differenziando  $r$  rispetto al tempo si ha:

$$\dot{r} = -\frac{1}{u^2}\frac{du}{d\theta}\dot{\theta} = -h\frac{du}{d\theta} \quad e \quad \ddot{r} = -h\frac{d^2u}{d\theta^2}\dot{\theta} = -h^2u^2\frac{d^2u}{d\theta^2} \quad (\text{A.14})$$

e si può riscrivere l' Eq. (A.13) come:

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \frac{\mu}{h^2} \quad (\text{A.15})$$

Questa è una equazione differenziale lineare del secondo ordine con soluzione generale:

$$u = \frac{\mu}{h^2} [1 + e\cos(\theta - \varpi)] \quad (\text{A.16})$$

dove le costanti di integrazione  $e$  ed  $\varpi$  sono un'ampiezza e una fase, rispettivamente. Ricavando  $r$ , ricordando  $u = 1/r$ , si ottiene la formula finale:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\theta - \varpi)} \quad (\text{A.17})$$

che è l'equazione generale di una conica in coordinate polari dove  $e$  è l'eccentricità e  $p$  è il *semilato retto* dato da

$$p = h^2/\mu \quad (\text{A.18})$$

Le quattro possibili coniche sono:

- cerchio  $e = 0$  ,  $p = a$
- ellisse  $0 < e < 1$  ,  $p = a(1 - e^2)$
- parabola  $e = 1$  ,  $p = 2q$
- iperbole  $e > 1$  ,  $p = a(e^2 - 1)$

dove la costante  $a$  è il *semiasse maggiore* della conica. Nel caso particolare della parabola  $p$  è definito in termini di  $q$ , la distanza più vicina al centro di massa. Le curve delle sezioni coniche prendono il loro nome dalle curve che si formano dall'intersezione di vari piani con la superficie di un cono, (Fig. A.4).

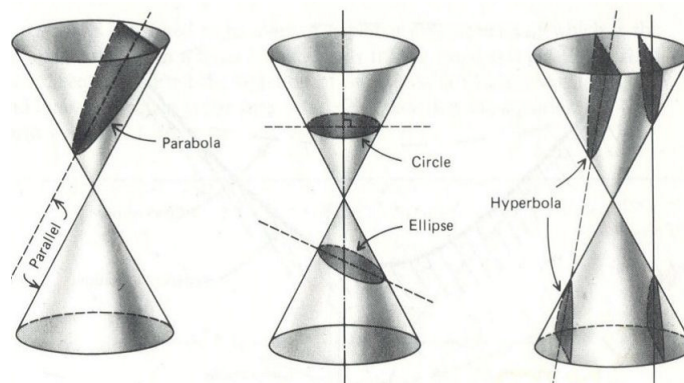


Figura A.4: Intersezioni di piani con la superficie di un cono ad angoli diversi originano la famiglia delle curve delle coniche.

Il tipo di conica è determinato dall'angolo che il piano forma con l'orizzonte. Se il piano è orizzontale, cioè ortogonale all'asse di simmetria del cono, allora la risultante è un cerchio. Se l'angolo è minore dell'angolo di inclinazione del cono si ha una ellisse, mentre se il piano è parallelo alla pendenza del cono otteniamo una parabola. Si ha invece una iperbole se si ha un angolo qualunque tra l'angolo di inclinazione del cono e la verticale. Per concludere questa breve spiegazione circa il problema dei due corpi, siamo in grado di ricavare un'altra importante costante

del moto prendendo il prodotto scalare di  $\dot{r}$  nell' Eq. (A.7). Questo dà l'equazione scalare:

$$\dot{r} \cdot \ddot{r} + \mu \frac{\dot{r}}{r^2} \quad (\text{A.19})$$

che può essere integrata dando

$$\frac{1}{2}v^2 - \frac{\mu}{r} = C \quad (\text{A.20})$$

con  $v^2 = \dot{r} \cdot \dot{r}$ , quadrato della velocità e con  $C$  costante del moto. L'Eq. (A.20) è spesso chiamata "*vis viva integral*" e mostra che l'energia dell'orbita per unità di massa si conserva. Il problema a due corpi ha quattro costanti del moto: l'integrale di energia  $C$  e le tre del momento angolare integrale  $\bar{h}$ .

## A.2 Elementi Orbitali

Siamo in grado di estendere le nozioni precedenti dei pianeti agli altri oggetti presentati nel nostro sistema planetario, infatti trascurando le perturbazioni reciproche, tutti i corpi nel Sistema Solare si muovono rispetto al Sole in un'orbita ellittica, essendo il Sole in uno dei due fuochi dell'ellisse (*Morbidelli, 2005*). Ci concentreremo sul caso ellittico. E' conveniente per caratterizzare il moto relativo di un corpo descrivere le proprietà geometriche dell'ellisse orbitale e la sua posizione istantanea sull'ellisse stessa. Queste quantità sono di solito chiamate *elementi orbitali*. La forma dell'ellisse può essere definita con due elementi orbitali che abbiamo già incontrato descrivendo le coniche: il *semiasse maggiore*  $a$  e l'*eccentricità*  $e$ .

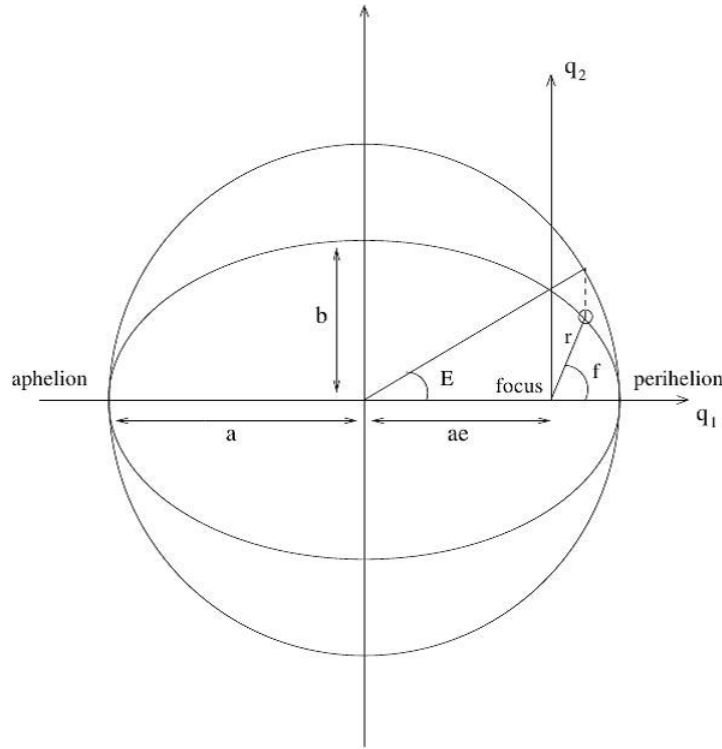


Figura A.5: Elementi orbitali  $a$ ,  $E$ ,  $e$  (Morbidelli, 2005).

L'eccentricità rappresenta la deviazione dall'orbita circolare e viene espressa come rapporto tra la distanza del fuoco dal centro dell'ellisse e il semiasse maggiore dell'ellisse. Su un'orbita ellittica, il punto più vicino al Sole si chiama *perielio*  $q$  pari  $a(1 - e)$ ; il punto più lontano è chiamato *afelio* e la sua distanza  $Q$  è uguale a  $a(1 + e)$ . Un sistema di riferimento conveniente per caratterizzare la posizione di un corpo sulla sua orbita è il sistema di riferimento ortogonale  $q_1, q_2$  con origine sul fuoco dell'ellisse occupato dal Sole e  $q_1$ , asse orientato verso il perielio dell'orbita. In alternativa possono essere usate le coordinate polari  $r, f$ . L'angolo  $f$  è di solito chiamato l'*anomalia vera* del corpo. Si ottiene così, in riferimento alla geometria in Fig. A.5:

$$q_1 = a(\cos E - e), \quad q_2 = a\sqrt{1 - e^2}\sin E \tag{A.21}$$

e possono essere riscritte con l'Eq. (A.17):

$$r = a(1 - e\cos E) \text{ con } \cos f = \frac{\cos E - e}{1 - e\cos E} \tag{A.22}$$

dove  $E$ , *anomalia eccentrica*, è l'angolo sotteso dal centro dell'ellisse dalla proiezione della posizione del corpo sul cerchio tangente all'ellisse al perielio e all'afelio come in Fig. A.5. Le quantità  $a, E, e$  caratterizzano il corpo nella sua orbita. Dalle equazioni di Newton è possibile ricavare l'*equazione di Keplero* che descrive la legge di evoluzione di  $E$  rispetto al tempo (Danby, 1962):

$$E - e \sin E = n(t - t_0) \quad (\text{A.23})$$

con  $n$ :

$$n = \sqrt{G(m_0 + m_1)} a^{-3/2} \quad (\text{A.24})$$

che è la frequenza orbitale, o *moto medio*, del corpo e con  $m_0$  e  $m_1$  del Sole e del corpo rispettivamente;  $t_0$  è il tempo di passaggio al perielio. E' possibile introdurre anche un altro angolo:

$$M = n(t - t_0) \quad (\text{A.25})$$

chiamata *anomalia media*, come elemento di orbita che cambia linearmente con il tempo. L'orientamento dell'ellisse nello spazio, rispetto ad un arbitrario sistema di riferimento ortogonale  $(x, y, z)$  centrato sul Sole, può essere caratterizzato dall'introduzione di tre angoli; gli ultimi tre elementi orbitali da aggiungere per ottenere una descrizione completa orbitale (Fig. A.6).

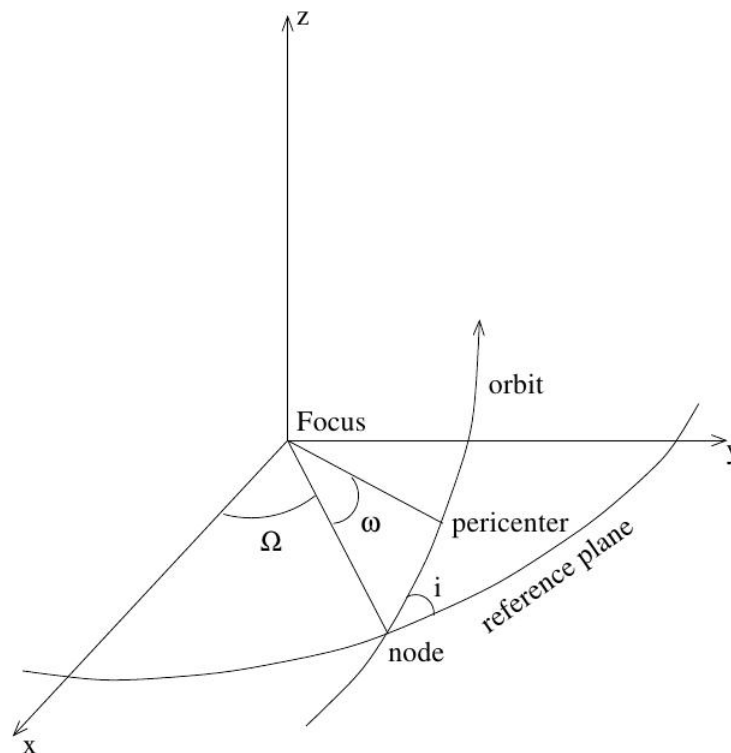


Figura A.6: Definizione degli elementi orbitali  $i$ ,  $\Omega$ ,  $\omega$  (Morbidelli, 2005).

Il primo è l'*inclinazione*  $i$  del piano orbitale rispetto  $(x, y)$ , piano di riferimento. Se l'orbita ha  $i \neq 0$ , si interseca il piano  $(x, y)$  in due punti: nel *nodo ascendente*, dove il corpo passa da  $z$  negativo a positivo, e nel *nodo discendente*, dove il corpo precipita verso  $z$  negativo. L'orientamento del piano orbitale nello spazio viene poi completamente determinato dalla posizione angolare del *nodo ascendente* dall'asse

$x$ . Questo angolo è tradizionalmente chiamato *longitudine del nodo ascendente* e di solito è indicato con  $\Omega$ . L'ultimo angolo da introdurre è l'*argomento del perielio*  $\omega$  definito come la posizione angolare del perielio, misurata nel piano orbitale rispetto alla linea che collega il corpo centrale al nodo ascendente; caratterizza l'orientamento dell'ellisse nel suo piano. Dalle definizioni introdotte degli elementi orbitali possono sorgere dei problemi quando l'inclinazione è zero. Infatti in questo caso  $\omega$  e  $M$  non sono definiti perché la posizione del nodo ascendente non è determinata. Inoltre,  $M$  non è definita anche quando l'eccentricità è zero poiché la posizione del perielio non è determinata. Pertanto, è conveniente introdurre la *longitudine del perielio*  $\varpi = \omega + \Omega$  e la *longitudine media*  $\lambda = M + \omega + \Omega$ . Il primo angolo è ben definito quando  $i = 0$ , mentre il secondo lo è quando  $i = 0$  e/o  $e = 0$ . Il moto orbitale è perfettamente ellittico in assenza di perturbazioni esterne: gli elementi orbitali  $a, e, i, \varpi, \Omega$  sono costanti, e  $\lambda$  si muove linearmente con il tempo, con frequenza data dall'Eq. (A.24). L'introduzione di una piccola perturbazione di un sistema perturba le orbite che producono principalmente due effetti:

1. non è perfettamente lineare il movimento di  $\lambda$ . Corrispondentemente, gli altri elementi orbitali hanno piccole oscillazioni periodiche dell'ordine delle frequenze orbitali;

2. gli angoli  $\varpi, \Omega$  iniziano a ruotare lentamente. Questo movimento è chiamato *precessione*. Le oscillazioni in  $e$  ed  $i$  diventano a lungo periodo, con periodi dell'ordine dei periodi di precessione che nel Sistema Solare sono circa di 10,000-100,000 anni.

La regolarità di queste brevi oscillazioni periodiche e lunghe oscillazioni periodiche è rotta quando uno delle due seguenti situazioni si verifica:

- la perturbazione diventa grande, ciò è dovuto ad esempio ad incontri ravvicinati tra il corpo e il pianeta perturbante, oppure quando la massa perturbante è paragonabile a quella del Sole;
- la perturbazione diventa risonante. Una risonanza si verifica quando le frequenze di  $\lambda, \varpi, \Omega$  del corpo, o una loro combinazione, sono in rapporto intero con una delle frequenze temporali di perturbazione.

In entrambi i casi gli elementi orbitali  $a, e, i$  possono avere grandi variazioni non periodiche ed irregolari.

### A.3 Problema a tre corpi ristretto

L'ultimo tema di questo piccolo tutorial è il problema dei tre corpi. A differenza del semplice e integrabile problema dei due corpi il problema dei tre corpi non ha una unica soluzione analitica. In questa sezione diamo solo le nozioni più importanti su questo ampio e complesso argomento (per maggiori si rimanda a *Murray & Dermott*,

1999). Da *Binney & Tremaine (2008)*: il problema a tre corpi ristretto o semplificato è quello di trovare la traiettoria di una particella di prova di piccola massa che orbita nel campo gravitazionale prodotto da due masse. Le due masse  $m$  e  $M$  con  $m < M$ , viaggiano in un'orbita circolare attorno al loro comune centro di massa con velocità angolare

$$\Omega_c = \sqrt{\frac{g(M+m)}{R_0^3}} \quad (\text{A.26})$$

con  $R_0$  separazione tra i due corpi. Il campo gravitazionale è stazionario se riferito al sistema di coordinate centrato sul centro di massa che ruota alla velocità  $\Omega_c$ . Orientiamo questo sistema di coordinate cosichè le due masse siano centrate in  $\bar{r}_m = [MR_0/(M+m), 0, 0]$  e  $\bar{r}_M = [-mR_0/(M+m), 0, 0]$ , con  $\bar{\Omega}_c = (0, 0, \Omega_c)$ . E' possibile dimostrare che ogni orbita in tale sistema ha l'*Integrale di Jacobi* che si conserva:

$$E_J = \frac{1}{2}v^2 + \Phi(\bar{r}) - \frac{1}{2}|\bar{\Omega}_c \times \bar{r}|^2 = \frac{1}{2}v^2 + \Phi_{eff}(\bar{r}) \quad (\text{A.27})$$

Dal momento che  $v^2 > 0$ , una particella con Intergrale di Jacobi  $E_J$  non può mai sconfinare in una regione dove  $\Phi_{eff}(\bar{r}) > E_J$ . Di conseguenza, la superficie  $\Phi_{eff}(\bar{r}) = E_J$ , la superficie zero per le stelle di integrale di Jacobi  $E_J$ , forma un muro impenetrabile per tali particelle. La Fig. A.7 mostra i contorni di  $\Phi_{eff}$  costante nel piano equatoriale di due masse puntiformi orbitanti; i punti di Lagrange sono gli estremi (massimi e punti di sella) di questa superficie. Dalla figura si vede che le superfici di velocità zero vicino a ciascun corpo sono centrate su di esso, ma più lontano; le superfici di velocità zero circondano entrambi i corpi. Quindi, al valore critico di  $\Phi_{eff}$  corrispondente all'ultima superficie di velocità zero che circonda un singolo corpo, corrisponde la superficie chiamata *superficie di marea* o di *Roche*; poiché questa superficie tocca il punto  $L_3$  di Lagrange<sup>1</sup> che si trova tra le due masse sulla linea che le collega, è naturale identificare il raggio esterno delle orbite legato a  $m$  come la distanza  $r_J$  tra  $m$  e  $L_3$ . (Altri autori utilizzano differenti convenzioni per la numerazione di  $L_3$ ).

---

<sup>1</sup>Nel problema dei tre corpi, i punti di Lagrange, tecnicamente chiamati punti di oscillazione, sono quelle posizioni nello spazio, nell'ipotesi semplificativa in cui uno dei corpi abbia massa molto inferiore agli altri due, in cui le forze che agiscono sull'oggetto minore si bilanciano, creando una situazione di equilibrio. Questi punti sono detti di Lagrange in onore del matematico Joseph-Louis de Lagrange che nel 1772 ne calcolò la posizione (*Guzzo, 2012; [a]*).



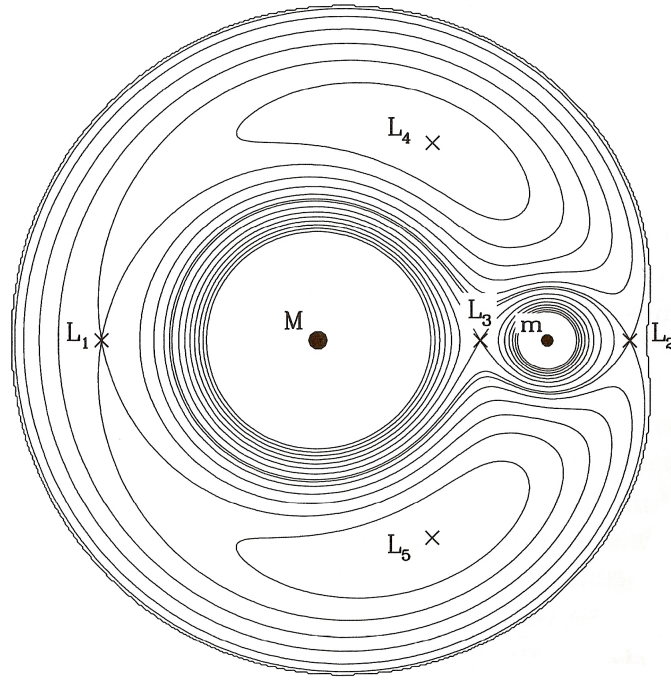


Figura A.7: Contorni di egual potenziale effettivo  $\Phi_{eff}$  per due masse puntiformi in orbite circolari, (Binney & Tremaine, 2008).

Possiamo valutare  $r_J$  notando che al  $(x_m - r_J, 0, 0)$  il potenziale efficace ha un punto di sella, quindi

$$\left( \frac{\partial \Phi_{eff}}{\partial x} \right)_{(r_m - r_J, 0, 0)} = 0 \quad (\text{A.28})$$

Per due masse puntiformi la distanza  $R_0$ , l'Eq. (A.26) e l'Eq. (A.27) implicano:

$$\Phi_{eff}(\bar{r}) = -G \left[ \frac{M}{|\bar{r} - \bar{r}_M|} + \frac{m}{|\bar{r} - \bar{r}_m|} + \frac{M+m}{2R_0^3}(x^2 + y^2) \right] \quad (\text{A.29})$$

In un punto tra le due masse l'Eq. (A.28) è soddisfatta se:

$$0 = \frac{1}{G} \left( \frac{\partial \Phi_{eff}}{\partial x} \right)_{(r_m - r_J, 0, 0)} = \frac{M}{(R_0 - r_J)^2} - \frac{m}{r_J^2} - \frac{M+m}{R_0^3} \left( \frac{MR_0}{M+m} - r_J \right) \quad (\text{A.30})$$

Questa equazione porta a un polinomio di quinto grado le cui radici danno  $r_J$ . In generale, queste radici si devono trovare numericamente. Comunque se  $m \ll M$  e  $r_J \ll R_0$ , si può espandere  $(R_0 - r_J)^{-2}$  in potenze di  $r_J/R_0$  e trovare:

$$0 = \frac{M}{R_0^2} \left( 1 + \frac{2r_J}{R_0} + \dots \right) - \frac{m}{r_J^2} - \frac{M}{R_0^2} + \frac{M+m}{R_0^3} r_J \simeq \frac{3Mr_J}{R_0^3} - \frac{m}{r_J^2} \quad (\text{A.31})$$

Al primo ordine in  $r_J/R_0$  si ha:

$$r_J = \left( \frac{m}{3M} \right)^{1/3} R_0 \quad (\text{A.32})$$

Chiamiamo il raggio  $r_J$  il *raggio di Jacobi* della massa  $m$ ; i nomi alternativi sono *raggio di Roche* o di *Hill*. Il raggio di Jacobi di una massa orbitante dovrebbe corrispondere al suo raggio di marea (v. Cap. 2, Sez. 2.4).

# Appendice B

## Approssimazione di Hill

### B.1 Approssimazione di Hill in 3D del potenziale assisimmetrico

Riferendoci alla Fig. 2.11 (*Fig. 8.7, Binney & Tremaine (2008), Cap. 8*), consideriamo il potenziale gravitazionale generale  $\Phi$  dovuto al sistema nel punto  $\bar{X} \equiv \hat{X} + \bar{x}$  del sistema satellitare con centro di massa in  $\hat{X}$ . Dall'espansione in serie di Taylor si ha:

$$\Phi(\hat{X} + \bar{x}) \simeq \Phi(\hat{X}) + \sum_{k=1}^3 (\bar{x})_k \left( \frac{\partial \Phi}{\partial X_k} \right)_{\hat{X}} \quad (\text{B.1})$$

In questo caso il Sistema Solare dentro la Galassia è collocato in  $\hat{X} \equiv \bar{R}_0 \equiv (X_0, Y_0, 0)$  nel sistema di coordinate  $(X, Y, Z)$  con origine nel centro della Galassia. Prendendo in esame la componente  $X_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) del gradiente  $\nabla \Phi$ , dall'equazione precedente si ha:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X_j} \simeq \left( \frac{\partial \Phi}{\partial X_j} \right)_{R_0} + \sum_{k=1}^3 (\bar{x})_k \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X_j \partial X_k} \right)_{R_0} = (\Phi_j)_{R_0} + \sum_{k=1}^3 (\bar{x})_k (\Phi_{jk})_{R_0} \quad (\text{B.2})$$

In accordo con *Binney & Tremaine (2008, sez. 8.2.1)* il primo termine di espansione di Taylor scompare appena ci riferiamo al movimento di un oggetto nel sistema satellitare al centro di massa del medesimo (Sistema Solare), scegliendolo come origine del sistema di riferimento  $\bar{x} \equiv (x, y, z)$  (Fig. 2.11). Per capirlo ricordiamo che l'accelerazione  $\bar{a}'$  dell'oggetto considerato, rispetto a quella del centro di massa  $\bar{a}_{cm}$ , diventa:

$$\bar{a} = \bar{a}' - \bar{a}_{cm} \quad (\text{B.3})$$

La conseguenza è che il secondo termine dell'equazione per  $\partial \Phi / \partial X_j$ , produce per  $\bar{a}_{cm}$ :

$$\frac{1}{M_S} \sum_{\beta} m_{\beta} \left( \sum_{j,k} \Phi_{jk}(\bar{x})_k^{\beta} \right) = \frac{1}{M_S} \left( - \sum_{j,k} \Phi_{jk} \sum_{\beta} m_{\beta}(\bar{x})_k^{\beta} \right) \quad (\text{B.4})$$

che diventa pari a zero a causa della definizione del centro della massa per un sistema di particelle  $\beta$  di massa totale  $M_S$  una volta che esso si assume come origine del sistema di riferimento. Al contrario il contributo della derivata prima,  $\left( \frac{\partial \Phi}{\partial \bar{X}_j} \right)_{R_0} = \Phi_j$  dovuta all'accelerazione del centro di massa è

$$- \frac{1}{M_S} \sum_{\beta} (m_{\beta} \Phi_j) = -\Phi_j \quad (\text{B.5})$$

dalla definizione del centro di massa. Il termine  $\bar{a}$  per l'oggetto considerato si trasforma in:

$$\bar{a} = -\Phi_j - \sum_{j,k} \Phi_{jk}(\bar{x})_k + \Phi_j = - \sum_{j,k} \Phi_{jk}(\bar{x})_k \quad (\text{B.6})$$

Considero i due nuovi sistemi di riferimento con centro nel Sole:  $\bar{X}', \bar{x}$ , che differisce da quello vecchio per la traslazione lungo  $\bar{X}$ , così che si ha  $X' = X - R_0 = x$ ,  $Y' = Y = y$ ,  $Z' = Z = z$ . A causa che i differenziali nel vecchio e nel nuovo sistema di riferimento sono i medesimi, si possono calcolare le componenti della forza nel sistema ospite con centro localizzato, adesso, in  $\bar{X}'_c \equiv (-R_0, 0, 0)$ , sul Sistema Solare come segue:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X} \simeq x \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} \right)_{R_0} + y \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X \partial Y} \right)_{R_0} + z \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X \partial Z} \right)_{R_0} \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Y} \simeq y \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} \right)_{R_0} + z \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y \partial Z} \right)_{R_0} + x \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y \partial X} \right)_{R_0} \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Z} \simeq z \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z^2} \right)_{R_0} + x \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z \partial X} \right)_{R_0} + y \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z \partial Y} \right)_{R_0} \quad (\text{B.9})$$

senza distinguere le derivate rispetto al sistema  $\bar{X}$  dalle derivate rispetto a  $\bar{X}'$ . Si consideri ora il caso di un potenziale assisimmetrico:

- $\Phi = \Phi(R, Z)$ ,  $R = \sqrt{(X' + R_0)^2 + Y'^2}$ ,  $R_{\odot} = R_0$
- $\frac{\partial \Phi}{\partial R} = \Phi'$ ,  $\left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial R^2} \right) = \Phi''$

e poi

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X'} = \frac{\partial \Phi}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial X'} = \Phi' \frac{X' + R_0}{R} \quad (\text{B.10})$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Y'} = \frac{\partial \Phi}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial Y'} = \Phi' \frac{Y'}{R} \quad (\text{B.11})$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X'_i \partial X'_j} = \frac{\partial}{\partial X'_i} \left( \Phi' \frac{X'_j}{R} \right) = \left( \Phi'' - \frac{\Phi'}{R} \right) \frac{X'_i X'_j}{R^2} + \frac{\Phi'}{R} \delta_{ij} \quad (\text{B.12})$$

dove  $i, j = 1, 2$ ;  $X'_1 = X' + R_0$ ;  $X'_2 = Y'$ . Dall'ultima relazione otteniamo sul piano equatoriale

$$(\Phi)_{xx} = \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X'^2} \right)_{R_\odot} = \Phi''(R_0) \quad (\text{B.13})$$

$$(\Phi)_{yy} = \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y'^2} \right)_{R_\odot} = \frac{\Phi'(R_0)}{R_0} \quad (\text{B.14})$$

$$(\Phi)_{xy} = (\Phi)_{yz} = 0 \quad (\text{B.15})$$

Per la componente verticale  $z$  la forza gravitazionale è:

$$\left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z \partial X'_j} \right) = \frac{\partial}{\partial Z} \left( \Phi' \frac{X'_j}{R} \right) = \frac{X'_j}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z \partial R} \quad (\text{B.16})$$

che significa

$$(\Phi)_{xz} = \left( \frac{X' + R_0}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z \partial R} \right)_{R_\odot} = \left( \frac{X' + R_0}{R} \frac{\partial \Phi'}{\partial Z} \right)_{R_\odot} \quad (\text{B.17})$$

$$(\Phi)_{yz} = \left( \frac{Y'}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z \partial R} \right)_{R_\odot} = \left( \frac{Y'}{R} \frac{\partial \Phi'}{\partial Z} \right)_{R_\odot} \quad (\text{B.18})$$

entrambe uguali a zero grazie all'assunzione di moto circolare del Sole nel piano Galattico attorno al centro Galattico:  $\Phi' = R\Omega^2$ . Ciò si verifica anche con la richiesta di simmetria del sistema rispetto al piano equatoriale secondo cui la componente della forza in  $\frac{\partial \Phi}{\partial Z}$  sul piano ( $z = 0$ ) deve essere zero. Ricordando poi l'equazione di Poisson segue che:

$$(\Phi)_{zz} = \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z^2} \right)_{R_\odot} = 4\pi G \bar{\rho} \quad (\text{B.19})$$

con  $\bar{\rho}$  densità media nei dintorni del Sole lungo la direzione  $z$ . Dalle equazioni per  $(\Phi)_{yy}$  e  $(\Phi)_{zz}$  è evidente la rottura della simmetria sferica. Secondo questo risultato e tenendo conto che le orbite delle comete che qui si considerano giacciono sul piano equatoriale ( $z = 0$ ), si ricavano le prime due equazioni del sistema seguente (B.20) e, non appena si considerano le orbite 3D, l'equazione per  $(\Phi)_{zz}$  produce la terza equazione da aggiungere allo stesso sistema:

$$\ddot{x}(t) = 2\Omega_0 \dot{y}(t) + [\Omega_0^2 - \Phi''(R_0)]x(t) - \frac{\partial \Phi_S}{\partial x}$$

$$\ddot{y}(t) = -2\Omega_0\dot{x}(t) + \left[ \Omega_0^2 - \frac{\Phi'(R_0)}{R_0} \right] y(t) - \frac{\partial\Phi_S}{\partial y} \quad (\text{B.20})$$

$$\ddot{z}(t) = -4\pi G\bar{\rho}z(t) - \frac{\partial\Phi_S}{\partial z}$$

### B.1.1 Contributo di marea

L'effetto dinamico della Galassia, può essere espresso dalla somma dei potenziali del Bulge ( $\Phi_{BG}$ ), del disco ( $\Phi_D$ ) e dell'alone di materia oscura  $\Phi_{DH}$ , come abbiamo visto con l'assunzione di movimento circolare del Sole segue che il corrispondente contributo della velocità circolare e angolare di ciascuna componente dinamica,  $V_{ci}$  e  $\Omega_{oi}$  rispettivamente, è data da:

$$\frac{v_{ci}^2}{R_0} = (-\nabla\Phi_i)_{R_0} = \Omega_{oi}^2 R_0; \quad i = BG, D, DH. \quad (\text{B.21})$$

Inoltre, nella prima equazione del sistema precedente, la seguente trasformazione vale per il termine tra parentesi quadre non appena ci si riferisca ad una specifica componente dinamica:

$$\Omega_{oi}^2 - \Phi_i'' = (-2\Omega_i\Omega_i'R)_{R_0} = 2\frac{v_{ci}^2}{R_0^2} \left( 1 - \frac{d \ln v_{ci}}{d \ln R} \right)_{R_0} \quad (\text{B.22})$$

La componente  $x$  di marea della Galassia con la sua compensazione parziale dovuta alla variazione della forza centrifuga, risulta essere dipendente dal contributo della velocità radiale per ogni componente Galattica. La componente  $y$  della marea è completamente compensata dalla corrispondente variazione della forza centrifuga lungo la coordinata  $y$  in modo che il termine tra parentesi  $\Omega_{oi}^2 - \Phi_i'(R_0/R_0)$  risulti essere zero a prescindere dalla componente considerata.

# Appendice C

## Dati sul Sistema Solare

Otto sono i pianeti del sistema solare ed un centinaio i suoi satelliti, senza considerare per ora i pianeti nani. La Terra, ad oggi, è l'unico sito noto dove c'è la vita almeno a livelli superiori.

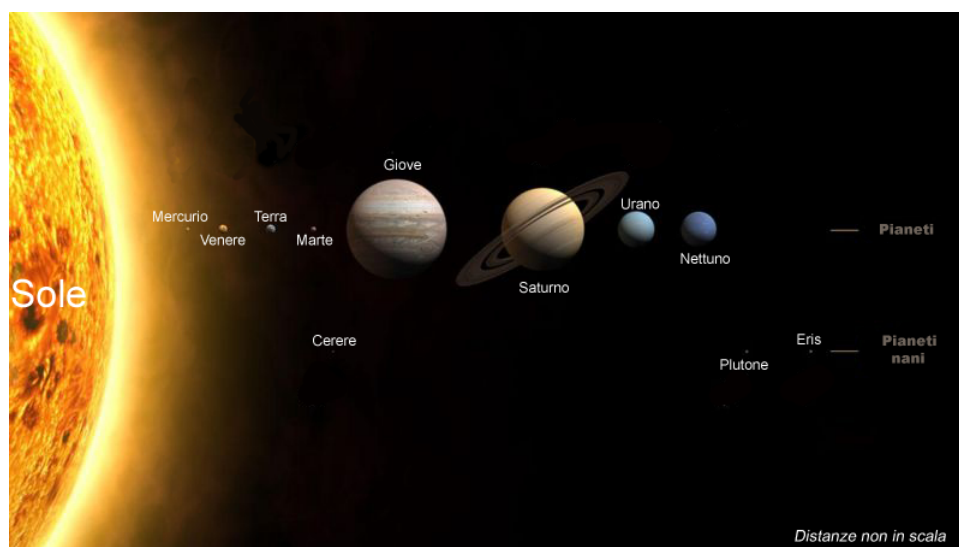


Figura C.1: Sistema Solare [a].

### C.1 Dati fisici

Nelle tabelle seguenti presentiamo dei dati utili del Sistema Solare inerenti al Sole, pianeti e satelliti, necessari ai nostri scopi.

Sole	
Classificazione	Nana Gialla
Classe spettrale	G2 V
Parametri Orbitali, epoca J2000.0	
Semiassse Maggiore	$26 - 28 \cdot 10^3 a.l.$ , $7,62 \pm 0,32 kpc$
Periodo Orbitale	$2,25 - 2,50 \cdot 10^8 anni$ , 1anno galattico
Velocità Orbitale	217 km/s (media)
Sistema Planetario	S.I.: Sistema Solare
Dati Fisici	
Diametro Equatoriale	$1,391 \cdot 10^9 m$
Diametro Polare	$1,3909 \cdot 10^9 m$
Diametro Medio	$1,39095 \cdot 10^9 m$
Schiacciamento	$9 \cdot 10^{-6}$
Superficie	$6,0877 \cdot 10^{18} m^2$
Volume	$1,4122 \cdot 10^{27} m^3$
Massa	$1,9891 \cdot 10^{30} Kg$
Densità Media	$1,408 \cdot 10^3 Kg/m^3$
Densità Media del Nucleo	$1,5 \cdot 10^5 Kg/m^3$
Densità Media della Fotosfera	$2 \cdot 10^{-4} Kg/m^3$
Densità Media della Cromosfera	$5 \cdot 10^{-6} Kg/m^3$
Densità Media della Corona	$10^{-12} Kg/m^3$
Accelerazione di Gravità in Superficie	$274,0 m/s^2$
Velocità di Fuga	617,54 Km/s
Periodo di Rotazione all'Equatore	27d 6h 36min
Periodo di Rotazione a 30° di Latitudine	28d 4h 48min
Periodo di Rotazione a 60° di Latitudine	30d 19h 12min
Periodo di Rotazione a 75° di Latitudine	31d 19h 12min
Velocità di Rotazione all'Equatore	1993m/s
Inclinazione dell'Asse sull'Ecittica	$7,25^\circ$
Inclinazione dell'Asse sul Piano Gattico	$67,23^\circ$
Ascensione Retta Polo Nord	$286,13^\circ (19^h 4^m 30^s)$
Declinazione	$63,87^\circ (63^\circ 52')$
Temperatura Superficiale	5777K (media)
Temperatura della Corona	$5 \cdot 10^6 K$
Temperatura del Nucleo	$\sim 1,57 \cdot 10^7 K$
Luminosità	$3,827 \cdot 10^{26} W$
Radianza	$2,009 \cdot 10^7 W/(sr \cdot m^2)$
Metallicità	$Z = 0,0177; [Fe/H] = 0$
Età Stimata	4,57 miliardi di anni
Dati Osservativi	
Magnitudine Apparente	-26,8
Magnitudine Assoluta	4,83
Diametro Apparente Minimo	31'31"
Diametro Apparente Medio	32'03"
Diametro Apparente Massimo	32'35"

Tabella C.1: Dati del Sole [a].



Venere	
Stella Madre	Sole
Classificazione	Pianeta Terrestre
Parametri Orbitali, epoca J2000.0	
Semiassse Maggiore	108 208 926 km, 0,72333199 UA
Perielio	107 476 002 km, 0,71843270 UA
Afelio	108 941 849 km, 0,72823128 UA
Circonferenza Orbitale	$6,8 \times 10^8$ km, 4,545 UA
Periodo Orbitale	224,70059 giorni (0,6151970 anni)
Velocità Orbitale	35,020 km/s (media)
Inclinazione Orbitale	$3,39471^\circ$
Inclinazione rispetto all'equatore del Sole	$3,86^\circ$ ( $177^\circ$ retrogrado)
Eccentricità	0,00677323
Longitudine del Nodo Ascendente	$76,68069^\circ$
Argomento del Perielio	$54,85229^\circ$
Satelliti	0
Anelli	0
Dati Fisici	
Diametro Medio	12 103,7 km
Superficie	$4,6 \times 10^{14}$ m <sup>2</sup>
Volume	$9,28 \times 10^{20}$ m <sup>3</sup>
Massa	$4,8685 \times 10^{24}$ kg
Densità Media	$5,204 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>
Accelerazione di Gravità in Superficie	$8,87$ m/s <sup>2</sup> (0,904 g)
Velocità di Fuga	10,4 km/s
Periodo di Rotazione	243 giotni
Velocità di Rotazione all'Equatore	1,81 m/s
Inclinazione Assiale	$177,36^\circ$
Temperatura Superficiale	737 K (464 °C) (media)
Pressione Atmosferica	93000 hPa
Albedo	0,65
Campo Magnetico	$<0.0001 B_{Terra}$
Dati Osservativi	
Magnitudine Apparente	-4,6 (media)

Tabella C.2: Dati di Venere [a].

Terra	
Stella Madre	Sole
Classificazione	Pianeta Terrestre
Parametri Orbitali, epoca J2000.0	
Semiassse Maggiore	149 597 887,5 km; 1,000 000 112 4 UA
Perielio	147 098 074 km; 0,983 289 891 2 UA
Afelio	152 097 701 km; 1,016 710 333 5 UA
Circonferenza Orbitale	924 375 700 km; 6,179 069 900 7 UA
Periodo Orbitale	1,000 017 5 anni (365,256 366 giorni)
Velocità Orbitale	29,783 km/s (media)
Inclinazione rispetto all'equatore del Sole	7,25°
Eccentricità	0,016 710 219
Longitudine del Nodo Ascendente	348,739 36°
Argomento del Perielio	114,207 83°
Satelliti	1: Luna
Anelli	0
Dati Fisici	
Diametro Equatoriale	12756,274 km
Diametro Polare	12713,504 km
Diametro Medio	12745,594 km
Superficie	$5,094953216 \times 10^{14} m^2$
Volume	$1,08321 \times 10^{21} m^3$
Massa	$5,9726 \times 10^{24} kg$
Densità Media	$5,514 \times 10^3 kg/m^3$
Accelerazione di Gravità in Superficie	9,7801 m/s <sup>2</sup> all'equatore (0,997 32 g)
Velocità di Fuga	11186 m/s
Periodo di Rotazione	0,997270 giorni siderei (23,9345 ore)
Velocità di Rotazione all'Equatore	465,11 m/s
Inclinazione dell'Asse sull'Eclittica	23,439 281°
Ascensione Retta Polo Nord	0° (0 h 0 min 0 s)
Declinazione	90°
Temperatura Superficiale	287,2 K (14 °C) (media)
Pressione Atmosferica	101325 Pa
Albedo	0,367
Campo Magnetico	da 20 000 nT a 70 000 nT

Tabella C.3: Dati della Terra [a].

Marte	
Stella Madre	Sole
Classificazione	Pianeta Terrestre
Parametri Orbitali, epoca J2000.0	
Semiassse Maggiore	227936637 km 1,52366231 UA
Perielio	206 644 545 km, 1,38133346 UA
Afelio	249 228 730 km, 1,66599116 UA
Circonferenza Orbitale	1429000000 km, 9,553 UA
Periodo Orbitale	686,9600 giorni (1,8808 anni)
Velocità Orbitale	24,077 km/s (media)
Inclinazione sull'Eclittica	1,85061°
Inclinazione rispetto all'equatore del Sole	5,65°
Eccentricità	0,09341233
Longitudine del Nodo Ascendente	49,57854°
Argomento del Perielio	286,46230°
Satelliti	2: Phobos (o Fobos) e Deimos
Anelli	0
Dati Fisici	
Diametro Equatoriale	6804,9 km
Diametro Polare	6754,8 km
Schiacciamento	0,00736
Superficie	144800000 km
Volume	$1,6318 \times 10^{20} m^3$
Massa	$6,4185 \times 10^{23} Kg$
Densità Media	$3,934 \times 10^3 kg/m^3$
Accelerazione di Gravità in Superficie	3,69 m/s <sup>2</sup> (0,376 g)
Velocità di Fuga	5027 m/s
Periodo di Rotazione	1,025957 giorni (24 h 37 min 23 s)
Velocità di Rotazione all'Equatore	241,17 m/s
Inclinazione Assiale	25,19°
Ascensione Retta Polo Nord	317,68143° (21 h 10 min 44 s)
Declinazione	52,88650°
Temperatura Superficiale	210 K (-63 °C) (media)
Pressione Atmosferica	6,9 - 9 hPa
Albedo	0,15
Campo Magnetico	Praticamente Assente, $4 \cdot 10^{-3} B_{Terra}$
Dati Osservativi	
Magnitudine Apparente	-2 (media), -2,91 (massima)
Diametro Apparente	3,5" (min), 25,1" (max)

Tabella C.4: Dati di Marte [a].

Phobos (rapporto tra Marte e Phobos $M_M/M_P = 6 \cdot 10^7$ )	
Classificazione	Satellite di Marte
Parametri Orbitali, epoca 1 Gennaio 1950	
Semiasse Maggiore	9 375,0 km
Periareo	9 233,3 km
Apoareo	9 516,65 km
Circonferenza Orbitale	58 901 km
Periodo Orbitale	0,3190 giorni (7 h 39 min)
Velocità Orbitale	2 138 m/s
Inclinazione sull'Eclittica	26,27°
Inclinazione rispetto all'equatore di Marte	1,082°
Inclinazione rispetto al piano di Laplace	1,0756°
Eccentricità	0,01511
Dati Fisici	
Dimensioni	26,8 × 21 × 18,4 km
Diamentro medio	22,2 km
Schiacciamento	0,12-0,31
Superficie	~ 6,1 × 10 <sup>9</sup> m <sup>2</sup>
Volume	~ 5,5 × 10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup>
Massa	1,07 × 10 <sup>16</sup> kg
Densità Media	1,9 × 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
Accelerazione di Gravità in Superficie	0,0019 – 0,0084 m/s <sup>2</sup>
Velocità di Fuga	11 m/s
Periodo di Rotazione	7 h 39 min (rotaz. sincrona)
Inclinazione Assiale	Nulla
Temperatura Superficiale	~233 K (–40 °C) (media)
Pressione Atmosferica	Nulla
Albedo	0,07
Dati Osservativi	
Diamentro Apparente da Marte	da 8' a 12'

Tabella C.5: Dati di Phobos  $[a]$ . Nota: il piano di Laplace, in astronomia, è definito come il piano medio su cui si situa l'orbita di un satellite naturale durante un ciclo di precessione (ovvero, in termini più rigorosi, il piano perpendicolare al polo di precessione orbitale del corpo).

Luna (rapporto tra Terra e Luna $M_L/M_T = 1/81$ )	
Classificazione	Satellite di Terra
Parametri Orbitali, epoca J2000.0	
Semiassse Maggiore	384400 km
Perigeo	363300 km
Apogeo	405500 km
Circonferenza Orbitale	2413402 km
Periodo Orbitale	27,321 661 55 giorni (27 d 7 h 43,2 m)
Periodo Sinodico	29,530 588 giorni (29 d 12 h 44 m)
Velocità Orbitale	1022 m/s (media)
Inclinazione sull'Eclittica	5,145396°
Inclinazione rispetto all'equatore di Terra	da 18,30° a 28,60°
Eccentricità	0,0549
Dati Fisici	
Diametro Equatoriale	3476,2 km
Diametro Polare	3472,0 km
Diametro medio	3476 km
Schiacciamento	0,0012
Superficie	37930000 km <sup>2</sup>
Volume	$2,1958 \times 10^{19} m^3$
Massa	$6,4185 \times 10^{23} Kg$
Densità Media	$3,3462 \times 10^3 kg/m^3$
Accelerazione di Gravità in Superficie	1,622 m/s <sup>2</sup> (0,1654 g)
Velocità di Fuga	2380 m/s
Periodo di Rotazione	Rotazione Sincrona
Velocità di Rotazione all'Equatore	4,627 m/s
Inclinazione dell'Asse sull'Eclittica	1,5424°
Temperatura Superficiale	250 K (-23 °C) (media)
Pressione Atmosferica	$3 \times 10^{-10}$ Pa
Albedo	0,12
Dati Osservativi	
Magnitudine Apparente	-12,747

Tabella C.6: Dati di Luna [a].

## C.2 Cenni sulla teoria delle perturbazioni

Le mutue interazioni gravitazionali tra i pianeti sono molto più piccole dell'attrazione che il Sole esercita su ognuno di essi, essendo concentrata nella nostra setella il 99.8% della massa totale del Sistema Solare. Un possibile approccio per la soluzione del problema dinamico planetario è allora rappresentato dalla teoria delle perturbazioni secondo la quale gli effetti perturbativi tra i pianeti sono pensabili e rappresentabili come cambiamenti nelle costanti di integrazione (elementi orbitali) che caratterizzano il moto imperturbato pianeta-Sole. In quest'ottica Lagrange introdusse tra il 1774 e il 1780 le equazioni planetarie che portano il suo nome e che oggi ancora

vengono utilizzate. Possiamo ridurre la risoluzione dei moti planetari ad un insieme di problemi a due copri puntiformi grazie alla massa dei pianeti assai più piccola nei confronti di quella Sole e alle distanze interplanetarie molto più grandi rispetto alle dimensioni dei pianeti stessi. In riferimento a quanto già esposto nella prima parte dell'appendice, cerchiamo di capire il problema di base della meccanica celeste e cioè quello di determinare come un'orbita kepleriana venga modificata dall'azione di una forza di disturbo  $\Delta F$  che si considera piccola rispetto alla forza dominante  $-\mu r^{-3}\bar{r}$ . L'equazione di moto relativo diventa  $\ddot{r} = -\mu r^{-3}\bar{r} + \Delta F$ . L'influenza della forza di disturbo  $\Delta F$  sul moto imperturbato è rappresentata considerando un'orbita ausiliaria detta osculante, definita come la traiettoria ellittica lungo cui si svolgerebbe il moto se  $\Delta F$  venisse spenta improvvisamente ad un dato tempo  $t^*$  e il moto continuasse solo sotto l'influenza di  $-\mu r^{-3}\bar{r}$ , con condizioni iniziali  $\bar{r}(t^*)$ ,  $\bar{v}(t^*)$ . Dato che  $\Delta F$  è presente, l'orbita osculante cambia col tempo, ma la variazione è comunque lenta, dall'assunzione che  $\Delta F$  sia piccola. Gli elementi orbitali di questa traiettoria sono detti elementi osculanti e sono dipendenti dal tempo. Una volta che sono conosciuti in funzione del tempo, la posizione e la velocità del corpo nel suo moto relativo sono determinate a qualsiasi istante. La teoria delle perturbazioni si propone di trovare le equazioni che governano le dipendenze temporali degli elementi osculanti. Ci sono due metodi che si possono seguire e che portano alle equazioni di Gauss o di Lagrange; è preferibile per lo studio della evoluzione delle orbite dei pianeti usare le equazioni per le perturbazioni degli elementi orbitali nella forma di Lagrange, dove le variazioni temporali degli elementi stessi dipendono dalle derivate, rispetto a questi ultimi, di una opportuna funzione detta di disturbo. Per le equazioni esplicite, rimandiamo a *Tomasella (1992)* e alla sua bibliografia, dato che la teoria lineare delle perturbazioni secolari di Lagrange non richiede una trattazione semplice ed immediata. In questa sede, per i nostri scopi, sarà sufficiente dire che, con tale teoria, si ottiene l'equazione secolare in  $g$  o in  $s$  che fornisce gli autovalori reali del problema, ossia le frequenze naturali (autofrequenze) di oscillazione del sistema a  $n$  pianeti. Le  $g_j$  sono le frequenze naturali per l'eccentricità e le longitudini del perielio, le  $s_j$  per le inclinazioni e le longitudini dei nodi.

### C.3 Obliquità e Costante di Precessione

L'obliquità di un pianeta è l'angolo tra l'asse di rotazione ( $w$ ) e la normale all'orbita ( $n$ ) del pianeta stesso, indicata generalmente con  $\theta$ . È un parametro importantissimo in climatologia perché il suo valore determina la distribuzione latitudinale del flusso di energia solare che incide sul pianeta ed è responsabile delle differenze stagionali. Per questo motivo è importante conoscerne l'evoluzione. L'obliquità si modifica quando varia la direzione dell'asse di rotazione, della normale all'orbita o entrambe. Se l'asse di spin fosse fisso rispetto ad un riferimento inerziale, allora l'evoluzione

dell'obliquità sarebbe governata esclusivamente dalle oscillazioni secolari dell'inclinazione. In realtà, l'asse di spin si muove nello spazio inerziale. Per effetto della rotazione la forma di un corpo planetario devia da quella perfettamente sferica; assume la forma oblata di un ellissoide di rotazione. Conseguentemente, per l'attrazione esercitata dal Sole e dai satelliti sul rigonfiamento equatoriale planetario, l'asse di spin descrive un cono attorno alla normale dell'orbita. Questo moto di precessione è caratterizzato da una velocità angolare media indicata con  $\omega_{pr}$  che dipende dall'obliquità. Assumendo per il pianeta la forma ellissoidale oblata la velocità di precessione si calcola sviluppando il potenziale gravitazionale in armoniche sferiche con sviluppo troncato al secondo ordine (approssimazione di quadripolo) (Tomasella, 1992):

$$V = -\frac{Gm}{r} \left[ 1 - \left(\frac{R}{r}\right)^2 J_2 P_2(\cos\psi) \right] \quad (C.1)$$

$\psi$  è la colatitudine in un sistema di coordinate polari con origine nel centro del pianeta, R raggio medio, m massa.  $J_2$  è un coefficiente adimensionale che misura il grado di deviazione del corpo dalla simmetria sferica:  $J_2 = (C - A)/mR^2$ , con C ed A momenti di inerzia rispetto all'asse di rotazione e ad un asse nel piano equatoriale.  $P_2(\cos\psi)$  è il polinomio di Legendre di ordine 2 uguale a  $(1/2)(3\cos^2\psi - 1)$ . Bertotti & Farinella (1990) trovano la seguente espressione

$$\omega_{pr} = \frac{3GM(C - A)}{2\omega d^3 C} \cos\theta = \alpha \cos\theta \quad (C.2)$$

dove M è la massa del corpo perturbatore (Sole o satellite) quello che esercita un momento torcente sul rigonfiamento equatoriale del pianeta, d è la distanza media pianeta-perturbatore,  $\omega$  è la velocità angolare di rotazione. Il coefficiente  $H=(C-A)/A$  è detto ellitticità di forma, mentre  $\alpha$  è nota come costante di precessione. Si riportano i valori di H, di d e del periodo di rotazione per i vari pianeti:

Pianeta	$d \times 10^6$ Km distanza media	H ellitticità di forma	periodo di rotazione
Mercurio	59.1	~ 0	58.64 g
Venere	108.2	~ 0	243.00 g
Terra	149.6	0.0034	23h 56m 4s
Marte	228.9	0.006	24h 37m 23s
Giove	780.3	0.065	9h 55m 30s
Saturno	1429	0.108	10h 39m 24s
Urano	2873	~ 0.024	~ 16h
Nettuno	4496	~ 0.017	~ 14h

Si trova che la costante di precessione della Terra è molto più grande di quelle di tutti gli altri pianeti per due motivi: il pianeta è il più vicino al Sole con uno schiacciamento polare significativo ed è l'unico, a parte il lontanissimo Plutone che possiede un satellite massivo. Infatti il rapporto massa pianeta/massa satellite è, per i satelliti più massivi, dell'ordine di  $10^{-4}$ , a parte il caso terrestre dove è ben più grande pari a 0.0122 (e di Plutone per il quale sale 0.125). La costante di precessione terrestre è data allora dalla somma dei contributi del Sole e della Luna:

$$\alpha_T = \frac{3}{2} \left( \frac{n_T^2}{\omega_T} + \frac{n_L^2 m_L}{\omega_T m_T} \right) H_T \quad (\text{C.3})$$

dove  $n_{T,L}$  e  $m_{T,L}$  sono rispettivamente moto medio e massa della Terra e della Luna. Il suo valore è di 54.94 arcsec/anno: ciò significa che la velocità di precessione terrestre è di 50.39 arcsec/anno e che l'asse di rotazione compie un giro completo attorno alla normale in circa 26000 anni (essendo l'attuale obliquità della Terra di  $23.5^\circ$  e  $P=2\pi/\omega_{pr}$ ), o anche che il punto  $\gamma$ , il quale individua la posizione dell'equinozio di primavera, percorre nello stesso tempo tutto l'orbita planetaria: di qui il termine precessione degli equinozi. Il moto di precessione di Marte è dovuto alla sola attrazione Solare e la sua costante è data da:

$$\alpha_M = \frac{3}{2} \left( \frac{n_M^2}{\omega_M} H_M \right) \quad (\text{C.4})$$

dai dati raccolti dalla sonda Viking si trova un valore di 8.26 arcsec/anno, quindi la velocità di precessione (con obliquità planetaria di  $25.1^\circ$ ) è di 7.48 arcsec/anno, cui corrisponde un periodo di precessione di circa 175000 anni. I moti di precessione dei pianeti sono lenti rispetto ai moti orbitali, ma è determinante, nell'evoluzione dell'obliquità il valore, che  $\alpha \cos \theta$  assume rispetto alle frequenze secolari  $s_i$ , le quali governano le variazioni dell'inclinazione-nodo dell'orbita. Si può dire, come nel caso terrestre, che quando il moto secolare dell'inclinazione-nodo è lento rispetto al moto di precessione dell'asse di spin, quest'ultimo, nel suo moto, asseconda l'evoluzione dell'inclinazione e l'obliquità rimane essenzialmente costante. Se, invece, il moto secolare dell'orbita è veloce rispetto a quello dell'asse di rotazione, le variazioni di obliquità sono almeno pari a quelle dell'inclinazione; possono venire anche amplificate da fenomeni di risonanza<sup>1</sup>. Per uno studio dettagliato sull'evoluzione dell'obliquità si rimanda alla fonte *Tomasella (1992)*; in questa sede basta ricordare che le variazioni dell'obliquità prodotte dall'effetto combinato della precessione e della variazione secolare dell'orbita sono essenziali per comprendere l'evoluzione climatica globale di un pianeta. Riportiamo i confronti tra periodo di precessione planetaria ed i periodi secolari nell'inclinazioni orbitali, che permette una immediata predizione del comportamento evolutivo delle obliquità dei pianeti (ordine di

<sup>1</sup>Da un punto di vista matematico la situazione è analoga al problema meccanico dell'oscillatore armonico forzato: se la frequenza della forzante è vicina a quella del proprio oscillatore, aumenta notevolmente l'ampiezza della risposta alla sollecitazione esterna.



grandezza dei periodi di oscillazione secolare (in anni) relative alle autofrequenza  $s_i$ ).

1	230000
2	190000
3	69000
4	73000
5	-
6	49000
7	432000
8	1880000

La Terra con il suo periodo di precessione di 26000 anni, di molto inferiore a tutti i periodi secolari, deve avere obliquità quasi costante. Al contrario il periodo di 175000 anni che caratterizza il ciclo di precessione di Marte, è vicino a due periodi secolari e ci si aspetta quindi che l'obliquità di Marte subisca forti variazioni (*Tomasella, 1992*).

# Bibliografia

## Fonti per la stesura dell'elaborato da Testi, Articoli, Riviste, Tesi:

- Agnor C.B. & Hamilton D. P., Neptune's capture of its moon Triton in a binary-planet gravitational encounter, *Nature*, N. 411, 192-194, 2006.
- Allen C., Carigi L. & Peimbert M., Gradients Predicted for H II Regions and Planetary Nebulae, *ApJ*, N. 494, 247-255, 1998.
- Anders E. & Grevesse N., Abundances of the elements: Meteoritic and solar, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, N. 53, 197-214, 1989.
- Anglada-Escudé G., Tuomi. M, Gerlach E., Barnes R, Heller R., Jenkins J, Wende S, Vogt S., Butler P., Reiners A. & Jones R. H. A., A dynamically-packed planetary system around GJ 667C with three super-Earths in its habitable zone, *A&A*, N.556, A126, 2013.
- Asplund M., Grevesse N., Sauval J., Prieto A. & Kiselman D., Line formation in solar granulation IV [OI], OI and OH lines and photospheric O abundance, *A&A*, N. 417, 751-768, 2004.
- Bailey M. E., The mean energy transfer rate to comets in the Oort cloud and implications for cometary origins, *MNRAS*, N. 218, 1-30, 1986.
- Barrow J., I numeri dell'universo, Ed. Oscarmondadori, 2003.
- Barrow J. D. & Tipler F. J, Il principio antropico (1986), Traduzione di Nicodemi F., Ed. Adelphi, 2007.
- Bergia S., Dragoni G. & Gottardi G., Dizionario biografico degli scienziati e dei tecnici, Bologna, Ed. Zanichelli, 1999.
- Bertotti & Farinella P., *Physics of the Earth and the Solar System*, Kluwer Academic Publisher, 1990.
- Bills G., The rigid body history of Mars, *Journal of Geophysical Research*, N. 95, 137-153, 1990(a).

- Bills G., Geodetic constraints on the composition of Mars, *Journal of Geophysical Research*, N. 95, 131-136, 1990(b).
- Bindoni D., Tesi di Dottorato: New approach to Clausius virial maximum theory and its link to cusp/core problem on galaxy scale, Relatore: Secco L., Dipartimento di Padova, 2008.
- Binney J. & Evans N. W., Cuspy dark matter haloes and the Galaxy, *MNRAS*, N. 327, L27-L31, 2001.
- Binney J. & Tremaine S., *Galactic Dynamics*, Princeton University Press, 1987.
- Binney J. & Tremaine S., *Galactic Dynamics*, Second edition, Princeton Series in Astrophysics, 2008.
- Bondi H., *Cosmology*, Cambridge University Press, Ed. Lampugnani Nigri, Milano, 1970.
- Borghesani A. F., *Introduzione alla struttura della materia*, Ed. Libreria Progetto, 2012.
- Boschke F. L., *L'origine della vita*, Ed. Garzanti, 1975.
- Boissier S. & Prantzos N., Chemo-spectrophotometric evolution of spiral galaxies - I. The model and the Milky Way, *MNRAS*, N. 307, 398-416, 2000.
- Boissier S. & Prantzos N., Chemo-spectrophotometric evolution of spiral galaxies - II. Main properties of present-day disc galaxies, *MNRAS*, N. 312, 857-876, 1999.
- Bottema R., The Stellar Kinematics of Galactic Disks, *A&A*, N. 275, 16, 1993.
- Bovy J. & Rix H., The Milky Way Has No Distinct Thick Disk, *AJ*, N. 751, 131, 2012.
- Bradley Carroll W., Ostlie A. O. & Wesleyb A., *An introduction to modern astrophysics*, Publishing Company, Ogden, Ut (USA), 1996.
- Brassier R., Higuchi A. & Kaib N., Oort cloud formation at various Galactic distances, *A&A*, N. 516, A72, 2010.
- Burstein D., Structure and origin of S0 galaxies. III - The luminosity distribution perpendicular to the plane of the disks in S0's, *ApJ*, N. 234, 829-836, 1979.
- Bruzual G. & Charlot S., Stellar population synthesis at the resolution of 2003, *MNRAS*, N. 344, 1000-1028, 2003.

- Carter B., Large number coincidences and the Antropic Principle in Cosmology, in *Confrontation of Cosmological Theories with Observation Data*, Ed. Longair M., Reidel, Dordrecht, 291-294, 1974.
- Casuso E. & Beckman J. E., The K-dwarf problem and the time-dependence of gaseous accretion to the Galactic disc, *A&A*, N. 419, 181-190, 2004.
- Chabrier G., Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, N. 115, 763–795, 2003.
- Chang R. X., Shu G. C. & Hou J. L., History of Star Formation and Chemical Enrichment in the Milky Way Disk, *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 2, N. 3, 226, 2002.
- Chiappini C., Matteucci F. & Gratton R., The Chemical Evolution of the Galaxy: The Two-Infall Model, *ApJ*, N. 477, 765-780, 1997.
- Chiappini C., Matteucci F. & Romano D., Abundance Gradients and the Formation of the Milky Way, *ApJ*, N. 554, 1044-1058, 2001.
- Chiosi C., *Dispense di Astrofisica Teorica Mod. A*, 2012.
- Coles P. & Lucchin F., *Cosmology, The Origin and Evolution of Cosmic Structure*, Ed. Wiley & Sons, 1995.
- Combes F., Boissè P., Mazure A. & Blanchard A., *Galaxies and Cosmology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995.
- Courteau S. & Rix H. W., Maximal Disks and the Tully-Fisher Relation, *ApJ*, N. 513, 561-571, 1999.
- Curtis H. & Barnes N. S., *Invito alla biologia (1987)*, Ed. Zanichelli, 1991.
- Danby J., *Fundamentals of celestial mechanics*, New York: Macmillan, 1962.
- D' Onofrio M. & Burigana C., *Questions of modern Cosmology: Galileo's Legacy*, Ed. Springer, 2009.
- Dallaporta N. & Secco L., Il Principio Antropico in fisica ed in cosmologia, *Giornale di Fisica*, Ed. Compositori Bologna, Vol. 34, N. 3, 163-192, 1993.
- Dallaporta N., *Scienza e Metafisica, un pseudo contrasto tra due domini complementari*, Ed. Cedam, 1997.
- De Biasi A., *Tesi di Dottorato: Tidal Effects on the Oort Cloud Comets and Dynamics of the Sun in the Spiral Arms of the Galaxy*, PhD School Director: Piotto G., Supervisore: Secco L., Dipartimento di Fisica e Astronomia di Padova, 2014.

- De Biasi A., Secco L., Masi M. & Casotto S., Galactic planar tides on the comets of Oort Cloud and analogs in different reference systems, *A&A*, N. 574, A98, 2015.
- De Biasi A., Tesi di Laurea Magistrale: Effetti Mareali della Galassia su orbite di proto comete della Nube di Oort, Relatore: Secco L., Dipartimento di Astronomia di Padova, 2010.
- de Grijs R., Kregel M. & Wesson H. K., Radially truncated galactic discs, *MNRAS*, N. 324, 1074, 2001.
- Dehnen W. & Binney J., Local stellar kinematics from HIPPARCOS data, *MNRAS*, N. 298, 387-394, 1998.
- Delsanti A. & Peixinho N., Reanalyzing the visible colors of Centaurs and KBOs: what is there and what we might be missing, *A&A*, N. 577, A35, 2015.
- Einstein A., *The Journal of Franklin Institute*, Vol. 221, N. 3, 1936.
- Esteban C., Garcia-Rojas J., Peimbert M., Peimbert A., Ruiz M. T., Rodriguez M., Carigi L., A reappraisal of the chemical composition of the Orion nebula based on Very Large Telescope echelle spectrophotometry, *MNRAS*, N. 1, 229-247, 2004.
- Fecchio M., Tesi di Laurea Triennale: Possibile estensione della nube di Oort in sistemi extrasolari, Relatore: Secco L., Correlatrice: De Biasi A., Dipartimento di Astronomia di Padova, 2011.
- Fenner Y. & Gibson B. K., Deriving the Metallicity Distribution Function of Galactic Systems, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, N. 20, 189-195, 2003.
- Flynn C., Sommer J. L. & Christensen P., Kinematics of the outer stellar halo, *MNRAS*, N. 281, 1027-1032, 1996.
- Fouchard M., Ratajczak R. & Borczyk W., Two fast integrators for the Galactic tide effects in the Oort Cloud, *MNRAS*, N. 377, 1151-1162, 2007.
- Freeman C. K., On the Disks of Spiral and so Galaxies, *ApJ*, N. 160, 160-811, 1970.
- Galletta G., *Dispense di Astrobiologia*, 2012.
- Galletta G. & Sergi V., *Astrobiologia, le frontiere della vita*, Ed. Hoelpi, 2005.
- Gingerich O., *Cercando Dio nell'universo*, Ed. Lindau, 2007.

- Goettel K., Shields A. & Decker A., Density constraints on the composition of Venus, Lunar and Planetary Science Conference, New York and Oxford, Pergamon Press, 1507-1516, 1982.
- Gonzales G., Brownlee D. & Ward D., Una nicchia nella Galassie, *Le Scienze*, N. 398, 68-75, 2001.
- Gonzalez G., Habitable Zone in the universe, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, N. 35, 555-606, 2005.
- Gowanlock M., Patton D. & McConnella S., Model of Habitability Within the Milky Way Galaxy, *Astrobiology*, N. 11, 855-873, 2011.
- Greaves S, J. & Wyatt M. C., Debris discs and comet populations around Sun-like stars: the Solar system in context, *MNRAS*, N. 404, 1944-1951, 2010.
- Guzzo M., *Dispense di Fisica Matematica*, 2011.
- Haberle M., Il clima di Marte, *Le Scienze*, N. 215, 28-36, 1986.
- Heavens A., Panther B., Jimenez R. & Dunlop J., The star formation history of the universe from the stellar population of nearby galaxies, *Nature*, N. 428, 625-627, 2004.
- Heisler J., Monte Carlo Simulations of the Oort Comet Cloud. *Icarus*, N.88, 104-121, 1990.
- Heisler J. & Tremaine, S, The influence of the galactic tidal field on the Oort comet cloud, *Icarus*, N. 65, 13-26, 1986.
- Hills J., Comet showers and the steady-state infall of comets from the Oort cloud, *ApJ*, N.86, 1730-1740, 1981.
- Hoerner S. Von, Die Auflösungszeit offener, *Zeitschrift für Astrophysik*, N. 44, 221-42, 1958.
- Hoyle F., A new model for the exoanding Universe, *MNRAS*, N. 108, 372, 1948.
- Hoyle F., *Religions and tha scientists*, SCM, London, 1959.
- Hoyle F., *Il principio antropico e il pincipio cosmologico*, a cura di Giacomini B., Ed. Spazio Libri Editori, 1991.
- Hou J. L., Prantzos N. & Boissier S., Abundance gradients and their evolution in the Milky Way disk, *A&A*, N. 362, 921-936, 2000.

- Hubble E., A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, N. 15, 168-173, 1929.
- Jimenez R., Padoan P., Matteucci F. & Heavens A. F., Galaxy formation and evolution: low-surface-brightness galaxies, *MNRAS*, N. 299, 123-138, 1998.
- Jones M. & Lambourne R., *An Introduction to Galaxies and Cosmology, The open Universe*, Cambridge University Press, 2003.
- Juric M., Ivezić Z., Brooks A., Lupton R. H., Schlegel D. , Finkbeiner D., Padmanabhan N., Bond N., Sesar B., Rockosi C. M., Knapp G. R., Gunn J. E., Sumi T., Schneider D. P., Barentine J. C., Brewington H. J., Brinkmann J. , Fukugita M., Harvanek M., Kleinman S. J., Krzesinski J., Long D., Nielsen E. H., Nitta A., Snedden S. A. & York D. G., The Milky Way Tomography with SDSS. I. Stellar Number Density Distribution, *ApJ*, N. 673, 864–914, 2008.
- Kaib N., Roskar R. & Quinn T., Sedna and the Oort Cloud around a migrating Sun, *Icarus*, N. 215, 491-507, 2011.
- Kaltenegger L., Eiroa C. & Fridlund C. V. M., Target star catalogue for Darwin Nearby Stellar sample for a search for terrestrial planets, *Astrophysics and Space Science*, DOI 10.1007, 2010.
- Kapteyn J. C., First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System, *ApJ*, N. 55, 302, 1922.
- Kasting J., Earth's early atmosphere, *Le Scienze*, N. 259, 920-926, 1993(a).
- Kasting J. & Harman E., Inner edge of the habitable zone, *Nature*, N. 504, 221-223, 2013.
- Kasting J., Whitmire D. P. & Reynolds R. T., Habitable Zones, *Icarus*, N. 101, 108-128, 1993.
- Kasting J. & Toon B., Climate evolution on the terrestrial planet. Origin and evolution of planetary and satellites atmospheres, Ed- Atreya, Arizona Press, 423-449, 1989.
- Kasting J., Toon B. & Pollack J., L'evoluzione del clima sui pianeti terrestri, *Le Scienze*, N. 236, 56-67, 1988.
- Kennicutt R. C., The star formation law in galactic disks, *ApJ*, N. 344, 685-703, 1989.

- Kennicutt R. C., Star Formation in galaxies along the Hubble sequence, Annual Review of A&A, N. 36, 189-231, 1998.
- Klypin A., Zhao H. & Somerville R., CDM-based Models for the Milky Way and M31. I. Dynamical Models, ApJ, N. 573, 597-613, 2002.
- Komar L., Klacka J. & Pastor P., Galactic tide and orbital evolution of comets, arXiv: 0912.3447v2, 2009.
- Kopparapu R., Kasting J., Ramirez R., Eymet V., Robinson T. D., Mahadevan S., Terrien R. C., Goldman S. D., Meadows V. & Deshpande R., Habitable Zones Around Main Sequence Stars: New Estimates, ApJ, N. 765, 16, 2013.
- Kroupa P., Title: The Initial Mass Function of Stars: Evidence for Uniformity in Variable Systems, Le Science, N. 295, 82-91, 2002.
- Kroupa P., Cristopher A. & Gilmore G., The distribution of low-mass stars in the Galactic disc, MNRAS, N. 262, 545-587, 1993.
- Kuijken K. & Gilmore G., The galactic disk surface mass density and the Galactic force  $K(z)$  at  $Z = 1.1$  kiloparsecs, ApJ, N. 367, L9-L13, 1991.
- La Bibbia, versione ufficiale della CEI, Ed. San Paolo, 2000;
- Lacey C. & Cole S., Merger rates in hierarchical models of galaxy formation. II: Comparison with N-body simulations, MNRAS, N. 271, 676, 1994.
- Layzer D., The arrow of time, ApJ, N. 206, 559-569, 1976.
- Laskar J., Secular evolution of the Solar System over 10 milion years, A&A, N. 198, 341-362, 1988.
- Laskar J., Froeschle C. & Celletti A., The measure of chaos by the numerical analysis of the fundamental frequencies, Physica D., N. 56, 253-259, 1992.
- Laskar J. & Robutel P., The chaotic obliquity of the planets, Nature, N. 361, 608-612, 1993.
- Laskar J., Joutel F. & Robutel P., Stabilization of the obliquity by the Moon, Nature, N. 361, 615-617, 1993.
- Levison H., Dones L. & Duncan M., The Origin of Halley-Type Comets: Probing the Inner Oort Cloud, ApJ, N. 121, 2253-2267, 2001.
- Lewis J. R. & Freeman K. C., Kinematics and chemical properties of the old disk of the Galaxy, ApJ, N. 97, 139-162, 1989.



- Lineweaver C. H., An Estimate of the Age Distribution of Terrestrial Planets in the Universe: Quantifying Metallicity as a Selection Effect, *Icarus*, N. 151, 307-313, 2001.
- Lineweaver C. H., Fenner. Y. & Gibson B. K., The Galactic Habitable Zone and the Age, *Le Scienze*, N. 303, 59–62, 2004.
- Longaire M, *Galaxy Formation*, Ed. Springer, 1998.
- Matese J. & Whitman P., The Galactic disk Tidal Field and the nonrandom Distribution of Observed Oort Cloud Comets, *Icarus*, N 82, 389-402, 1992.
- Marcy G., Butler P., Fischer D., Vogt S., Wright J. & Chris G., Observed Properties of Exoplanets: Masses, Orbits, and Metallicities, *Oxford Journals*, N. 158, 24-42, 2005.
- Martin C. & Kennicutt R., Star Formation Thresholds in Galactic Disks, *ApJ*, N. 555, 301-321, 2001.
- Marzari F. & Vanzani V., Dispense del corso di Fisica dei Pianeti, 2012-2013.
- Masi M., Secco L. & Gonzalez G., Effects of the planer galactic tides and stellar mass on comet cloud dynamics, *The Open Astronomy Journal*, N. 2, 74-89, 2009.
- Masi M., Secco L. & Vanzani V., Dynamical effects of the Galaxy on the Oort's Cloud, *Mem. S.A.It*, N. 74, 494-495, 2003.
- Matese J. & Lissauer J., Characteristics and Frequency of Weak Stellar Impulses of the Oort Cloud, *Icarus*, N. 157, 228–240, 2002.
- Matese J., Whitmire P. & Lissauer J., A Widebinary Solar Companion as a Possible Origin of Sedna-like Objects. *Earth Moon and Planets*, N. 97, 459-470, 2005.
- McMillan P. J. & Binney J. J., The uncertainty in Galactic parameters, *MNRAS*, N. 402, 934–940, 2010.
- Mihalas D. & Binney J., *Galactic Astronomy*, W. H. Freeman and Company, S. Francisco, 1968.
- Miyamoto M. & Nagai R., Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, N. 27, 533-543, 1975.
- Miller, G. E. & Scalo, J. M., The initial mass function and stellar birthrate in the solar neighborhood, *ApJ-Supplement*, N. 41, 513-547, 1979.

- Mo H., van den Bosch F. & White S., *Galaxy, Formation and Evolution*, Cambridge, 2010.
- Molla M., Ferrini F. & Díaz A. I., *Evolution of Spiral Galaxies. VII. Time Evolution of the Radial Distributions of Abundances*, *The American Astronomical Society*, N. 475, 519-533, 1997.
- Morbidelli A., *Origin and Dynamical Evolution of Comets and their Reservoirs*, arXiv:astro-ph/0512256v1, 2005.
- Morbidelli A., Levison H. F., van Laerhoven C., Rodney G. & Kleomenis T., *Origin of the Structure of the Kuiper Belt during a Dynamical Instability in the Orbits of Uranus and Neptune*, *Icarus*, N. 196, 258-273, 2008.
- Mordasini C., Alibert Y. & Benz W., *Proc. Tenth Anniversary of 51 Peg-b: Status of and prospects for hot Jupiter studies*, Paris: Frontier Group, N. 84, 2006.
- Morris P., Gupta H., Nagy Z., Pearson J., Ossenkopf-Okada V., Falgarone E., Lis C. E., Gerin M., Melnick G., Neufeld D. A & Bergin E. A, *Herschel/HIFI Spectral Mapping of C+, CH+, and CH in Orion BN/KL: The Prevailing Role of Ultraviolet Irradiation in CH+ Formation*", arXiv: 1604.05805v3, 2016.
- Murray C. & Dermott F., *Solar system dynamics*, Cambridge University Press, 1999.
- Naab. T. & Ostriker J. P., *A simple model for evolution of disc galaxies: the Milky Way*, *MNRAS*, N. 366, 899-917, 2006.
- Navarro J. & Frenk C., & White M., *A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering*, *ApJ*, N. 490, 493-508, 1997.
- Oort J., *The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin*. *Bull. Astronomical Institute of Netherlands*, N. 11, 91-110, 1950.
- Ortolan A. & Secco L., *Il principio Antropico fra dominio della Scienza e quello della filosofia*, *Giornale di Fisica*, 37-4, Ed. Compositori, Bologna, 1996.
- Ortolani S., *Dispense di Astrofisica Generale Mod. A*, 2012.
- Ostriker P.J. & Tinsley M., *Is Deuterium of cosmological or galactic origin?*, *ApJ*, N. 201, L51-L54, 1975.
- Pagel B. E. J., *Nucleosynthesis and Chemical evolution of Galaxy*, Cambridge University Press, 1997.

- Pagel B. E. J. & Tautvaisiene G, Chemical evolution of primary elements in the Galactic disc: an analytical model, *MNRAS*, N. 276, 505-514, 1995.
- Pardi M. C. & Ferrini F., Evolution of spiral galaxies 2: The star formation history in the solar neighborhood, *ApJ*, N. 421, 491-504, 1994.
- Penzias A. & Wilson R., A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s, *ApJ*, N. 142, 419-421, 1965.
- Piovan L., Chiosi C., Merlin E., Grassi T., Tantalò R., Buonomo U. & Casarsa L. P., Formation and Evolution of the Dust in Galaxies. II. The Solar Neighbourhood, *ArXiv e-prints* 1107.4561, 2011.
- Pollack J. B., Climatic change on the terrestrial planets, *Icarus*, N. 37, 479-553, 1979.
- Pollack J. B., Present e past climates of the terrestrial planets, *Icarus*, N. 91, 173-198, 1991.
- Pollack J. B., Kasting J., Richardson M., Poliakoff K., The case a wet, warm climate on early Mars, *Icarus*, N. 71, 203-224, 1987.
- Portinari L. & Chiosi C., On star formation anc chemical evolution in the Galactic disc, *A&A*, N. 350, 827-839, 1999.
- Prantzos N., On the Galactic Habitable Zone, *Space Science Reviews*, N. 135, 312-322, 2006.
- Prantzos N. & Aubert O., On the chemical evolution of the galactic disk, *A&A*, N. 302, 69, 1995.
- Prantzos N. & Boissier S., Metallicity in damped Lyman-a system: evolution or bias?, *MNRAS*, N. 315, 82-88, 1999.
- Prantzos N. & Silk J., Star Formation and Chemical Evolution in the Milky Way: Cosmological Implications, *ApJ*, N. 507, 229-240, 1998.
- Press W. & Schechter P., Formation of Galaxies and Clusters of Galaxies by Self-Similar Gravitational Condensation, *ApJ*, N. 187, 425-438, 1974.
- Reeves H., La crescita della complessità in un universo in espansione, (pg. 61 in: *Il principio Antropico*, a cura di Giacomini B.) Ed. Spazio Libri Editori, 1991.
- Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., Brunthaler A., Moscadelli L., Zhang B. Y, Sato M., Honma M. , Hirota T., Hachisuka K., Choi Y. K., Moellenbrock G. A. & Bartkiewicz A., Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming

- Regions. VI. Galactic Structure, Fundamental Parameters and Noncircular Motions, *ApJ*, N. 700, 137–148, 2009.
- Ress M., *I sei umeri dell'universo*, Ed. Rizzoli, 2002.
  - Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P., Clocchiatti A., Diercks A., Garnavich P. M., Gilliland R. L., Hogan C. J., Jha S., Kirshner R. P., Leibundgut B., Phillips M. M., Reiss D., Schmidt B. P., Schommer R. A., Smith R. C., Spyromilio J., Stubbs C. & Suntzeff N. T., Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant, *ApJ*, N. 116, 1009-1038, 1998.
  - Rigutti M., *Storia dell'Astromomia Occidentale*, Ed. Giunti, 1997.
  - Rolleston J., Smartt S. J., Dufton P. L. & Ryans R. , The Galactic metallicity gradient, *A&A*, N. 363, 537-554, 2000.
  - Romano D., Tosi M., Chiappini C. & Matteucci, F., Deuterium astration in the local disc and beyond, *MNRAS*, N. 369, 295–304, 2006.
  - Sackett P., Does the Milky Way Have a Maximal Disk?, *ApJ*, N. 483, 103, 1997.
  - Salpeter E., The Luminosity Function and Stellar Evolution, *ApJ*, N. 121, 161, 1955.
  - Schwarzschild M., *Structure and evolution of the stars*, Princeton University Press, Princeton, 1958.
  - Secco L., *Dispense di Galaxy Dynamics*, 2016.
  - Secco L., *The metallicity gradient on the Milky Waythin disk*, *Appunti*, 2013.
  - Secco L., *Effetto mareale della Galassia su un ammasso globulare*, *Appunti*, 2016.
  - Spano M., Marcelin M, Amram P., Carignan C., Epinat B. & Hernandez O., GHASP: an H kinematic survey of spiral and irregular galaxies - V. Dark matter distribution in 36 nearby spiral galaxies, *MNRAS*, N. 383, 297-316, 2008.
  - Tomasella L., Marzari F. & Vanzani V., Evolution of the Earth obliquity after the tidal expansion of the Moon orbit, *Planetary & Space Science*, Vol 44, N. 5, 427-430, 1995.
  - Tomasella L., *Tesi di Laurea Specialistica: Evoluzione dell'obliquità della Terra e Marte*, Relatore: Vanzani V, Correlatore: Marzari F., Dipartimento di Fisica di Padova, 1992.

- Toomre A., On the gravitational stability of a disk of stars, *ApJ*, N. 139, 1217-1238, 1964.
- van der Kruit P., Optical surface photometry of eight spiral galaxies studied in Westerbork, *A&A-Supplement*, N. 38, 15-38, 1979.
- van der Kruit P., Title: The radial distribution of surface brightness in galactic disks, *A&A*, N. 173, 59-80, 1987.
- veras D. & Evans W., Exoplanets Beyond the Solar Neighbourhood: Galactic Tidal Perturbations, *arXiv: 1212.4150v1*, 2013.
- Vladilo G., Murante G., Silvia L., Provenzale. A., Ferri G. & Ragazzini G., The Habitability of Earth-like planets with different levels of atmospheric pressure, *ApJ*, N. 767, 65 (23pp), 2013.
- Wang B. & Silk J, Heavy element abundances and massive star formatio, *ApJ*, N. 427, 759, 1994.
- Ward W. R., Large-scale variation in the obliquity of Mars, *Le Scienze*, N. 181, 260-262, 1974.
- Ward W. R., Past obliquity oscillations of Mars: the role of the Tharsis uplift, *Journal of Geophysical Research*, N. 84. 243-259, 1979(b).
- Ward W. R., Long term orbital and spin dynamics of mars, Kieffer H. et al. Editors, Arizona Press, 299-320., 1992.
- Ward W. R., Comments on the long term stability of the Earth's obliquity, *Icarus*, N. 50, 444-448, 1982.
- Wyse R. F. & Silk J., Star formation rates and abundance gradients in disk galaxies, *ApJ*, N. 339, 700-711, 1989.
- Wong T. & Blitz L., The Relationship between Gas Content and Star Formation in Molecule-rich Spiral Galaxies, *ApJ*, N. 569, 157-183, 2002.
- Yeomans D. K., Near-Earth Objects: Finding Them Before They Find Us, Princeton Press, 2006.
- Zhao H., Analytical models for galactic nuclei, *MNRAS*, N. 278, 488-496, 1996.

**Fonti per la stesura dell'elaborato da siti internet e altri ausili on-line:**

[a] [www.wikipedia.it](http://www.wikipedia.it)

[a1] [www.google.it/imghp](http://www.google.it/imghp) (Google Immagini)

[b] [www.vialattea.net/esperti/php/risposta.php?num=1946](http://www.vialattea.net/esperti/php/risposta.php?num=1946)

- [c] [www.newscientist.com](http://www.newscientist.com)
- [d] [phl.upr.edu](http://phl.upr.edu)
- [e] [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)
- [f] [www.esa.int](http://www.esa.int)
- [f1] [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [g] [www.lescienze.it/news/2016/03/11/news/exomars\\_esa\\_marte\\_schiaparelli](http://www.lescienze.it/news/2016/03/11/news/exomars_esa_marte_schiaparelli)
- [h] [www.youtube.com/watch?v=ZPa7YB-5Gcw](http://www.youtube.com/watch?v=ZPa7YB-5Gcw)
- [i] [phl.upr.edu/press-releases/anevhabitablezone](http://phl.upr.edu/press-releases/anevhabitablezone)
- [l] [media4.obspm.fr/pianeti-extrasolari/base](http://media4.obspm.fr/pianeti-extrasolari/base)
- [m] [www.iau.org](http://www.iau.org)
- [n] [www.asi.it](http://www.asi.it)
- [o] <http://www.webalice.it/fadange/ASCI/Astronomia/ssolare/Mars.htm>
- [p] [www.isac.cnr.it/dinamica/davolio](http://www.isac.cnr.it/dinamica/davolio)
- [q] [archive.oapd.inaf.it](http://archive.oapd.inaf.it)
- [r] <http://www.solstation.com/habitable>
- [s] [www.iuav.it](http://www.iuav.it)
- [t] [www.online.scuola.zanichelli.it](http://www.online.scuola.zanichelli.it)
- [u] [eduseis.na.infn.it](http://eduseis.na.infn.it)
- [v] [www.chimicamo.org](http://www.chimicamo.org)
- [v1] [goldbook.iupac.org](http://goldbook.iupac.org)
- [z] [www.helldragon.eu](http://www.helldragon.eu), Solmi (2011).
- [z1] [newspazio.blogspot.it](http://newspazio.blogspot.it)

# Ringraziamenti

Lungo è stato il viaggio per giungere a questa meta; intense le emozioni vissute. Molte le persone da ringraziare che mi hanno costantemente sostenuto e aiutato, tanto nei momenti di gioia e soddisfazione, quanto in quelli più complicati, difficili. Ringraziare per me non è mai stato difficile, anzi, ma trasmettere l'intensità della riconoscenza che provo per alcune delle persone più straordinarie che io abbia mai incontrato nel cammino della mia vita, non è per niente banale.

Comincio con il ringraziare il Professor Secco, mio correlatore, preziosa ed indispensabile guida sia nella stesura della tesi che nel mio personale percorso di crescita interiore. Tra le altre cose, mi ha trasmesso la consapevolezza di una delle Verità più preziose che io abbia mai appreso nel tempo finora concessomi: la Bellezza è misura del Mistero; le Verità con le quali il Cosmo scandisce la sua Esistenza, sono archetipi che discendono da un Tutto, che non è solo banale somma delle sue parti, e che distilla gocce di luce che da Verbo divengono Creazione, generano il tempo, lo spazio e . . . la Vita, nonché il legame indissolubile tra il Microcosmo, che è l'Uomo, e l'infinito Macrocosmo, nostra culla ancestrale.

Un ringraziamento particolare al Professor Marzari, mio relatore, prezioso aiuto e sostegno nella stesura di questo elaborato. Punto di vista, il suo, molto utile per sottolineare alcuni aspetti essenziali di un argomento tanto complicato, quanto affascinante, che è la ricerca dei luoghi dove potrebbe sorgere, svilupparsi e mantenersi la Vita nel nostro straordinario Universo.

Ringrazio anche la Dottoressa Tomasella e la Dottoressa De Biasi, le quali mi hanno fornito parte della documentazione necessaria alla stesura di importantissime parti della tesi. Per concludere i ringraziamenti delle persone legate al lavoro della tesi, ringrazio anche l'Ingegnere Frasson per la costruzioni di alcune immagini del mio elaborato e l'Ingegnere Pavan per l'aiuto nel risolvere i "costanti" problemi del mio PC, che, con tutta probabilità, io stesso creavo. E grazie al Dottor Bottosso per aver stimolato in me la ripresa dello studio in un tempo dove stavo perdendo di vista il tragitto per arrivare alla meta.

Non so se possano esserci parole così potenti per ringraziare i pilastri della mia vita: famigliari e amici. . . ma ci proverò.

Grazie a papà Dario, mamma Giovanna e nonna Jole e grazie ai miei fratelli, cognate e nipoti: Sergio, Luca, Matteo, Anna, Luana, Samantha, Leonardo e Fran-

cesca. Grazie dell'amore incondizionato che mai mi avete fatto mancare, grazie per il sostegno costante che mi ha sorretto nei momenti difficili e con il quale abbiamo anche condiviso grandi soddisfazioni. Grazie perché sono felice dell'uomo che sto diventando; tra pregi e difetti, sono orgoglioso dei preziosi insegnamenti da voi ricevuti, trasmessi con pazienza e amorevole compassione nel momento dell'errore, indispensabile tassello nella crescita di una persona. Grazie per avermi trasmesso forti e cristallini ideali come la sincerità, l'onestà, il bene per il prossimo, ma anche per se stessi, l'amore per la cultura e forse il più importante... che la Vita va amata, sostenuta e difesa sopra ogni altra cosa. Ai miei nipoti, inoltre, dico grazie perché attraverso i loro occhi condivido lo stupore per la semplicità, assaporando ogni attimo come profondo momento di riflessione su ciò che, a volte, si dà per scontato e che, invece, alla fine, risulta indispensabile.

Riferimenti essenziali nella mia vita, sono stati anche mio zio Ignazio, mia zia Lisi, nonché la Professoressa Maria Perschitz e Don Stefano Chioatto; come rotaie ben salde sul terreno e parallele, ma viste in giusta prospettiva, focalizzate in un punto dello spazio che diventa scopo, obiettivo da raggiungere, mi hanno spesso impedito voli troppo fantasiosi e pericolosi, alibi per tardare un doveroso percorso di crescita interiore che sfocia in concretezza del vivere, una sorta di equilibrio dinamico che si mantiene in costante evoluzione. Ringrazio anche mio zio Francesco e tutte le mie cugine, specialmente per gli anni della spensierata fanciullezza che ricordo con non poca nostalgia. Ringrazio anche Samuele e Daniela, Mario, Tiziana, tutta la famiglia Benvenuti e Dvanzo per il loro caloroso affetto.

I miei amici sono presenze costanti e forti, a loro devo molto e sono felice che molto ancora avremo da vivere e condividere. Alcuni li ringrazio per i momenti di divertimento, essenziale nella vita perché essenziale è ridere, è "l'ossigeno" del cuore, la carica per affrontare le meraviglie del nostro tempo e anche le sfide più dure. Altri li ringrazio per i momenti di riflessione e per le discussioni sotto la pallida e antica luce delle stelle, sorseggiando una buona birra, a volte più di una, e fumando l'ultima sigaretta della giornata, parlando del futuro, di chi siamo e di chi diventeremo, a volte anche "del sesso degli angeli", simpatico modo di dire per indicare che in realtà si parla di nulla, altre volte analizzando il nostro tempo che, come ogni epoca, ha i suoi pregi e i suoi difetti, ma per quanto mi riguarda è ricco di speranza. Speranza di un futuro di amore e pace per la Vita tutta, e per la nostra meravigliosa Terra. Sembrano ormai frasi sentite e risentite, retoriche, ma l'errore più grande è proprio quello di smettere di ripeterle, declassandole a utopie. Altri amici sono stati indispensabili nei momenti nei quali la via da percorrere era nebbiosa, mi hanno tolto la polvere dagli occhi e aiutato nel cammino scelto. Ognuno a loro modo è per me tesoro prezioso che custodisco gelosamente nel mio cuore. Grazie cari amici e amiche, grazie B. Boys & Fly Gurls, grazie Rapaci e grazie anche a tutti gli altri "meolitici e non", e alle loro famiglie che mi hanno sempre voluto bene (e accolto,



specialmete nei momenti di studio più complicati). In special modo ringrazio con tutto il cuore: Anna e Andrea, Ciacia e Pieppe, Kekko, Marci e Gianmarco, Marina, Frax e Lionessa, Liagiu e Met, Pollo-Schienoni-Computeroni-Pollastroni, Nico, Robi e Rachele, Antonio, Lopa-Posta-Piazza-Censimento-Wuffer-Zappa, Limone, Bot e gli amici di Padova, Riki ed Elise, Davide, Giuli, Betti, Matteo-Marsenao, Elena e Beatrice, Eddy e famiglia. Ringrazio anche gli amici dell'università e in particolar modo, per il loro aiuto e sostegno, Gabri, Francesco e Anita. Grazie anche a Simona ed Alessandra della segreteria del dipartimento (sempre disponibili e gentili).

Infine, ringrazio la direzione e la presidenza dell'Istituto Aeronautico A. Fleming di Treviso, i miei colleghi (e loro amici) e tutti i miei alunni; cinque anni preziosi, quelli dell'insegnamento, nei quali ho imparato molto, specialmente su quello che "credevo" già di sapere di me stesso.

Mi scuso se mi sono dimenticato di qualcuno in questi ringraziamenti, ma sono stato davvero fortunato perchè ho sempre avuto tante persone che mi hanno voluto bene e sostenuto.

Concludo questo lavoro ringraziando chi ha letto e chi leggerà questo elaborato e mi auguro che il senso profondo del "miracolo" della Vita venga ben compreso e visto in tutta la sua Bellezza perchè possa essere protetto e rispettato per l'intera esistenza del tempo.