

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

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

* Dipartimento di Fisica
e Astronomia di Padova

In questa seconda parte vengono analizzate le condizioni di abitabilità a livello galattico, introducendo la Zona di abitabilità galattica (GHZ).

Vengono considerati i seguenti fattori: distanza dal centro galattico, quantità di metalli (per la formazione di pianeti terrestri), tempo per l'evoluzione della vita complessa, le esplosioni di supernovae (SN).

Si esaminano inoltre i contributi di diversi ricercatori sul fenomeno di marea galattica che influenza i serbatoi di comete (come la nube di Oort) presenti ai confini di un sistema solare dove si creano perturbazioni che potrebbero influenzare negativamente le condizioni di abitabilità.

A partire dalle *considerazioni iniziali su scala planetaria (Parte I)* pubblicate sul n° 66 – Settembre 2017 di questa rivista, il problema della quantità di metalli necessari per formare un pianeta come la Terra, le minacce dovute alle esplosioni di *supernovae* e la possibile iniezione di comete per effetti mareali Galattici, ci obbligano a prendere in esame una storia più ampia per la vita, che è quella legata alla formazione della nostra Galassia, introducendo la Zona di Abitabilità Galattica (GHZ).

Ma vedremo che questo orizzonte così allargato, non è tuttavia sufficiente. Sarà necessario dilatarlo fino a comprendere l'evoluzione cosmologica entro la quale avviene la formazione degli elementi chimici indispensabili ai processi biologici che la vita richiede. Il set di vincoli cosmologici perché tutto questo possa avvenire, definirà quella che abbiamo chiamata abitabilità cosmologica (COSH).

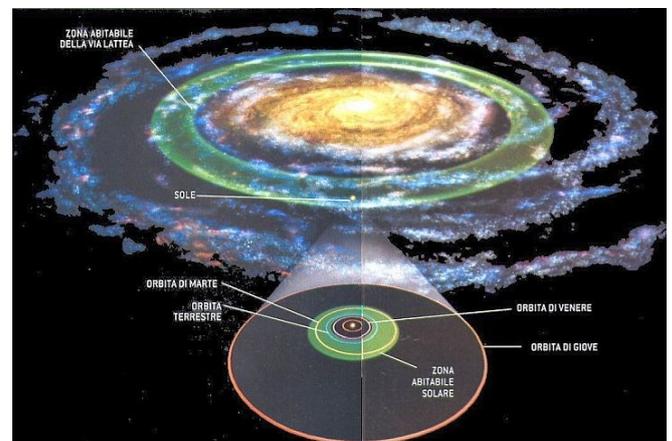
Seguiranno le conclusioni, dove verrà sottolineato come la Vita, con le sue richieste, ci porti alla consapevolezza della nostra connessione con l'intero Universo che appare sorprendentemente sintonizzato fin dall'inizio perché questo straordinario evento possa avvenire una decina di miliardi di anni dopo.

Questi aspetti saranno sviluppati nella Parte III del presente articolo.

Zona di abitabilità galattica (GHZ)

Per definirla e quindi estendere il concetto di abitabilità da locale (attorno ad una stella, CHZ) a Galattico (GHZ, con riferimento alla nostra Galassia, una tipica galassia di disco), abbiamo bisogno di analizzare i condizionamenti legati ai seguenti fattori:

1. Distanza dal centro Galattico.
2. Quantità di metalli¹ (per la formazione di pianeti terrestri).
3. Tempo per l'evoluzione della vita complessa.



Rappresentazione pittorica della GHZ
(Zona di Abitabilità Galattica) in relazione con la CHZ
(Zona di Abitabilità Circumstellare)

4. Esplosioni di *supernovae* (SN).
5. Effetti di marea della Galassia sulle comete appartenenti alla *Nube di Oort* (o analoga).

Molti sforzi sono stati fatti (vedi Tabella 1 e Figura 2) per identificare e correlare questi differenti fattori Galattici che possono influenzare lo sviluppo della vita (Gonzalez et al., 2001; Lineweaver et al., 2004; Prantzos, 2006; Gowanlock et al., 2011). Gonzalez et al. (2001), pur avendo avuto il grandissimo merito di essere stati i primi a dare i limiti per la GHZ, si sono basati solo sulla considerazione del punto 2. Invece la sintesi più esaustiva è stata fornita successivamente dal lavoro di Lineweaver et al. (2004), anche se in essa il punto 5 non è stato considerato.

In questo studio un modello dell'evoluzione della Galassia (Fenner & Gibson, 2003) è stato combinato con i vincoli di metallicità necessari per poter formare pianeti simili alla Terra (Lineweaver, 2001).

È importante infatti sottolineare che i punti 1 e 2 sono fra loro strettamente correlati dato che la distanza dal centro Galattico decide la quantità di metalli che hanno potuto essere formati durante l'evoluzione chimico-dinamica della struttura².

Questo è indipendente dal possibile, successivo abbandono di quella posizione nella GHZ (migrazione) da parte della stella centrale che regge il sistema planetario, una volta avvenuta la formazione dei pianeti stessi.

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 1— Confronto dei limiti dei vari autori.

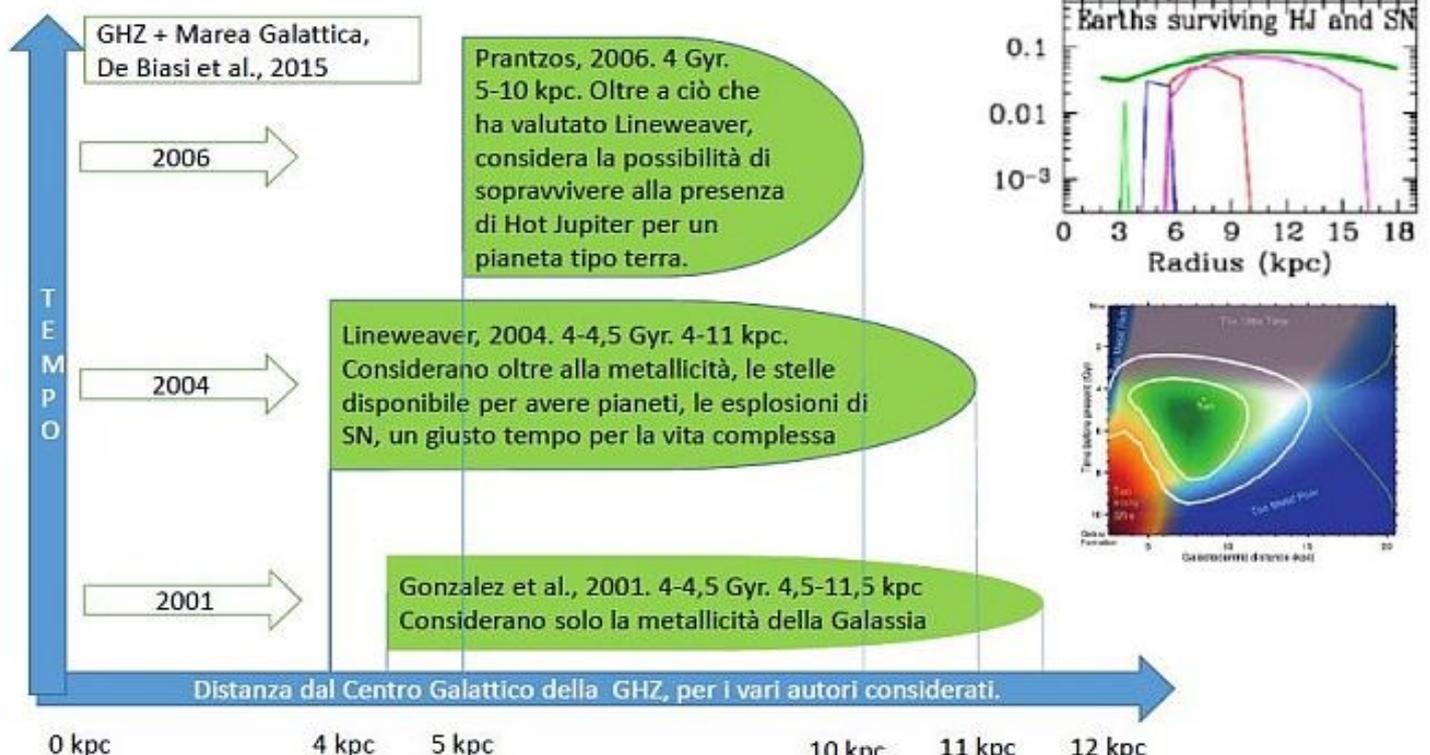


Figura 2: Schema di confronto per anni, autori e corrispondenti limiti per la GHZ (Fecchio, 2016).

Il contributo di Lineweaver et al. (2004)

La strada percorsa da questi autori è stata la seguente:

- a. Innanzi tutto il problema di quante stelle sono disponibili per ospitare un sistema planetario sul disco della Galassia. Viene quindi analizzato l'andamento sia spaziale che temporale della *rate* di formazione stellare (SFR) all'interno di esso.
- b. In secondo luogo la ricerca dei limiti superiore e inferiore per la quantità di elementi pesanti (metallicità) necessaria per costruire un pianeta terrestre: troppa poca metallicità implica una carenza di materiale necessario a formare un pianeta di massa terrestre; troppa metallicità darebbe luogo a pianeti giganti. La probabilità, P_{metals} , di ospitare pianeti terrestri, è stata assegnata all'interno della distribuzione spazio temporale dei metalli prodotti nella nostra Galassia, calcolata con un modello chimico-dinamico.

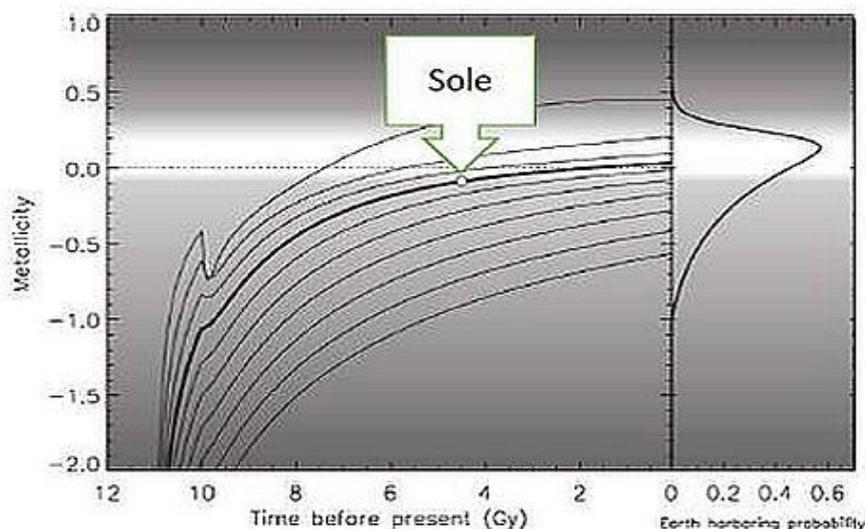


Figura 3—Distribuzione spaziale di metalli a diversa distanza Galattocentrica (da 2,5 kpc, curva superiore, a 20,5 kpc, curva inferiore, con incrementi di 2 kpc) in funzione del tempo e confronto con la probabilità di ospitare pianeti terrestri in funzione della metallicità della stella ospite (a destra nella figura). L'epoca di formazione del Sole è evidenziata da un punto bianco.

- c. Valutazione del tempo sufficiente per consentire l'evoluzione biologica: hanno assunto il tempo scala della Terra come tipico ed hanno adottato 4 ± 1 Gyr (1 Gyr = un gigayear = 1 miliardo di anni) 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.
- d. Necessità di evitare gli effetti delle *supernovae*: le radiazioni ad alta energia a causa di una esplosione di supernova, possono essere fatali per lo sviluppo della vita. 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.

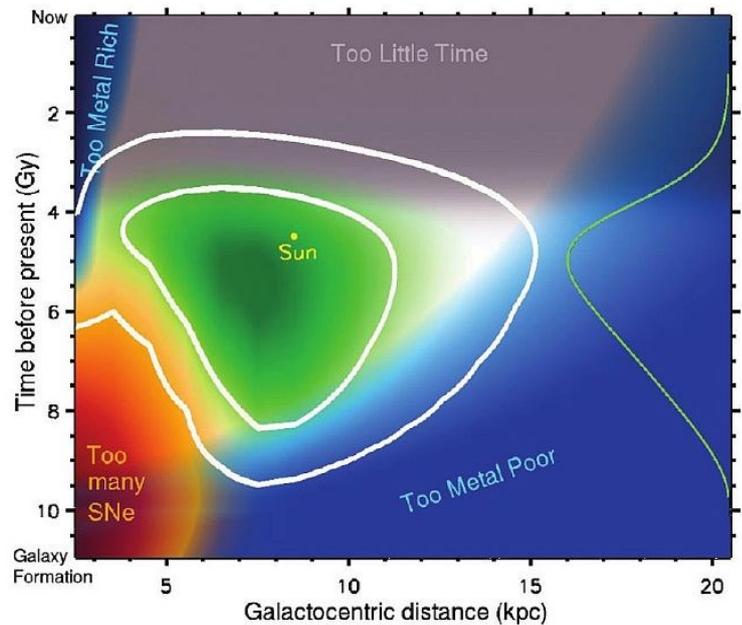
La probabilità totale di ottenere uno sviluppo favorevole della vita complessa, P_{GHZ} , può essere espressa come:

$$P_{GHZ} = SFR \cdot P_{metals} \cdot P_{evol} \cdot P_{SN} \quad (8)$$

I fattori P_{SN} e SFR dell'equazione precedente non sono indipendenti (crescono in modi opposti: la riduzione di SFR tende a far crescere la P_{SN} , tendono quindi ad annullarsi a vicenda). $P_{GHZ}(r, t)$ esprime la frazione di sistemi planetari con le condizioni adatte per la vita come una funzione dello spazio e del tempo.

La GHZ è identificata come quella regione che si estende dal 68% al 95% della probabilità P_{GHZ} . Ne risulta una zona centrata a circa 8 kpc dal centro Galattico, che si allarga con il tempo, passando da 8 a 4 miliardi di anni fa.

Figura 4—La GHZ nel disco della Galassia ottenuta usando i requisiti basati sulla probabilità di ospitare stelle, con adatta metallicità (blu), con sufficiente tempo per l'evoluzione (grigio) e praticamente libera dalla presenza del fattore di estinzione della vita a causa di esplosioni da supernova (rosso). I contorni in bianco corrispondono al 68% (interno) e il 95% (esterno) della P_{GHZ} , comprendono quindi le stelle originate con il più alto potenziale per ospitare la vita complessa. La curva verde (a destra) mostra l'andamento temporale della probabilità necessaria per la vita complessa, ottenuta integrando $P_{GHZ}(r,t)$ su r (Lineweaver et al., 2004).



È interessante notare (Figura 5A) che:

- agli inizi della storia Galattica l'intensa formazione stellare nella parte interna della disco (sotto i 7 kpc a circa 8Gyr, freccia bianca a destra) ha fornito gli elementi pesanti necessari alla formazione di pianeti terrestri, ma ha anche prodotto una inaccettabile forte emissione di supernovae da non consentire l'inizio della vita per diversi miliardi di anni (per esempio a partire da 4 kpc devono passare circa 3Gyr, freccia bianca a sinistra);
- il *bulge* (rigonfiamento centrale della Galassia con estensione fino a circa 3.5 kpc), 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 5A).

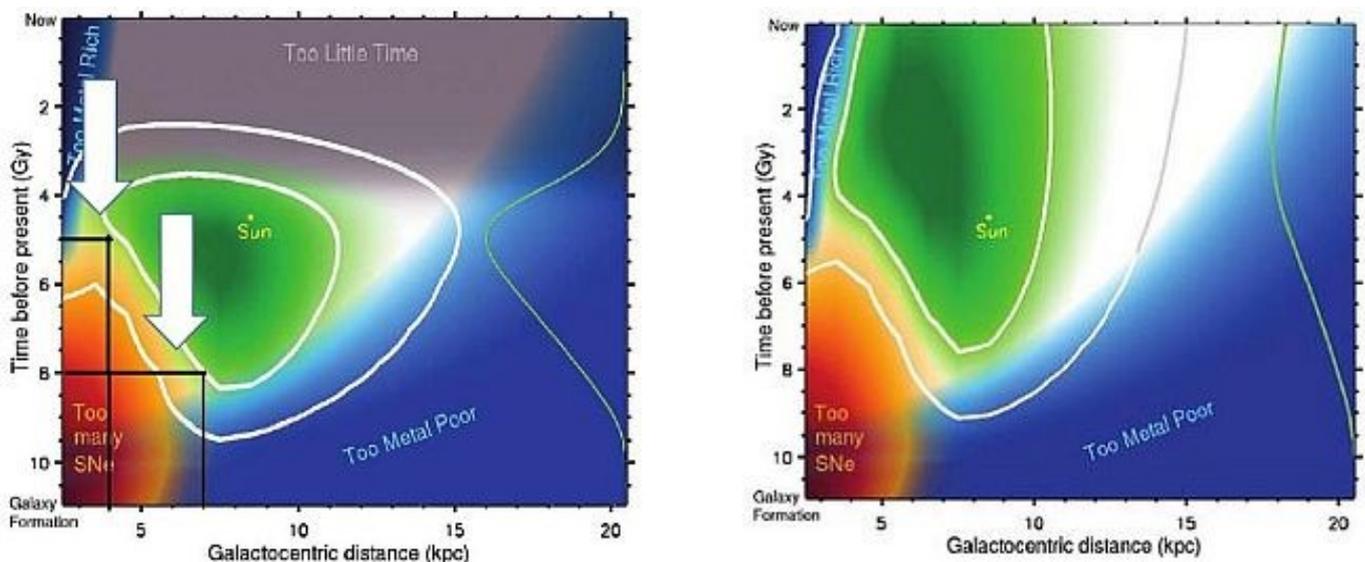


Figura 5A: Sono evidenziate le zone descritte precedentemente, idonee e non all'abitabilità (freccie bianche, a sinistra). Variazione della GHZ, se si elimina il limite superiore di tempo per l'evoluzione complessa della Vita (a destra).

- se si elimina il vincolo temporale per l'evoluzione complessa della Vita, la zona di abitabilità (68%) si apre verso l'alto come mostra il pannello di destra di Figura 5A. I limiti che si ottengono per la GHZ sono dati in Tabella 1 con due valori superiori leggermente diversi a seconda che il tempo per avere la Vita complessa, sia valutato in 4.5 Gyr (11 kpc) o in 4.0 Gyr (10 kpc).

Il contributo di Prantzos (2006, 2008)

Prantzos è fortemente critico sui limiti proposti da Lineweaver et al. (2004) e avanza seri dubbi sulla possibilità di definire la GHZ dato che le assunzioni che si debbono fare sono al momento lontane dall'essere definite in modo inequivocabile.

I vari fattori che compaiono nella (8), vengono criticamente rivisti. Per esempio i requisiti di metallicità vengono articolati tenendo presente non soltanto la necessità di formazione di pianeti simili alla Terra, ma anche quella di sopravvivere ai cosiddetti *Hot Jupiters*.

Si tratta di pianeti di massa confrontabile o superiore a quella di Giove che, pur formandosi a qualche AU dalla stella centrale, nella interazione con il disco proto-planetario, perdono momento angolare migrando verso l'interno. Nel loro cammino essi sono in grado di distruggere i pianeti più piccoli adatti ad ospitare la vita.

Non basta quindi affrontare il problema della sola metallicità perché alti valori di questa possono incrementare l'abbondanza di formazione di tali pericolosi pianeti (Figura 6).

Anche la probabilità di sopravvivenza alle esplosioni delle *supernovae* viene riconsiderata. L'idea alla base del ragionamento è che l'esplosione di una SN avrebbe come effetto di distruggere lo strato di ozono così che gli UV darebbero luogo a mutazioni genetiche. Perché questo avvenga l'esplosione deve avvenire abbastanza vicina e con una frequenza superiore ad un certo limite.

Dagli studi di Gehrels et al. (2003), questo pericolo ci sarebbe se l'esplosione avvenisse a una distanza $D < 8$ pc e con una frequenza f di almeno 1.0/Gyr. Inoltre le acque degli oceani potrebbero proteggere gli strati più profondi dalle radiazioni fatali, permettendo alla vita di continuare in questi luoghi.

Sia pure con tutte le sue perplessità e le revisioni accennate, Prantzos alla fine fornisce, con una formula simile alla (8), la dimensione della GHZ (Figura 5B) per 5 differenti epoche durante l'evoluzione della Via Lattea (cioè 1, 2, 4, 8 e 13 Gyr). In particolare quella a 4Gyr risulta in buon accordo con il modello proposto in Lineweaver et al. (2004) (Tabella 1 e Figura 2).

È interessante notare come la GHZ sia, a 2 Gyr, un anello estremamente stretto sul disco della Via Lattea (in blu, ultimo grafico a destra), che progressivamente raggiunge l'estensione compresa fra 5 - 10 kpc a 4Gyr (in rosso), per arrivare a comprendere a 13 Gyr (praticamente ora) la quasi totalità del disco Galattico (in verde), con un picco di probabilità intorno a 10 kpc.

Figura 5B: 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 è mostrata nel grafico in basso a destra alle diverse epoche segnate in colore.

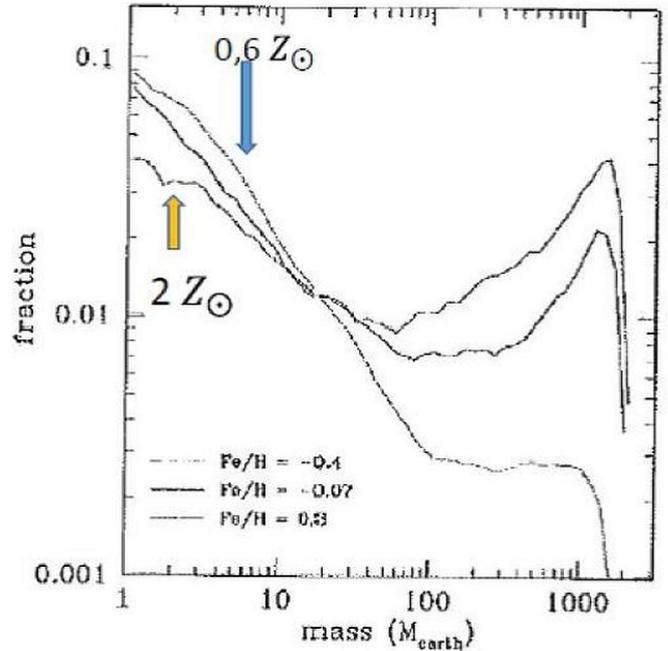
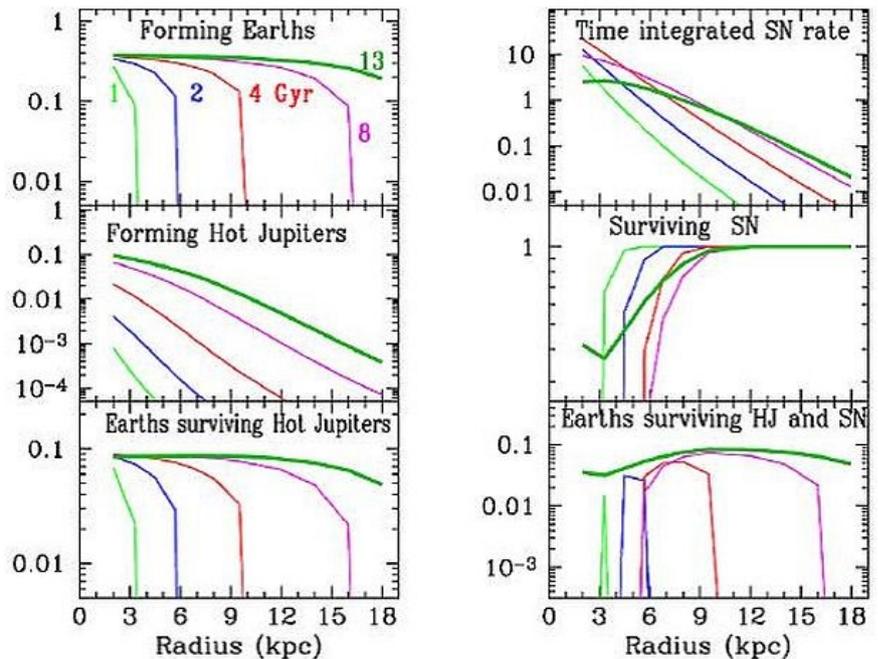


Figura 6: Frazione di pianeti attorno a una stella di una massa Solare, in funzione delle loro masse (in masse terrestri) per tre diversi valori di metallicità della stella (e del corrispondente disco proto-planetario). La freccia blu indica l'andamento per una metallicità Z_{\odot} (frazione in massa dei metalli) minore di quella Solare quella gialla per un valore doppio di quello Solare. Si vede che l'alta metallicità favorisce la formazione di pianeti tipo Terra ma anche di quelli massivi (giovanini), in accordo con le osservazioni, mentre la bassa metallicità incrementa la formazione di pianeti terrestri inibendo quella di pianeti giganti (simulazioni di Mordasini et al., 2006).

È importante sottolineare come l'approccio di Prantzos riguardi la probabilità di vita su di un pianeta tipo Terra, che appartenga a un sistema planetario attorno ad una data stella che sorge in un determinato punto spazio-temporale della Galassia. La probabilità di esserci di tale stella non viene tuttavia considerata anche se della distribuzione di stelle che le sono intorno si tiene conto per stimare la frequenza delle *supernovae*.

Se si riguarda il problema solo dal punto di vista della probabilità di avere stelle di alta metallicità e con alta *rate* di formazione di pianeti riducendo l'effetto negativo dell'azione delle *supernovae*, come fanno Gowanlock et al. (2011), si giunge ad una conclusione paradossale, cioè che la nostra posizione attuale non sarebbe particolarmente favorevole per ospitare la vita, mentre l'ambiente più idoneo sarebbe la parte interna della Galassia con un picco a circa 2.5 kpc.

Questo fa però capire come la determinazione dei limiti della GHZ sia suscettibile di approfondimenti ulteriori, uno fra tutti, quello del possibile effetto delle comete (il punto 5) che abbiamo personalmente approfondito nel lavoro di De Biasi et al. (2015).

Maree galattiche planari sulle comete della *nube di Oort* e sistemi analoghi

Un concetto importantissimo per l'abitabilità planetaria, specialmente per la nostra Terra, è la comprensione delle dinamiche cometarie e da che cosa queste possono essere influenzate.

Infatti fattori di perturbazione esterni al serbatoio di comete del Sistema Solare, la *Nube di Oort* (Oort, 1950), potrebbero indirizzare le comete nella zona dei pianeti interni con conseguenze catastrofiche per la Vita e quindi divenire una delle cause atte a limitare la GHZ (De Biasi et al., 2015).

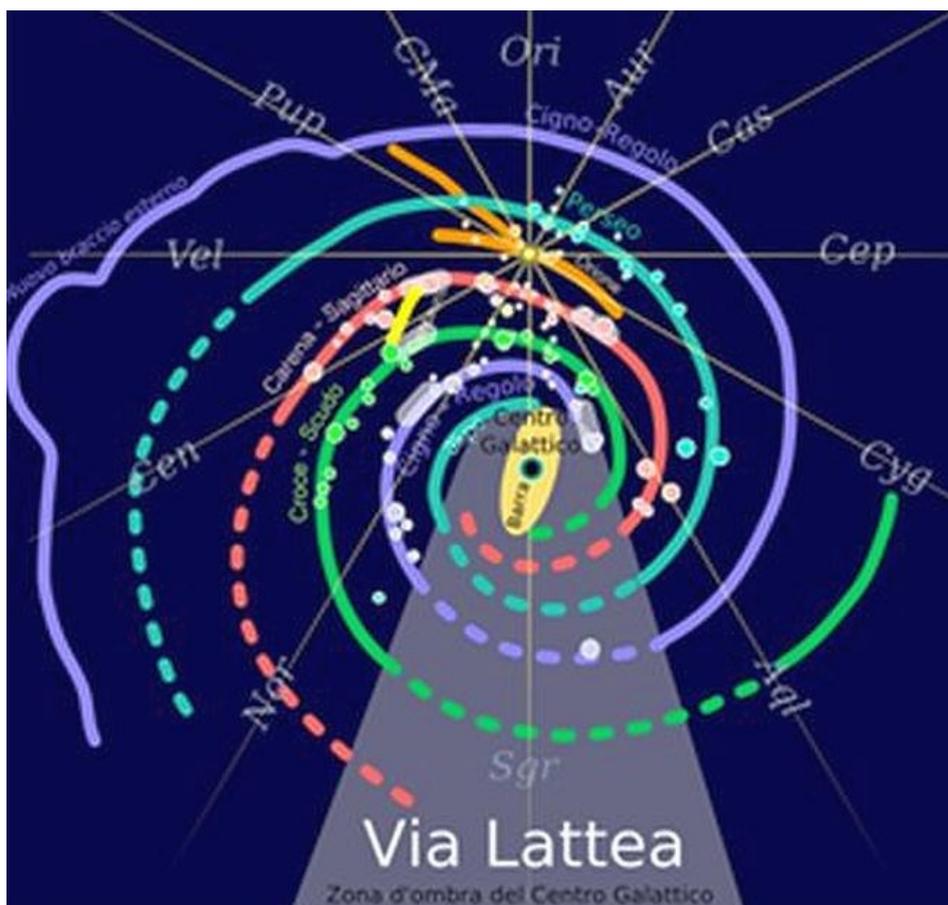


Figura 7A: Posizione del Sole sul disco Galattico rispetto ai due bracci a spirale più attigui, quello di Orione e quello di Perseo.

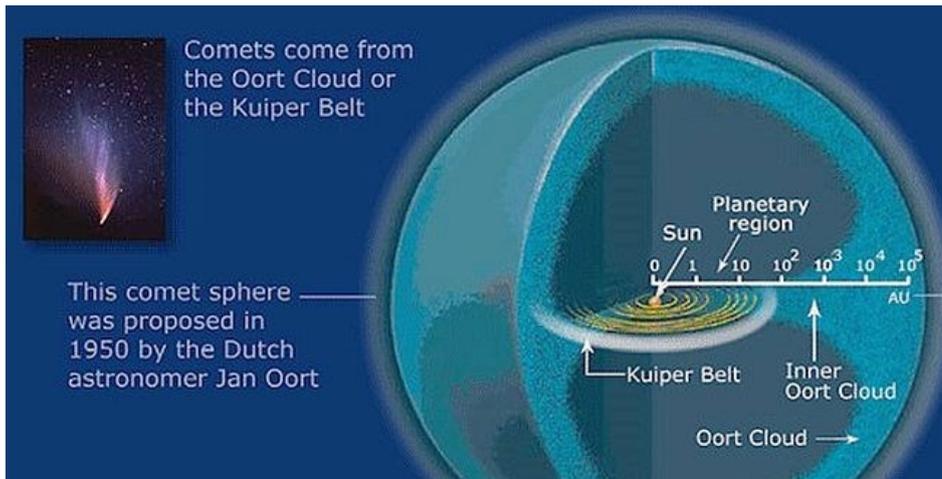


Figura 7B: Schematizzazione del sistema Solare e della Nube di Oort.

Il Sistema Solare è a 8 kpc dal centro Galattico, vicino al braccio di Orione. La *Nube di Oort* è una nube sferica di comete situata tra le 20000 e le 100000 UA (0,3 e 1,5 anni luce) dal Sole.

Uno dei fattori maggiori che possono influenzare il processo di iniezione delle comete verso l'interno del sistema Solare è la marea Galattica planare (radiale e trasversale) proveniente dal contributo della massa del *bulge*, del disco e dell'alone di materia oscura, le tre componenti dinamiche principali della Galassia. Il contributo della marea planare, diventa non trascurabile quando la distanza della stella madre dal centro Galattico si riduce rispetto a quella attuale del Sole, come mostrato da Masi et al. (2009) per le comete della *Nube di Oort* (in un sistema inerziale).

Il sistema studiato (Figura 8) è costituito da un gruppo di 48 particelle di prova (che simulano le comete) aventi tutte un perielio $q = 2000$ UA, con afelio, $a = (40, 60, 80, 100, 120, 140) \cdot 10^3$ UA. Ciascun gruppo è stato a sua volta ripetuto per diverse orientazioni in longitudine galattica $l = (0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ)$

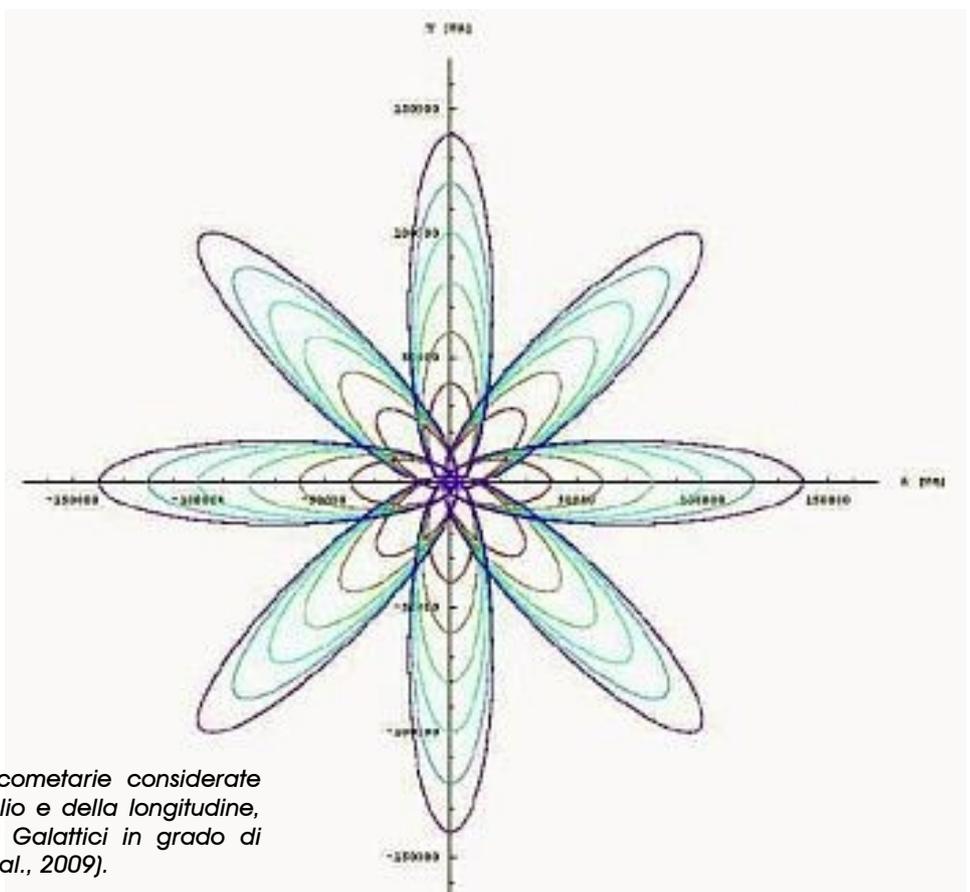


Figura 8: Distribuzione delle orbite cometarie considerate nella simulazione, in funzione dell'afelio e della longitudine, prima dell'accensione dei potenziali Galattici in grado di deformarle per effetti mareali (Masi et al., 2009).

In Figura 9 si vede la modifica delle orbite da parte della marea Galattica a 8 e 4 kpc dal centro della Galassia. Al diminuire della distanza gli effetti della marea Galattica sono più vistosi. Le orbite esterne sono simili a quelle considerate da De Biasi et al. (2015).

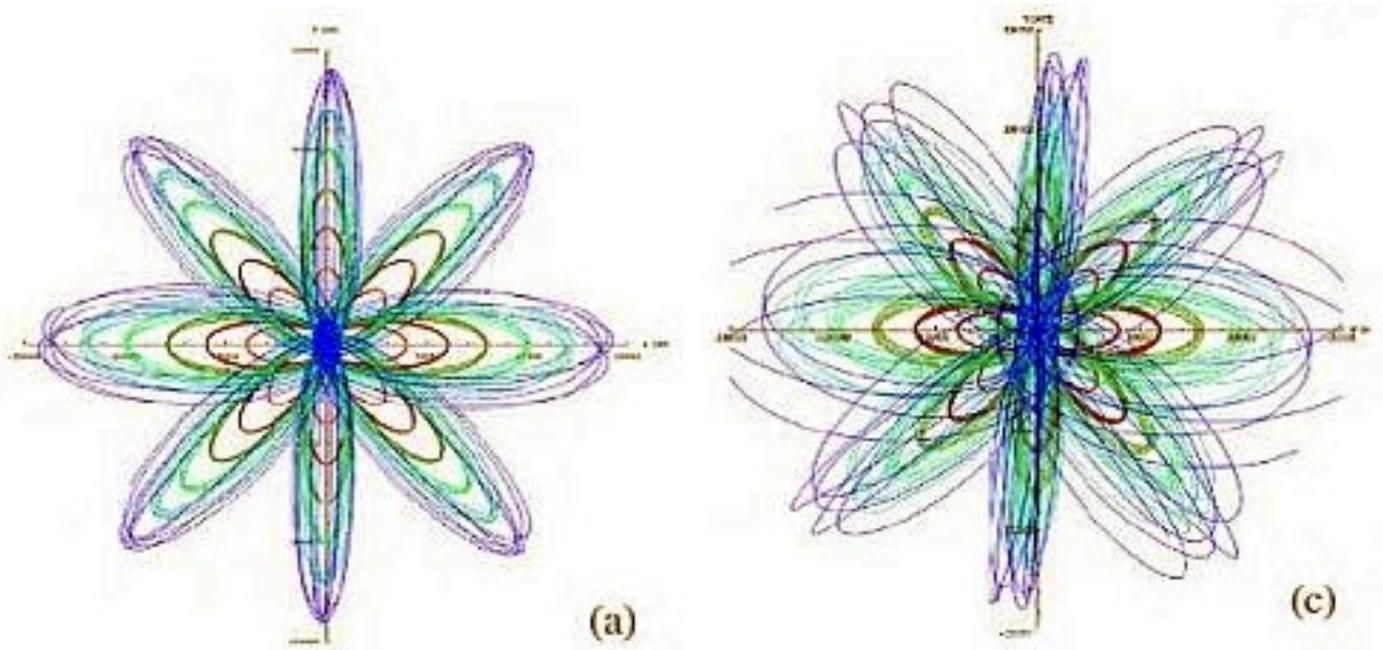


Figura 9: Deformazione delle orbite da parte della marea Galattica a 8 kpc (a sinistra) e 4 kpc (a destra) dal centro della Galassia. Al diminuire della distanza gli effetti della marea Galattica sono più vistosi. Le orbite esterne sono simili a quelle considerate da De Biasi et al. (2015) (Masi et al., 2003; Masi et al., 2009).

Nube di Oort e contributo dei Potenziali Galattici alla marea

La Nube di Oort è suddivisa (Figura 7B) nella *inner Oort Cloud* fra 1000-20000 UA e nella *outer Oort Cloud* fra 20000-50000 UA (Gonzalez, 2005). 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 a un afelio di circa 54000 UA e a un periodo di 4.4 Myr (Figura 10). A grandi distanze dal Sole, la forza di marea Galattica è una delle perturbazioni dominanti delle orbite delle comete assieme alle perturbazioni stellari e alle nubi molecolari giganti (GMC) che qui non tratteremo.

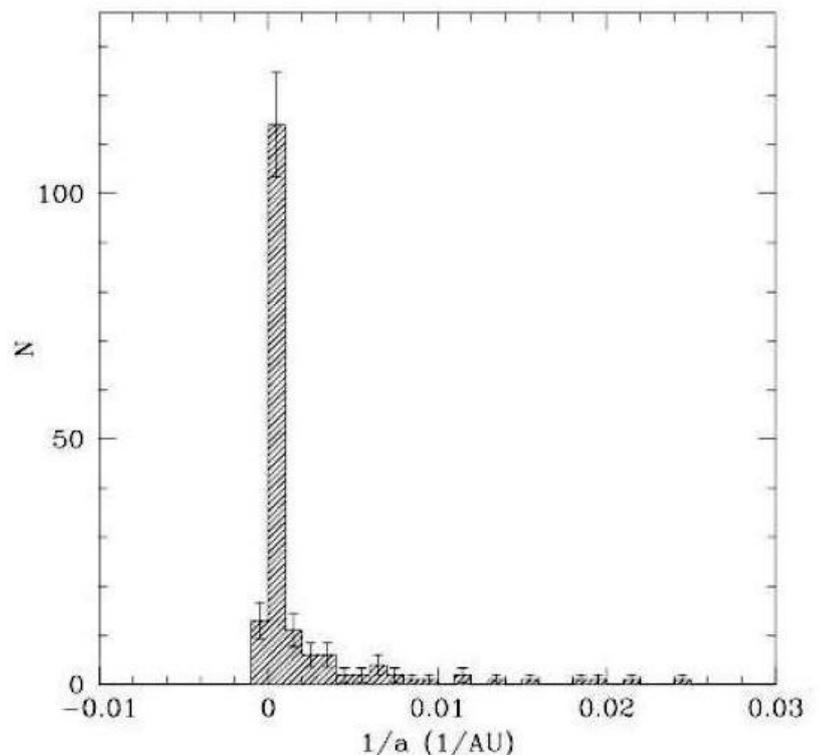


Figura 10: La distribuzione dell'inverso del semiasse maggiore (a) delle comete della Nube di Oort con l'evidente picco attorno a $3.7 \cdot 10^{-5} UA^{-1}$ corrispondente ad un afelio di circa 54000 UA (De Biasi, 2010).

Per studiare gli effetti mareali sulle comete della *Nube di Oort*, abbiamo considerato un corpo cometa come una particella di prova (per la marea Galattica) e scelto uno di questi appartenente al guscio esterno della *Nube di Oort*, dove la forza gravitazionale solare è inferiore e le perturbazioni Galattiche sono più evidenti.

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, così gli effetti mareali possono essere espressi mediante la somma dei potenziali del *bulge* $\phi(BG)$, del disco $\phi(D)$ e dell'alone di materia oscura $\phi(DH)$, le tre componenti dinamiche principali della Galassia:

$$\Phi_{gal} = \Phi(BG) + \Phi(D) + \Phi(DH) \quad (9)$$

In Figura 11 si può vedere la 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) . E' anche mostrato il sistema eliocentrico (x, y) per l'approssimazione di Hill usata per integrare le equazioni del moto.

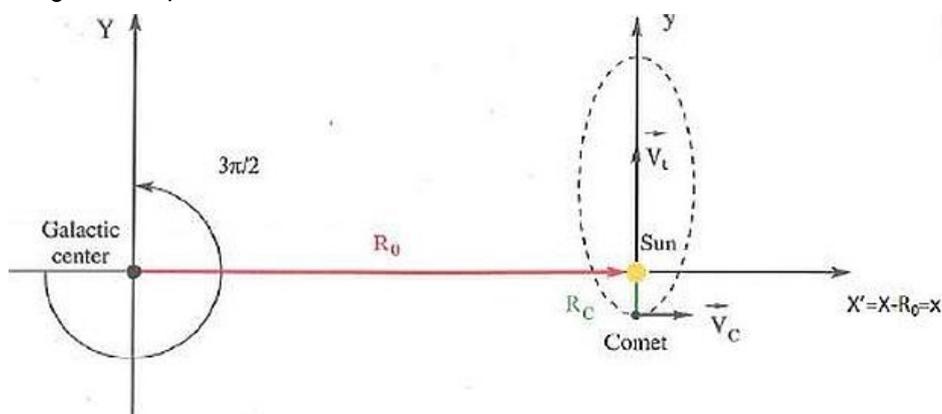


Figura 11: Viene mostrata la posizione iniziale per un'orbita di una cometa di prova con longitudine galattica $3\pi/2$ nel sistema di riferimento con l'origine sul centro Galattico (X, Y) .

Comete di prova	
<u>afelio</u> iniziale	140000 AU
<u>perielio</u> iniziale	2000 AU
<u>inclinazione</u> sul piano Galattico	<u>pari</u> a zero
<u>longitudine</u> Galattica	<u>copre</u> 360° con un passo di 15°
<u>periodo</u>	18 <u>Myr</u>
<u>direzione</u> di movimento	Sia diretta che retrograda
Integrazione orbita	100 <u>Myr</u>

Tabella 2: Dati delle comete di prova.

Potenziale del *bulge*: modello sferico di *Plummer* (G = costante gravitazionale; gli altri valori sono in Tabella 3):

$$\Phi_{BG}(r) = -\frac{GM_{BG}}{\sqrt{r^2 + r_c^2}} \quad (10)$$

Potenziale del disco: si usano tre dischi Miyamoto-Nagai (Miyamoto & Nagai, 1975) di diverse lunghezze di scala e masse.

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. I valori di a , b , M_n , dati in Tabella 3, sono secondo Flynn et al. (1996).

$$\Phi_{MN}(R, z) = -\sum_{n=1}^3 \frac{GM_n}{\sqrt{R^2 + [a_n + \sqrt{b^2 + z^2}]^2}} \quad (11)$$

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
	ρ_0	$0.01566 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$
	$V_{Tot}(R_{\odot})$	$196.003 \text{ km s}^{-1}$
	R_{vir}/r_H	20

Tabella 3: Dati per i potenziali delle componenti dinamiche principali della Galassia, velocità di rotazione totale alla distanza Solare e concentrazione dell'alone di DM.

Potenziale dell'alone di materia oscura (DM): scegliamo il profilo modificato pseudo-isotermo (MPI) (Spano et al., 2008; i dati sono in Tabella 3):

$$\Phi_{DH}^{MPI}(r) = -4\pi G \rho_0 r_H^2 \left(\frac{\ln \left(r/r_H + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{r_H}\right)^2} \right)}{r/r_H} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{r_H}\right)^2}} \right) \quad (12)$$

La modellazione della Galassia va testata verificando se il *trend* della velocità circolare totale ottenuta sia in accordo con quello osservato nell'ambiente Solare. È stato fatto il confronto con il modello della Galassia di Klypin et al. (2002), con risultati soddisfacenti. I contributi al *trend* di velocità circolare totale vs, r , dati dalle diverse componenti Galattiche, sono riportati in Figura 12 con la distribuzione di massa per ogni componente dinamica:

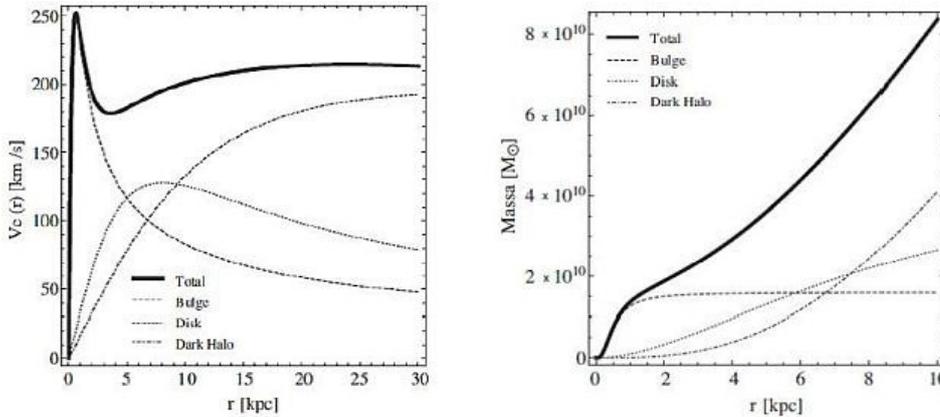


Figura 12: Contributi alla velocità circolare plottati contro r per le differenti componenti Galattiche (a sinistra). L'alone di DM ha un profilo MPI. Contributi alla distribuzione di massa plottati contro r per differenti componenti Galattiche (a destra). L'alone di DM ha profilo MPI.

Sistema co-rotante in approssimazione di Hill

L'approssimazione di Hill (Binney & Tremaine, 2008) (Figura 13) è adatta a trattare il formalismo del problema ristretto dei tre corpi (in questo caso: sistema Solare, Galassia, corpo cometario con massa molto inferiore a quella dei primi due) per il caso in cui la dimensione del sistema satellitare (per esempio Sistema Solare) è molto più piccola di quella del sistema ospite (per esempio la Galassia) dove possiamo assumere che la variazione del potenziale gravitazionale lungo le orbite delle comete sia molto *soft*, rendendo possibile la *distant-tide approximation*.

Si segue l'analisi del moto della cometa nel sistema co-rotante centrato sul Sole dove il piano x-y coincide con il piano orbitale stellare. In questo sistema l'equazione più rilevante è quella dell'accelerazione (secondo x) della particella, descritta da:

$$\ddot{x}(t) = 2\Omega_0\dot{y}(t) + [\Omega_0^2 - \Phi''(R_0)]x(t) - \frac{\partial\Phi_S}{\partial x} \quad (13)$$

dove il primo termine deriva dalla forza di Coriolis, l'ultimo dal contributo della forza di Coriolis, l'ultimo dal contributo della forza Solare, il secondo, in parentesi quadra, dalla variazione della forza centrifuga (termine Ω_0^2), non bilanciata dalla variazione della forza gravitazionale esercitata dal sistema ospite (Galassia) (termine $\Phi''(R_0)$) sulla particella cometaria con posizione: $x(t)$, $y(t)$. Si assume il moto circolare del Sole attorno al centro Galattico e si introducono le costanti di Oort A e B così che $\Omega_0 = A - B$ è la velocità angolare di rotazione Galattica misurata alla distanza del Sole $R = R_0$ dal centro Galattico.

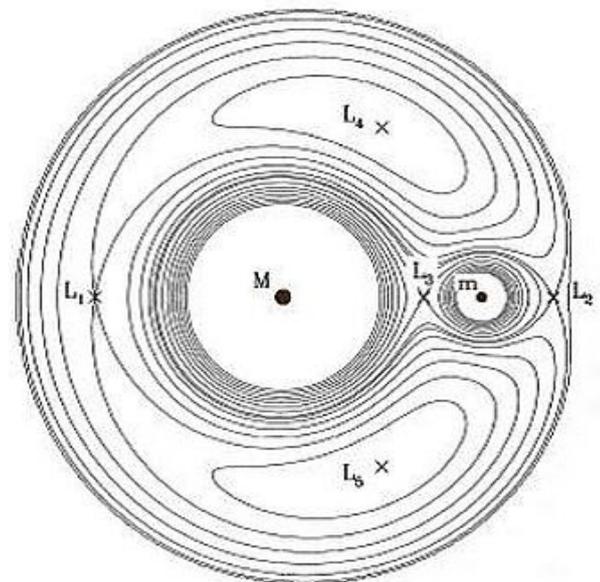


Figura 13: Il sistema co-rotante in approssimazione di Hill adatto al formalismo del problema ristretto dei tre corpi e quindi alla trattazione delle maree Galattiche sulle comete.

Grazie a tale assunzione la componente di marea x , fra parentesi quadra, viene tratta, con riferimento a ciascuna componente dinamica $i = \text{BG}, \text{D}, \text{DM}$ (*bulge*, disco, alone di materia oscura) nella formula seguente:

$$\Omega_{oi}^2 - \Phi_i'' = (-2\Omega_i\Omega_i'R)_{R_0} = 2\frac{v_{ci}^2}{R_0^2} \left(1 - \frac{d \ln v_{ci}}{d \ln R}\right)_{R_0} \quad (14)$$

La componente x di marea della Galassia risulta quindi essere dipendente dal contributo alla velocità circolare da parte di ogni componente Galattica e da quello dei relativi gradienti logaritmici. La componente y della marea della Galassia è invece, completamente compensata.

Variatione del perielio su comete della *Nube di Oort* e in sistemi analoghi

Riassumiamo brevemente i risultati del lavoro fatto da De Biasi et al. (2015). Non solo interessava l'evoluzione delle comete sotto l'effetto di una marea Galattica prodotta da un ambiente come quello attuale Solare, ma anche capire quel che avviene per un sistema cometario, analogo a quello della *Nube di Oort*, con una diversa collocazione sul piano Galattico.

Infatti il Sole (o la stella centrale nelle analoghe *nubi di Oort*) potrebbe aver subito una migrazione a causa dell'effetto dei bracci a spirale.

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 (Figura 14). A tale scopo, si sono studiati gli effetti della marea planare sulle orbite di comete di prova (Tabella 2) 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.

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 (Figura 11) con longitudine = $3\pi/2$, moto diretto, per le distanze $r = 4 \text{ kpc}$ e $r = 8 \text{ kpc}$, decomponendo la perturbazione di marea totale nei contributi delle singole componenti dinamiche.

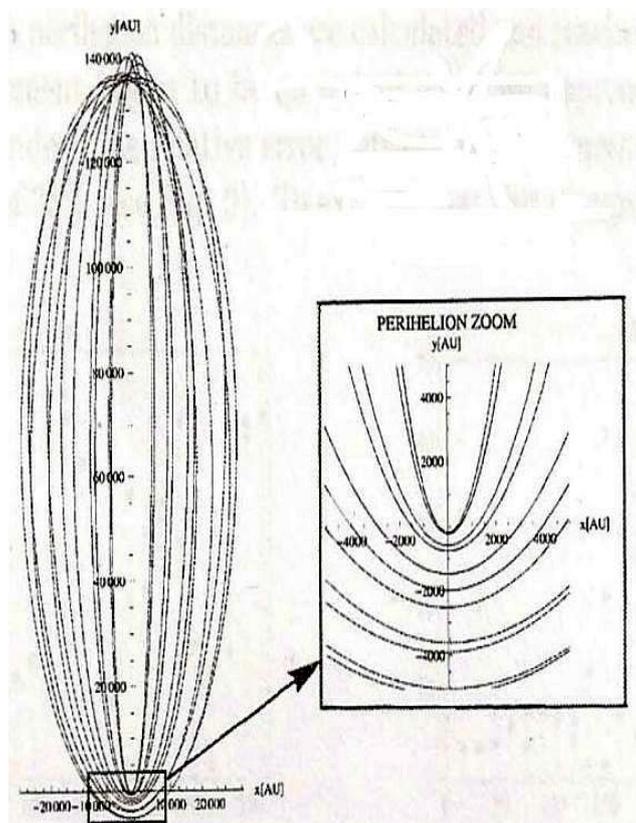


Figura 14: Zoom della zona del perielio per l'orbita della cometa a 8 kpc dal centro Galattico (approssimazione di Hill). Sono mostrati, di seguito (Figura 15) i diversi contributi delle componenti Galattiche alla variazione del perielio. Qui l'effetto maggiore è dovuto al disco.

I risultati ottenuti sono quasi completamente indipendente dal sistema di riferimento considerato (riportato qui per l'approssimazione di Hill) (Figure 15 e 16).

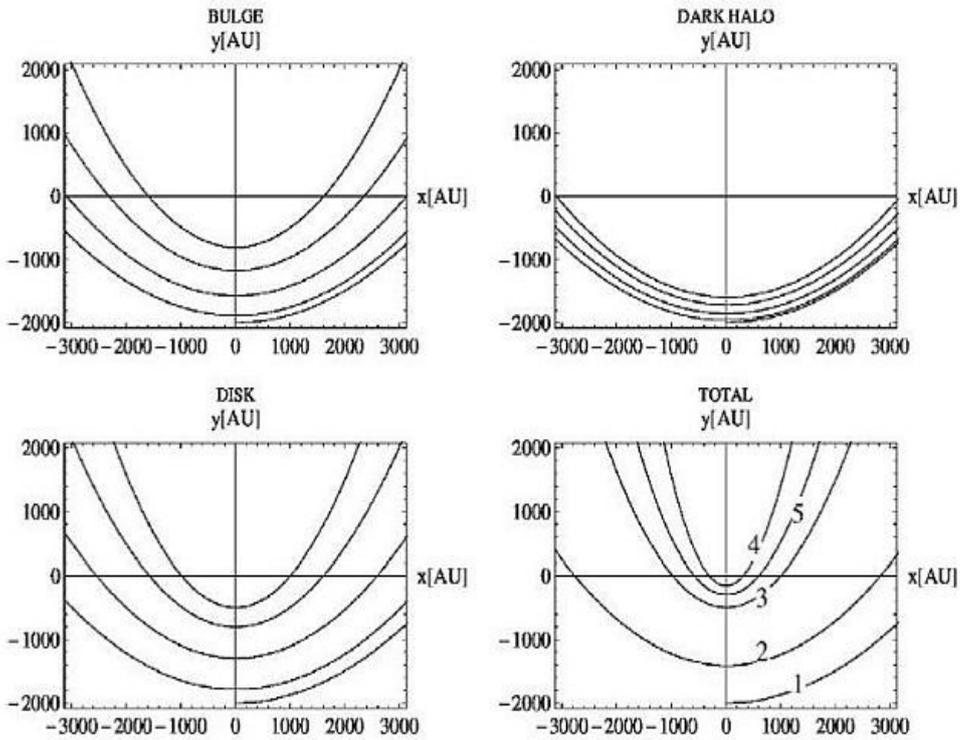


Figura 15: L'effetto del disco a 8 kpc è quello di diminuire la distanza del perielio del 50% in un tempo di integrazione di 1Gyr

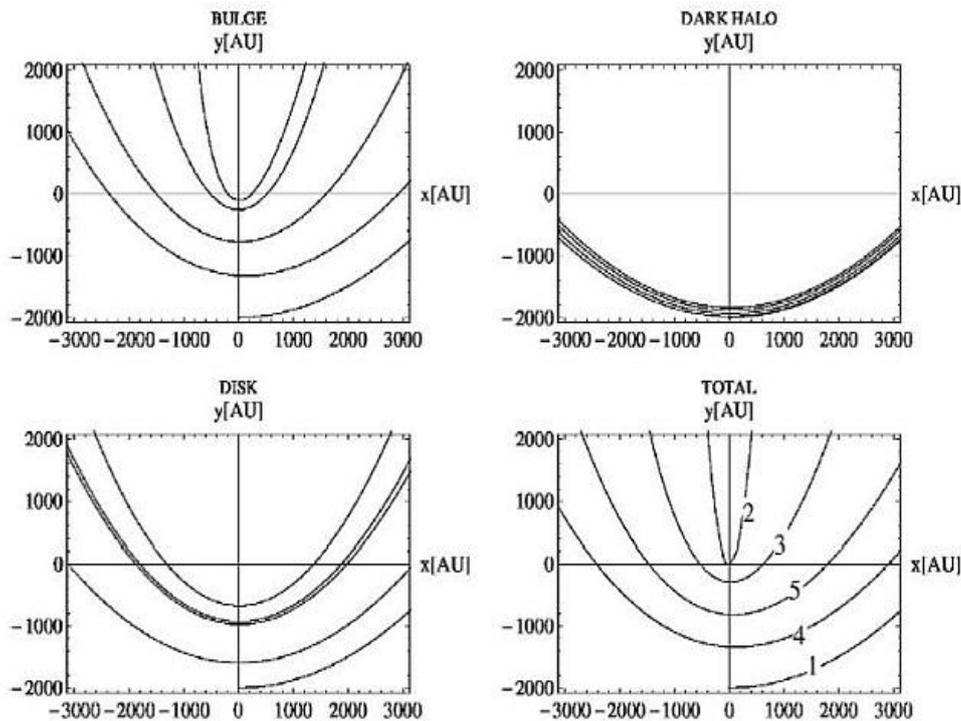


Figura 16: Come in Figura15 per una distanza di 4 kpc. L'effetto dominante è ora del bulge. La distanza del perielio diminuisce del 65% in un tempo di integrazione di 1Gyr.

Un nuovo vincolo per la Zona di Abitabilità Galattica

Il punto fondamentale, evidenziato dalla (14), consiste nel fatto che ogni componente dinamica della Galassia contribuisce alla marea sulle comete di un sistema analogo a quello di Oort, in misura del contributo che quella medesima componente fornisce alla velocità circolare della stella che si trova a reggere, nella posizione considerata sul disco Galattico, il sistema planetario a cui le comete appartengono e dal corrispondente gradiente logaritmico di tale velocità.

Si può prevedere dunque quale sarà la componente Galattica che produce l'effetto di marea dominante sulle analoghe *nubi di Oort*, semplicemente guardando la posizione della loro stella centrale sul *plot* di Figura 12 (a sinistra) tradotto mediante la (14).

Tale traduzione è evidenziata in Figura 17, dove vengono segnati gli intervalli entro cui la marea, dovuta ad una data componente dinamica, è dominante. I limiti di tali intervalli, sono indipendenti dalla massa della stella centrale, dalla longitudine dell'orbita cometaria e dal verso di percorrenza.



Figura 17: Effetti mareali delle componenti dinamiche della Galassia al variare della distanza dal centro della stella del sistema sul disco (Fecchio, 2016).

È interessante, poi, sovrapporre la distribuzione dei contributi di marea sul *plot* della GHZ dato da Lineweaver et al. (2004) (Figura 18), per capire i condizionamenti dovuti a questo nuovo vincolo che entra in gioco sulla GHZ in funzione della distanza dal centro Galattico.

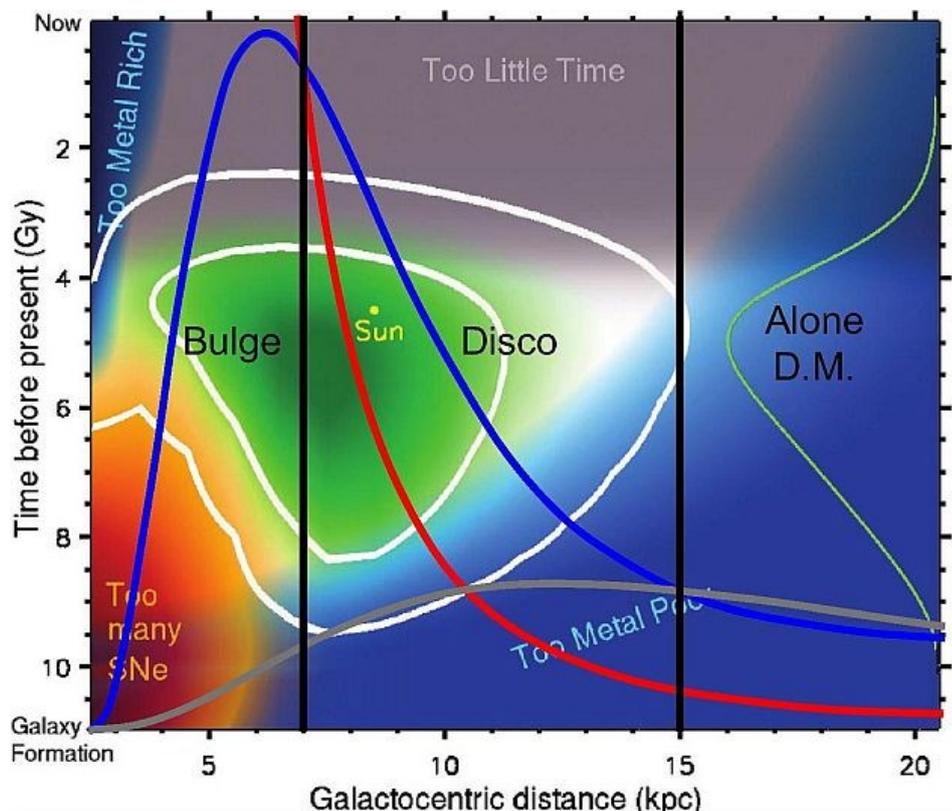


Figura 18: Sovrapposizione sulla GHZ di Lineweaver et al., (2004) dei contributi mareali delle componenti Galattiche principali (Fecchio, 2016).

Conclusioni sugli effetti mareali

Dallo studio di orbite cometarie, attorno ad una stella con la stessa massa del Sole, ma con posizioni diverse sul disco della Galassia si può concludere che:

1. il disco ha forte peso nella perturbazione mareale per la distanza Solare attuale (8 kpc);
2. le maree planari Galattiche diventano molto più efficaci nel perturbare le comete non appena la stella centrale si avvicina al centro Galattico;
3. a circa 7 kpc inizia a dominare la marea dovuta al *bulge*;
4. il valore del perielio e la forma delle orbite cometarie dipendono fortemente dalla distanza dal centro Galattico della stella che decide da quale componente dinamica dominante provenga la marea e della sua entità.
5. Nello *zoom* della Figura 17 (vedi Figura 19) è possibile valutare il fattore di amplificazione (13.47) della marea proveniente dal *bulge* (a 3 kpc) rispetto a quella proveniente dal disco alla distanza Solare corrente, così come il medesimo fattore di amplificazione (1.79) quando la distanza da 8 kpc cala a 6 kpc.



Figura 19: Zoom di Figura 17 per il confronto fra l'entità della marea dovuta al *bulge* (a 3 kpc e a 6 kpc) rispetto a quella dovuta al disco 8 kpc (Fecchio, 2016).

È 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* (o analoghe), generando iniezioni cometarie nella zona dei pianeti interni del Sistema Solare o extra-Solari, le quali potrebbero essere rilevanti per l'abitabilità.

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

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

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

Note

¹ Tutti gli elementi più pesanti dell'elio sono definiti come metalli. Ricordiamo che l'indice di metallicità è dato come il logaritmo del quoziente fra l'abbondanza di metalli (es. del ferro rispetto all'idrogeno) per un determinato oggetto *x* rispetto allo stesso rapporto per il Sole (abbondanza Solare), e si indica con:

$$[F_e/H]_x = \log \left(\frac{F_e}{H} \right)_x - \log \left(\frac{F_e}{H} \right)_{Sol}$$

la frazione in massa di metalli, si indica invece con *Z*.

² Nella Galassia, la metallicità è più alta al centro e più bassa all'esterno, questo perché verso il centro ci sono molte più stelle che, durante la loro evoluzione, grazie a vari meccanismi, ri-cedono più metalli processati nel loro interno, al mezzo interstellare.

Indicazioni Bibliografiche

- Barrow J., *I numeri dell'universo*, Ed. Oscarmondadori, 2003.
- Barrow J. D. and Tipler F. J., *Il principio antropico* (1986), Traduzione di Nicodemi F., Ed. Adelphi, 2007.
- Binney J. and Tremaine S., *Galactic Dynamics*, Second edition, Princeton Series in Astrophysics, 2008.
- 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 Biasi A., Secco L., Masi M. and Casotto S., *Galactic planar tides on the comets of Oort Cloud and analogs in different reference systems*, A&A, N. 574, A98, 2015.
- Fenner Y. and 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.
- Galletta G. and Sergi V., *Astrobiologia, le frontiere della vita*, Ed. Hoepli, 2005.
- Gehrels, N., Laird, C. M., Jackman, C. H., Cannizzo, J. K., Mattson, B. J., Chen, W., ApJ, 585, 1169, 2003
- Gonzalez G., Brownlee D. and 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. and McConnella S., *Model of Habitability Within the Milky Way Galaxy*, Astrobiology, N. 11, 855-873, 2011.
- Hoyle F., *Religions and the scientists*, SCM, London, 1959.
- Hoyle F., *Il principio antropico e il principio cosmologico*, a cura di Giacomini B., Ed. Spazio Libri Editori, 1991.
- Kaib N., Roskar R. and Quinn T., *Sedna and the Oort Cloud around a migrating Sun*, Icarus, N. 215, 491-507, 2011.
- Klypin A., Zhao H. and Somerville R., *CDM-based Models for the Milky Way and M31. I. Dynamical Models*, ApJ, N. 573, 597-613, 2002.
- 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. and Gibson B. K., *The Galactic Habitable Zone and the Age*, Le Scienze, N. 303, 59-62, 2004.
- Masi M., Secco L. and Vanzani V., *Dynamical effects of the Galaxy on the Oort's Cloud*, Mem. S.A.It, N. 74, 494-495, 2003.
- Masi M., Secco L. and Gonzalez G., *Effects of the planer galactic tides and stellar mass on comet cloud dynamics*, The Open Astronomy Journal, N. 2, 74-89, 2009.
- Miyamoto M. and Nagai R., *Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies*, Publications of the Astronomical Society of Japan, N. 27, 533-543, 1975.
- Mordasini C., Alibert Y. and Benz W., *Proc. Tenth Anniversary of 51 Peg-b: Status of and prospects for hot Jupiter studies*, Paris: Frontier Group, N. 84, 2006.
- Naab T. and Ostriker J. P., *A simple model for evolution of disc galaxies: the Milky Way*, MNRAS, N. 366, 899-917, 2006.

- 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. and Secco L., *Il principio Antropico fra dominio della Scienza e quello della filosofia, Giornale di Fisica, 37-4, Ed. Compositori, Bologna, 1996.*
- Pagel B. E. J., *Nucleosynthesis and Chemical evolution of Galaxy, Cambridge University Press, 1997.*
- Portinari L. and Chiosi C., *On star formation and chemical evolution in the Galactic disc, A&A, N. 350, 827-839, 1999.*
- Prantzos N., *On the Galactic Habitable Zone, Dec 2006*
- Prantzos N., *On the Galactic Habitable Zone, Space Science Reviews, N. 135, 313-322, 2008.*
- 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.*
- Secco L., in *Questions of Modern Cosmology: Galileo's Legacy, by D'Onofrio, Mauro; Burigana, Carlo, ISBN 978-3-642-00791-0. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 391-399, 2009.*
- Secco L., *Ci ha dato il cielo e le chiare stelle, Rapporto Scienza-Trascendenza alla ricerca dell'unità del Reale, Gabrielli Editori, 2017.*
- 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.*