

LICEO CANTONALE DI LUGANO 2

SAVOSA

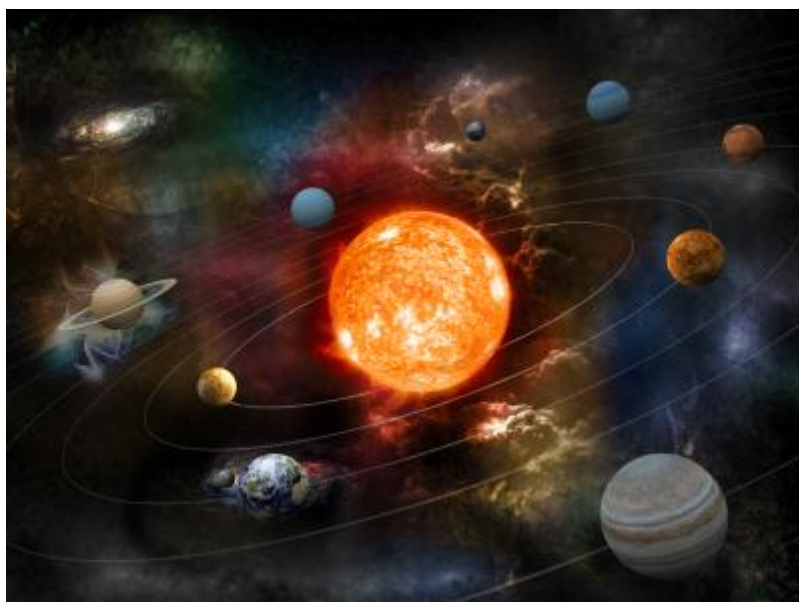
LAVORO DI MATURITA

**EVOLUZIONE DEL SISTEMA SOLARE: IL PIANETA GIOVE E
LE MIGRAZIONI PLANETARIE**

Simone Mathyer, Jonathan Foroni

2010-2012

Professore responsabile: Nicolas Cretton



INDICE

INTRODUZIONE

CAPITOLO 1 LE OSSERVAZIONI DELLA GALILEO E DEL PROBE

1.1 LA SONDA GALILEO

1.2 I RISULTATI: DALLE PRIME IMMAGINI ALL'ORBITA ATTORNO A GIOVE

1.3 LA SONDA PROBE

CAPITOLO 2 IL PIANETA GIOVE

2.1 LA STRUTTURA INTERNA DI GIOVE

2.2 CARATTERISTICHE STANDARD DEL PIANETA E FORMAZIONE DELL'ATMOSFERA

2.3 LA MAGNETOSFERA DI GIOVE E L'IDROGENO METALLICO

2.4 IL CLIMA CAOTICO DI GIOVE

2.5 IL PROBLEMA DELLA QUANTITA MAGGIORE DI CALORE EMESSA DAL PIANETA

2.6.1 LE ANALISI DEL PROBE DELLA GALILEO

2.6.2 L'IPOTESI DELL'ARRICCHIMENTO DELLA NEBULOSA DI GIOVE

2.8.1 LA FORMAZIONE DEL SISTEMA SOLARE

2.8.2 LA FORMAZIONE DI GIOVE

CAPITOLO 3 LE MIGRAZIONI PLANETARIE

3.1 IL MOTO DI ROTAZIONE

3.2 MOMENTO DELLA QUANTITA DI MOTO O MOMENTO ANGOLARE

3.3 IL MODELLO DI NIZZA

3.4 LA MIGRAZIONE PLANETARIA

3.5 ALCUNI MODELLI SEOMPLICI DI MIGRAZIONE PLANETARIA

3.6 IL NOSTRO CASO: LE ZONE ESTERNE DEL SISTEMA SOLARE

3.7 UN'ALTRA FONTE DI MIGRAZIONE: LA RISONANZA ORBITALE

3.8 IL FENOMENO DEL LATE HEAVY BOMBARDMENT (LHB)

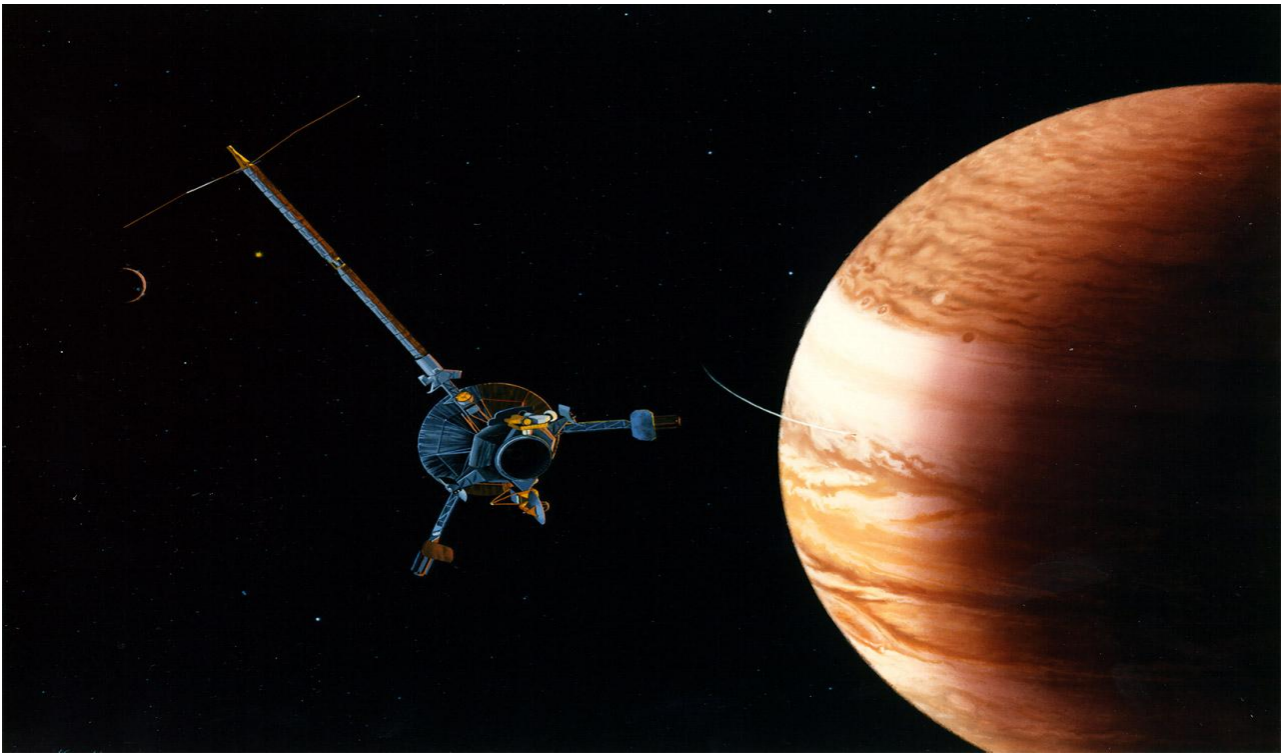
3.8.1 ORIGINE DEL CATACLISMA DEL LHB

CAPITOLO 4 IL CASO DI GIOVE: VARIE TEORIE A FAVORE DELLA MIGRAZIONE DEL GIGANTE GASSOSO

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

INTRODUZIONE



Il nostro lavoro di maturità vuole approfondire la tematica, relativamente recente, della migrazione planetaria.

Da cosa nasce questa ipotesi?

La teoria della migrazione planetaria acquisisce una grande validità grazie al fatto che le previsioni del modello standard, in particolare quella legata alla posizione in cui i vari tipi di pianeta (gigante gassoso del tipo di Giove, o roccioso, come la Terra) si formano, vengono confutate dai dati sperimentali.

Per citare un esempio noto, si pensi alla stella 51 Pegasi. Attorno ad essa orbita il pianeta 51 Pegasi b, scoperto nel 1995 (è il primo pianeta extrasolare identificato), il quale è fonte di dibattito nella comunità scientifica. Trattandosi infatti di un corpo del tipo di Giove, la sua posizione estremamente vicina alla sua stella, inferiore a quella di Mercurio nel nostro sistema Solare, implica la demolizione di tutte le convinzioni nell'ambito della conoscenza delle modalità secondo le quali i pianeti, ma anche il sistema Solare stesso, si formano.

Per evitare dispersioni, focalizzeremo la nostra attenzione sul pianeta Giove, il quale, in un primo momento verrà descritto in dettaglio. I vari capitoli e paragrafi inerenti il gigante gassoso saranno analizzati basandosi sulla missione GALILEO, fonte della maggior parte di quanto conosciamo (sperimentalmente) del pianeta.

In un secondo momento, abbandoneremo il pianeta Giove nel suo specifico per rivolgere la nostra attenzione alla sopracitata problematica delle migrazioni planetarie. Questo lavoro di maturità, essendo basato su ricerche trattate praticamente solo a partire dal 1995, non vuole porsi l'obiettivo di giungere a conclusioni certe, in quanto ciò non è possibile. Ciò che verrà esposto sarà invece tutta una serie di prove a favore o contrarie a questa teoria. Alcuni dei dati citati potranno quindi risultare contrastanti.

Perché Giove? Perché rispondendo alle domande “Dove si trovava Giove in passato? Perché si è spostato?” siamo in grado di affrontare numerosi temi fra i quali anche quello della migrazione planetaria. Esso rappresenta dunque un ottimo oggetto di studio.

CAPITOLO 1

LE OSSERVAZIONI DELLA GALILEO E DEL PROBE

1.1 LA SONDA GALILEO

La sonda GALILEO inizia la sua missione il 29 ottobre 1989, missione che sarebbe durata ben sei anni a che avrebbe portato numerose scoperte alla comunità scientifica riguardanti il pianeta Giove, nonché i quattro satelliti principali, Callisto, Ganimede, Europa e Io.

Grazie al notevole lavoro dello staff composto da 300 persone, la missione durerà ben 14 anni, non senza problemi; il guasto al grande ombrello parabolico, strumento di rilevazione principale, che sarà sostituito con l'uso di una piccola antenna, sarà senza dubbio ricordato come il maggiore disguido della missione. Occorre inoltre notare che il quantitativo enorme di radiazioni ha provocato non poche difficoltà al team sulla Terra, sia a livello di trasmissioni, sia a livello di guasti a varie parti della nave.

1.2 I RISULTATI: DALLE PRIME IMMAGINI ALL'ORBITA ATTORNO A GIOVE

I primi risultati rimarranno nella storia; alla fine dell'ottobre 1991 viene realizzata un'istantanea di Gaspra (cfr. immagine 1.1), alla fine di Agosto 1993 di Ida (cfr. 1.2) e nel Luglio del '94 ci ha permesso di assistere in diretta allo scontro fra la cometa SL9 con l'atmosfera di Giove (1.3).



1.2 Ida, Agosto 1993



1.3 Collisione cometa SL9 con Giove, Luglio 1993



1.1 Gaspra, ottobre 1991

La missione vera e propria comincia il 7 dicembre 1995, giorno in cui una parte della sonda madre, chiamata Probe, si è staccata dalla nave ed è penetrata nell'atmosfera del gigante. Grazie a tale evento, siamo stati in grado di determinare la struttura interna di Giove, o, per lo meno, abbiamo ricavato molte informazioni riguardanti la composizione chimica, come l'esistenza di un nucleo di idrogeno metallico che spiega la presenza di un campo magnetico così potente.

La missione si sarebbe dovuta concludere il giorno dell'11° orbita della sonda, caratterizzata dall'impressionante sorvolo ravvicinato pari a 1100 km di distanza del satellite Europa. Tuttavia ciò non accadde. I risultati ottenuti dalla sonda sono così importanti da portare la NASA a prolungare l'operazione. Il nuovo obiettivo sarebbe stato quello di analizzare meglio Europa al fine di accertare la presenza di un immenso oceano d'acqua sotto la superficie ghiacciata, presenza che sarebbe stata intuita a partire dalle condizioni climatiche del pianeta.

La nuova missione, denominata GEM (Galileo Europa Mission) inizia il 16 dicembre 1997 ed è



1.4 GALILEO termina la sua missione e si dirige verso la sua destinazione finale, Giove.

suddivisa, in realtà, in tre fasi: la prima dedicata ad Europa, la seconda a Giove e Callisto e la terza allo studio di Io e del suo ambiente. Intorno all'anno 2000, più precisamente in dicembre, la data del pensionamento sembrava ormai raggiunta e Galileo stava orbitando attorno ad Io. Proprio in quel periodo, tuttavia, la sonda Cassini stava avvicinandosi a Giove, al fine di realizzare il cosiddetto *gravity assist*, la fionda gravitazionale, ossia lo sfruttamento della gravità

del gigante gassoso al fine di ottenere una notevole spinta e dirigersi così su Saturno. Sarebbe stata un'esperienza unica potere osservare il pianeta da due sonde differenti, dunque, alla NASA, è stato deciso di prolungare la missione GALILEO di due ulteriori anni, denominata nuovamente in MILLENNIUM.

Dopo 7 anni di vita operativa, il propellente di GALILEO si è, però, inevitabilmente esaurito. Al fine quindi di evitare una caduta “casuale” su un satellite (Europa o Ganimede), alla NASA si decide di terminare la vita operativa della sonda all’interno dell’atmosfera di Giove. Il 15 gennaio 2003, durante la 35° orbita, viene utilizzato il rimanente propellente per dirigere GALILEO verso Giove, raggiungendo la distanza massima di vicinanza mai realizzata, pari a 26 milioni di km. Inizia qui la caduta verso il gigante. Nelle 20 ore precedenti all’impatto numerose preziose informazioni sono state raccolte, poi, nella notte del 21 Settembre 2003, la missione ha ufficialmente termine con la scomparsa della sonda all’interno di Giove (fig. 1.4).

Terminata questa piccola introduzione sulla sonda GALILEO e sul suo importantissimo ruolo nell’analisi del gigante gassoso, proseguiamo il nostro lavoro di ricerca. Grazie alla sonda, infatti, moltissime informazioni sono state raccolte, sia su Giove che sui suoi quattro satelliti principali. Se si ricorda quanto detto in precedenza, il 7 Dicembre 1995, una piccola capsula si è staccata dalla nave madre GALILEO e si è diretta verso il gigante. Era attrezzata con molti strumenti ed il suo obiettivo era quello di studiare nei minimi dettagli la composizione chimico-fisica del pianeta. Ciò che viene scoperto grazie a questa piccola sonda sarà indicato nel capitolo che parla di Giove in particolare (vedi CAPITOLO 2)

1.3 LA SONDA PROBE

Come verrà detto nel paragrafo 7.2 del CAPITOLO 2, molto di ciò che sappiamo sull'atmosfera di Giove lo dobbiamo al lavoro della sonda figlia Probe.

Il 7 Dicembre 1995 essa si stacca dalla nave madre e si dirige alla velocità di 170.000 km/h verso il pianeta Giove. Tale viaggio provoca l’aumento della sua temperatura che ha raggiunto il valore di circa 12.000° C, molto più della temperatura superficiale del sole. Dopo che l'atmosfera, o meglio, l'attrito con l'atmosfera ha rallentato la velocità di caduta fino a 3000km/h (la quale decresce ulteriormente grazie ad un paracadute), alla pressione di 0.3 atmosfere, la navicella è finalmente in grado di studiare nel dettaglio la composizione chimico-fisica del pianeta.

Il Probe è una struttura munita con tutto il necessario per ricavare informazioni sulla natura chimica di un pianeta. Era stata inviata nello spazio insieme alla sonda GALILEO, denominata anche orbiter. Dopo essere stata sganciata e aver stabilizzato la rotta, la missione può finalmente cominciare. È bene notare che la trasmissione dei dati ottenuti veniva mediata dalla nave madre, in quanto non possibile una trasmissione diretta fra Probe e la Terra.

Tralasciando i dettagli della sorte e del viaggio del Probe, riteniamo opportuno riferire le condizioni alle quali la navicella è stata sottoposta durante la fase finale dell'operazione: dopo sei ore di orbita, alla temperatura di 1680° e alla pressione di 2000 atmosfere, il telaio di titanio ha cominciato a fondere. Due ore più tardi i resti della sonda erano ormai vaporizzati.

CAPITOLO 2

IL PIANETA GIOVE

2.1 LA STRUTTURA INTERNA DI GIOVE

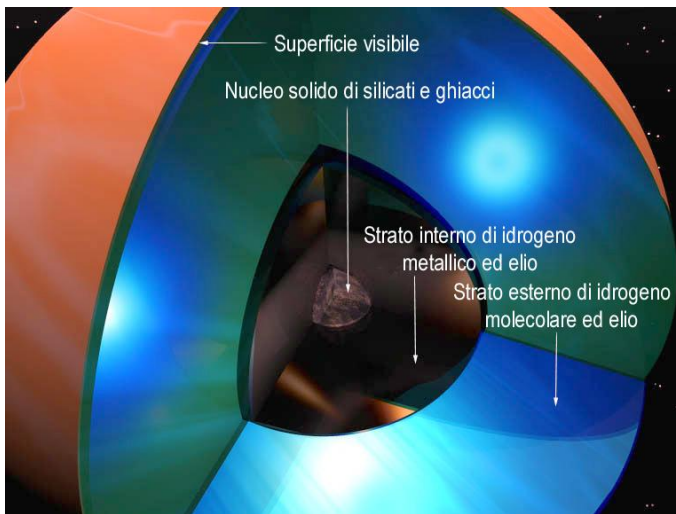
Grazie alla conoscenza della massa e della composizione chimica di Giove, siamo in grado di eseguire delle assunzioni circa la parte alla quale, praticamente, non abbiamo accesso: la struttura interna.

Il nucleo del pianeta possiede un diametro di 12000 km, di poco più piccolo rispetto a quello terrestre, ed è composto essenzialmente da elementi simili a quelli del nostro pianeta, ovvero Ferro e silicati. La temperatura interna raggiunge i 30.000° gradi, mentre la pressione è compresa fra 50 e 5 milioni di atmosfere.

Attorno al nocciolo di Giove è presente un guscio composto prevalentemente da Elio liquido di circa 3000km. Il motivo di tale stato di aggregazione è già stato appurato al punto 1.3 ed è legato al comportamento dei gas sottoposti ad altissime pressioni. Dopodiché segue uno strato di idrogeno, dello spessore di 30.000 km, il quale subisce una pressione di circa 3 milioni di atmosfere. Ciò comporta la sua presenza in fase metallica. Il guscio seguente è anch'esso composto da idrogeno, ma in fase liquida, poiché le condizioni ($T = 2000^\circ$ e pressione sono via via minori, a misura in cui ci si avvicina alla superficie) non permettono la sua esistenza in uno stato metallico. I due elementi principali che costituiscono Giove diventano gassosi solamente negli ultimi 1500km e costituiscono l'atmosfera esterna, parte del pianeta in cui la temperatura si comporta in modo bizzarro: decresce progressivamente sino a -165°C per poi aumentare quando uno strato composto da smog idrocarburico inizia ad incontrare la radiazione solare. Questa zona di transizione, la quale si trova ad una pressione di 0.1 Atm, costituisce un “confine” fra stratosfera e troposfera, ubicate rispettivamente sopra e sotto.

La seconda delle due aree è quella in cui avvengono i fenomeni meteorologici e qui le condizioni climatiche permettono all'idrogeno di formare composti con l'azoto (NH_3), con lo zolfo (H_2S) e pure con l'ossigeno (H_2O).

Segue ora la suddivisione della troposfera gioviana. Si ritiene che esistano tre strati nuvolosi. Il primo, a 40 km sotto la stratosfera è composto da NH_3 , ha una temperatura di -123°C e una



pressione pari a 0.5 Atm. Il secondo, 30 km più sotto segue uno strato di solfidrato ammonico (NH_4SH), caratterizzato da una temperatura di -75°C e da una pressione di 2-4 Atm. Infine, vi è l'ultimo strato, a 40km ancora più in profondità. Esso possiede una temperatura pari a 25°C e una pressione di 5-7 Atm. Queste condizioni, teoricamente, permetterebbero la presenza di un composto molto rilevante, dal punto di vista

astrobiologico, l'acqua.

Ovviamente, per stabilire ciò, sarebbe necessaria l'analisi pratica di questo strato dell'atmosfera. In questo senso è risultato particolarmente utile l'impatto (fra l'altro documentato dalla sonda GALILEO) della cometa SL9 con Giove nel Luglio del 1994. L'impatto, infatti, distrusse l'oggetto, i cui frammenti si conficcarono a differenti profondità e, forse, raggiungendo pure lo strato di NH_4HS . Ciononostante, non si è stati in grado di determinare se l'acqua rilevata a partire da grandi impatti o piccoli fosse effettivamente proveniente dal pianeta o meno. Le rilevazioni di una piccola quantità d'acqua è stata effettuata, però, con lo spettrometro. Non è dunque stata particolarmente affidabile. In questo senso le analisi del Probe della GALILEO è risultata molto utile, eliminando alcune domande che gli scienziati si ponevano da tempo, ma introducendone pure di nuove.

2.2 CARATTERISTICHE STANDARD DEL PIANETA E FORMAZIONE DELL'ATMOSFERA

Nella parte alta dell'atmosfera, il Probe ha ritrovato due strati, i quali erano stati previsti, di ammoniaca e di solfidrato ammonico. Tuttavia non è stata rilevata la presenza di acqua sottoforma di vapore.

Prima di dedicarci, però, a quanto è stato rilevato “sul campo” è opportuno fare qualche riferimento a quanto già si conosce e si conosceva di Giove. Esso è il quinto pianeta del sistema solare, possiede ben 63 satelliti naturali ed è caratterizzato dalla densità di 1.34g/cm^3 (per confronto, la Terra è a

5.5). È costituito prevalentemente di gas, costituzione che ricorda la composizione di una stella. Più nel dettaglio, la maggior parte del gigante è costituito da H_2 , seguito da He. Il resto è formato da una piccola quantità di elementi pesanti, come l'Azoto o l'Ossigeno.

Il Diametro misurato all'equatore è pari a circa 133.600 km e questo implica che il volume del pianeta, paragonato a quello della Terra (che possiede un diametro di circa 12.800 km) è di 1317 volte superiore, mentre la massa ben 318 volte. Come già detto, la massa di Giove supera di molto la somma di tutti gli altri pianeti messi insieme, il che è notevole, ma non ancora sufficiente ad innescare le reazioni nucleari di fusione dell'idrogeno e dell'elio tipiche di una stella. Vediamo ora come un astro nasce, per meglio capire le ragioni che hanno impedito al pianeta di divenire una stella. Queste ultime si formano grazie alla compressione di gas verso un centro ipotetico, dovuto all'enorme massa e alla conseguente forza di gravità. Giunti ad un certo punto della detta compressione, la temperatura del gas risulta così elevata da innescare reazioni di fusione all'interno del proto nucleo stellare, le quali sono alla base della luce emessa che noi percepiamo. Per ritornare però al discorso centrale, il paragone con una stella è lampante, in quanto le composizioni chimiche sono molto simili. Ciò che ha, però, impedito al nostro soggetto di studio di iniziare anch'esso le reazioni di fusione è stata il mancato raggiungimento di una massa adeguata, detta critica, pari a 80 volte la sua massa. Se invece questa premessa fosse stata raggiunta, adesso il nostro sistema solare sarebbe caratterizzato da una struttura stellare binaria, in rotazione attorno ad un centro di gravità. Certo, questo avrebbe potuto significare che la vita sulla Terra, non si sarebbe forse potuta sviluppare, ma pure che altri pianeti si sarebbero invece trovati nella famosa zona abitabile, ossia nell'area attorno ad un astro in cui le condizioni fisico- chimiche permettono il mantenimento dell'acqua allo stato liquido.

Secondo degli studi, la quantità di elio sul pianeta non è mai cambiata. Questo rende Giove un pianeta molto interessante, in quanto permetterebbe di risalire alla composizione originaria della Nube Molecolare Gigante, di cui si parla nello specifico al paragrafo §2.8.1 del CAPITOLO 2.

Un fatto curioso è che, stando ai risultati delle misure all'infrarosso, il calore rilasciato dal pianeta è di 4 volte superiore a quello inviatogli dal Sole. Ancora oggi questo fenomeno è frutto di discussioni e riguardo a ciò verrà scritto in seguito. Una delle spiegazioni più plausibili è che si tratti di calore cosiddetto primordiale che viene smaltito ancora oggi, o il risultato di una contrazione gravitazionale.

2.3 LA MAGNETOSFERA DI GIOVE E L'IDROGENO METALLICO

Come abbiamo già anticipato durante l'accenno alla sonda GALIELO, il gigante possiede un intenso campo magnetico (circa 10 volte quello terrestre), che come abbiamo visto, è legato alla presenza di un nucleo di idrogeno così compresso da perdere le caratteristiche tipiche di un gas e di assumere quelle di un metallo. Questo è molto importante, in quanto l'idea che sta dietro alla magnetosfera di Giove, ossia l'idrogeno metallizzato, non risulta evidente e la presenza di un altro tipo di sostanza più pesante che fosse alla causa di tale fenomeno non era plausibile, poiché non adatta ai dati in possesso degli scienziati.

È risaputo che se un gas viene sottoposto a pressione elevate è soggetto a cambiamenti di fase, ma nel caso dell'idrogeno, se detta pressione supera le 3 milioni di atmosfere, cosa che accade all'interno di Giove, esso inizia a comportarsi proprio come un metallo.

A questo punto si potrebbe effettuare una divagazione in termini storici ed analizzare gli esperimenti, le ricerche e i personaggi che hanno contribuito a dar validità alla teoria dell'idrogeno metallizzato, ma non è rilevante dal punto di vista del nostro lavoro. Ci limitiamo a citare Bill Nellis, un fisico che lavora presso il Lawrence Livermore National Laboratory, il quale si dedica allo studio del comportamento dei materiali sottoposti ad elevatissime pressioni, i quali ottenne i primi risultati in direzione dell'idrogeno già prima che il Probe entrasse nelle nuvole di Giove.

Ma com'è possibile che un gas si comporti allo stesso modo di un metallo? Cominciamo con il ritenere che un metallo non è altro, in sintesi, che un aggregato di nuclei immersi in un mare di elettroni, i quali finiscono per perdere il loro nucleo di appartenenza per divenire in seguito una specie di “fluido”, caratterizzato dalla possibilità di muoversi subendo poco attrito con l'ambiente circostante. Ciò sta alla base della conducibilità elettrica. Nel caso di un gas, invece, come l'idrogeno, è bene immaginare l'atomo come una sfera autonoma e distaccata dalle altre, avente un nucleo composto da un protone e un'orbita in cui risiede un elettrone. Se sottoposti a qualche tipo di azione, due orbitali si possono fondere insieme, risultando in una molecola (H_2) nella quale gli elettroni, ora due, circolano liberamente.

Cosa succede, però, quando questo atomo è soggetto a una pressione davvero elevata, come quella presente su Giove? Bene, a questo punto appare ovvio pensare che se soggetto ad una certa pressione esterna, due orbitali tenderanno ad avvicinarsi ed pure ovvio pensare che, prima o poi, si giungerà ad una pressione tale per cui tutti gli orbitali saranno entrati a far parte di un unico, grande insieme, in cui gli elettroni scorrono liberamente, proprio come in un metallo.

Nellis afferma che il nucleo di Giove debba essere altamente conduttivo e ciò giustifica

perfettamente la presenza di una magnetosfera così potente, nonché alcuni fenomeni come le aurore boreali, sulle quali sono state effettuate molte osservazioni.

2.6 IL PROBLEMA DELLA QUANTITÀ MAGGIORE DI CALORE EMESSA DAL PIANETA

Giove emette una quantità di energia due volte e mezzo superiore a quanta ne riceve dal Sole.

Questo fenomeno è spiegabile dal fatto che, probabilmente, esso possiede una qualche fonte interna di energia.

Pare che una lenta contrazione gravitazionale alla quale Giove è soggetto provochi la produzione di energia radiattiva (trasformata in questo tipo da quella potenziale gravitazionale). La zona del nucleo raggiunge, a causa di ciò, una temperatura di circa 20.000 Kelvin.

Non è sufficiente, tuttavia, a portare ad un susseguirsi di reazioni di fusione nucleare tipico delle stelle.

Questa tematica, sebbene interessante, non è oggetto della ricerca, ma l'abbiamo elencata a scopo informativo.

2.6.1 LE ANALISI DEL PROBE DELLA GALILEO



La ricostruzione del Probe della GALILEO che entra nell'atmosfera gioviana.

Il 7 Dicembre 1996 il Probe scende nell'atmosfera gioviana ed effettua un'analisi dettagliata di tutti i vari costituenti, sia i maggiori (elio e idrogeno) sia i minori (O, C, N, S). Inoltre sono state condotte osservazioni sugli altri gas nobili presenti, i quali, essendo stabili e non incorrendo nel decadimento radioattivo, sarebbero rimasti stabili nel corso del tempo, aiutando quindi a capire quale fosse la composizione del residuo della nube molecolare gigante che diede vita a Giove.

Gli strumenti utilizzati per questa operazione furono essenzialmente due: uno spettrometro di massa (NMS, Neutral Mass Spectrometer) e un misuratore di elio (HAD,

Helium Abundance Detector).

Entrato in contatto con l'atmosfera, il primo strumento, grazie alla rottura di due tappi in ceramica a causa delle condizioni, inizia ad analizzare l'area circostante. Illustriamo ora il funzionamento del NMS. Una volta ionizzato le particelle circostanti, esse venivano fatte transitare all'interno di un campo magnetico. In seguito, a dipendenza della loro massa, si dirigevano a destinazioni diverse. Ciò ha permesso di determinare la presenza di elementi aventi una massa compresa fra 1 e 150. La sensibilità dello strumento era tale da essere in grado di determinare pure l'isotopo di una particella.

L'HAD, è entrato, invece, in funzione alla pressione di 2.5 Atm. Il funzionamento può essere riassunto come segue: viene misurato l'indice di rifrazione della miscela di gas che viene presa in

esame, il quale varia a seconda della quantità di He.

Il risultato delle analisi fu il seguente: la percentuale in massa del gas è risultato pari a 23.8%, e non, come predetto, a 28%. Tale differenza è spiegato con l'ipotesi che una parte dell'elio si sia sedimentato¹ all'interno di Giove e tale ipotesi è sostenuta dal fatto che ciò giustificerebbe l'eccesso di energia che viene emesso dal pianeta, problematica che viene affrontata il CAPITOLO. Altro valore risultato inferiore (e di ben cinque volte) rispetto a quanto aspettato è quello del Neon. La spiegazione, in questo caso, è da riferirsi alla precedente; questo gas nobile si scoglie facilmente nell'elio, dunque può essere stata trascinata nelle profondità del pianeta con esso.

Il fatto, al contrario, che ha suscitato interesse è quello inerente alla quantità eccessiva di altri gas, come Argo, Krypton e Xenon, in riferimento a quella solare. Come è stato possibile che la nebulosa che ha originato Giove si sia arricchita in questo modo di tali elementi?

2.6.2 L'IPOTESI DELL'ARRICCHIMENTO DELLA NEBULOSA DI GIOVE

Con quanto detto precedentemente possiamo ora passare all'argomento centrale di questa nostra ricerca. Ci eravamo fermati al punto in cui le analisi della composizione chimica dell'atmosfera gioviana ha fornito dei dati che non sembrano essere spiegabili. La concentrazione di certi gas nobili riscontrata sul pianeta non sembra essere compatibile con quella che ci si aspetterebbe da un pianeta formato da una nebulosa che si trova nella posizione dell'odierno Giove. Una possibilità è che il gigante gassoso si sia formato in una regione del sistema solare in cui vi sia una temperatura molto bassa, più precisamente, attorno ai -240°C , ossia nella fascia di Kuiper, di cui si tratta nel capitolo INSERIRE CAPITOLO, e che poi sia migrato nella posizione attuale. Questa teoria è divenuta sempre più plausibile grazie anche ai numerosi pianeti extra solari della dimensione di Giove o maggiore (e quindi che condividono peculiarità chimico-fisiche simili a quelle del nostro soggetto di studio) ritrovati in posizione troppo vicine alla propria stella. Tale posizione non permetterebbe infatti al pianeta di rimanere inalterato e di continuare ad esistere in forma gassosa a causa dell'eccessiva quantità di energia al quale verrebbe sottoposto. Una domanda, dunque, sorge spontanea: se questi pianeti non possono trovarsi in questa posizione senza "evaporare" per molto tempo, com'è possibile il fatto che da osservazioni risulta invece proprio il contrario? La risposta, secondo molti scienziati, è, come già detto precedentemente, la migrazione planetaria.

¹**Sedimentazione:** in fisica è un processo per cui particelle sospese in un fluido si accumulano a causa dell'esistenza di un campo di forze. Questo può essere provocato dalla forza di gravità (*sedimentazione per gravità* o *decantazione*), dalla forza centrifuga (*sedimentazione centrifuga*), o dalla forza elettrica (elettrodecantazione, elettroforesi, dielettroforesi).

Prima di dedicarci, però, ai particolari di questo tema, vogliamo concentrarci sulle modalità secondo le quali un sistema solare, per comodità useremo il nostro quando saranno necessari riferimenti, si forma. Dopodiché, ci focalizzeremo sulla nascita di un gigante gassoso del tipo gioviano.

2.8.1 LA FORMAZIONE DEL SISTEMA SOLARE



Affinché sia possibile spiegare come il pianeta Giove si sia formato, è necessario prima accennare alla modalità con la quale l'intero sistema solare, o meglio un sistema solare si forma generalmente. È bene però notare che quanto verrà detto in seguito appartiene alla teoria affermata prima della scoperta di

pianeti extra solari che non rispettano la posizione o le caratteristiche che invece ci si aspetterebbero secondo la suddetta teoria della formazione di un sistema solare.

Detto ciò, introduciamo quindi i brevi passi che separano la cosiddetta nube molecolare gigante (lo stadio iniziale di una stella, centro attorno al quale orbiteranno i futuri pianetesimali e pianeti) e il sistema solare come lo conosciamo. Per comodità, ogni esempio sarà riferito al nostro sistema solare.

In questa fase iniziale troviamo la nube molecolare gigante (NMG), caratterizzata da una bassissima temperatura, circa 10K e da una massa enorme, pari ad un intervallo compreso fra 100.000 e 10^6 volte la massa del sole, che viene disturbata da un evento vicino, come l'esplosione di una supernova, uscendo quindi dal suo stato di quiete ed iniziando la compressione verso un centro. Come è risaputo, quando un gas viene compresso, le interazioni fra le particelle aumentano, provocando dei continui scontri e scambi di energia cinetica, i quali provocheranno un vertiginoso aumento della temperatura della NMG. Nel frattempo, mentre il centro collassa su sé stesso, la polvere spaziale che lo circonda resta in rotazione attorno ad esso. Questo stato di moto della polvere è importante, in quanto permette ad essa di non ricadere verso la proto stella in formazione (disperdendo così la propria energia) di raffreddarsi, e di formare un disco proto planetario.

Abbandoniamo ora la nostra stella in formazione e porgiamo la nostra attenzione al disco in rotazione. Raffreddatasi a sufficienza, la polvere comincia a solidificarsi e a formare del materiale metallico e roccioso, a livello, per ora, particellare. Queste particelle, con il passare del tempo, collideranno fra loro e formeranno delle strutture più ampie. Tutto ciò prosegue finché non si sviluppano dei piccoli asteroidi. Man mano che la loro dimensione aumenta, anche la loro forza di gravità cresce, incrementando la velocità della crescita dello stesso asteroide. La grandezza massima raggiunta dipende dalla distanza dalla stella e dalla densità e composizione della NMG, o almeno così si riteneva quando fu sviluppata questa teoria. Appare ovvio, infatti, che i pianeti del tipo di Giove, ossia i giganti gassosi, si trovino in una posizione ben distante dalla stella, in quanto una vicinanza eccessiva provocherebbe la scomparsa dell'atmosfera, mentre i pianeti del tipo roccioso o metallico potrebbero benissimo trovarsi ad una minor distanza, vedi, ad esempio, Mercurio². Sta di fatto che, invece, il primo pianeta scoperto oltre il sistema solare, 51 Pegasi b, non rispetta la teoria della formazione del sistema solare. Questo corpo celeste è caratterizzato da una massa pari a circa $0,472 \pm 0,039$ volte la massa di Giove; è per cui un gigante gassoso anch'esso, ma, a differenza del nostro soggetto di studio, rientra nella categoria dei pianeti gioviani caldi, che orbitano quindi ad una distanza inferiore a 0.05 UA, distanza che non permetterebbe a tale corpo di sopravvivere a lungo senza venire completamente dissolto dall'enorme quantità di energia irradiata dall'astro. Cosa è successo, dunque?

Questa scoperta ha provocato la necessità di una revisione delle teorie da parte degli astronomi e ha alimentato la possibilità che i pianeti, durante la fase di accrescimento, ma anche in seguito, possano migrare, ossia spostarsi su orbite più interne o esterne.

² MERCURIO: è il primo pianeta del sistema solare in ordine di vicinanza con il sole.

2.8.2 LA FORMAZIONE DI GIOVE

I pianeti giganti (come Giove) sono qualitativamente differenti da quelli del tipo della Terra poiché possiedono significativi strati gassosi attorno ad essi, come ormai dovrebbe essere chiaro. Nel sistema solare, i giganti gassosi sono composti prevalentemente da H e da He.

Come si è visto per il caso del quinto pianeta, in essi sono incorporati pure numerosi elementi più pesanti (questo, ricordiamo è uno dei motivi che porta a dubitare della formazione di Giove nella posizione in cui si trova tutt'ora). I giganti gassosi, invece, possiedono meno, ma comunque in quantità significativa, strati gassosi. L'esistenza di questi ultimi necessita una condizione iniziale di critica importanza: si devono formare in tempi relativamente brevi, prima che il gas o il disco proto planetario venga dissipati. Osservazioni di dischi proto planetari orbitanti attorno a ammassi di stelle giovani attribuiscono il periodo di vita dei detti dischi a 3 – 10 milioni di anni.

La teoria standard della formazione di giganti di gas, *core accretion*, è un processo composto da due fasi delle quali la prima somiglia molto a quella dei pianeti del tipo terrestre – roccioso. Un nucleo con una massa dell'ordine di 10 masse terrestri si forma nel disco grazie a numerose collisioni fra i planetesimali. Tipicamente, non c'è abbastanza materiale solido per formare corpi così massicci nella regione interna di un disco proto planetario. Su orbite più larghe, invece, oltre la *snow line* [rif: si riferisce ad una particolare distanza in una NMB dalla proto stella centrale alla quale è abbastanza freddo perché le componenti dell'idrogeno come acqua, ammoniaca e metano possano condensare in granuli di ghiaccio.], la temperatura è così bassa da permettere persino al materiale roccioso di condensarsi. Questo materiale solido extra, unito alla gravità ridotta della proto stella centrale, permette ai grandi nuclei solidi di formarsi in regioni esterne del disco. Inizialmente, il nucleo è circondato da un'atmosfera caratterizzata da una massa relativamente bassa, che si accresce costantemente, sempre più massiccia mentre che il gas si raffredda e si contrae verso il nucleo. Infine il nucleo eccede una cosiddetta “*critical core mass*”, oltre alla quale uno sviluppo idrostatico non può essere mantenuto. Determinare una scala di tempo precisa in riferimento al raggiungimento della massa critica è molto difficile, in parte a causa del fatto che il tasso secondo il quale il gas si raffredda dipende da quanto trasparente lo strato gassoso sia. La trasparenza varia in modo radicale in funzione della quantità di polvere presente, che è estremamente variabile. Una volta che la massa critica è raggiunta e superata, il gas comincia a fluire verso il nucleo, in principio lentamente, ma poi sempre più velocemente, intanto che il pianeta diviene più massiccio. La crescita si ferma quando l'alimentazione di gas è terminata, sia perché il pianeta apre un *gap* (varco) nel disco sia perché il disco di gas si dissipa.

Una seconda teoria sulla formazione dei giganti gassosi è chiamata *gravitational disk instability*, che rimane comunque sotto studio. Un disco di gas a cui è attribuita una densità Σ , velocità di suono [ref] c_s e una velocità angolare Ω è detto essere gravitazionalmente instabile se il parametro di Toomre, Q , definito come

$$Q = c_s \Omega / \pi G \Sigma,$$

è minore di 1.

Se, in più, il disco è in grado di raffreddarsi in un periodo di tempo corrispondente ad un periodo orbitale, allora l'instabilità porta ad una frammentazione del disco. Nei dischi protoplanetari, gli oggetti nei quali il detto sopraccitato disco si è diviso avrebbero masse comparabili a quelle di giganti gassosi. Un fattore chiave di questo meccanismo per formare pianeti del tipo di Giove è che funziona molto velocemente. A differenza dell'accrescimento del nucleo, il materiale solido non assume nessun ruolo nel processo.

La teoria del *core accretion* è generalmente considerata la più plausibile per spiegare la formazione di pianeti giganti, piuttosto che quella dell'instabilità gravitazionale per varie ragioni. Prima di tutto, in base a calcoli teorici, è suggerito che nonostante i giovani dischi protoplanetari possono essere massicci abbastanza per essere instabili, essi non sono supposti essere in grado di raffreddarsi abbastanza velocemente da rendere possibile la frammentazione (ad eccezione, forse, delle orbite più esterne). Secondariamente, il modello accrescimento del nucleo spiega l'esistenza dei giganti ghiacciati come Nettuno (nonostante la scala di tempo per la formazione è preoccupantemente lunga se essi si sono formati nella loro attuale posizione). Infine, la correlazione osservata fra la frequenza dei pianeti extrasolari e il grado di metallicità³. La metallicità di una stella è dunque la quantità di metalli presenti in essa) della stella attorno alla quale orbita è qualitativamente spiegabile sotto forma di conseguenza dell'accrescimento del nucleo: se il disco è arricchito con materiale solido, un nucleo di massa critica può formarsi più prontamente. Non è chiaro se la correlazione può essere spiegata dal modello dell'instabilità gravitazionale. Contro di quest'ultimo, la supposta massa di Giove (che può essere stimata comparando i multipoli misurati del campo gravitazionale con modelli di struttura teorici) è più bassa delle stime semplici basate sulla teoria dell'accrescimento del nucleo.

Altre osservazioni, come quella inerente l'abbondanza di elementi diversi misurata nell'atmosfera di Giove dalla sonda *Probe*, sono anche in conflitto con il più semplice dei modelli della formazione dei pianeti giganti. Questi problemi suggeriscono che una piena conoscenza di tali dinamiche deve

³ Metallicità: tutti gli elementi più pesanti dell'He sono considerati metalli. La metallicità di una stella è dunque la quantità di metalli presenti in essa

ancora essere raggiunta. Osservazioni della frequenza dei pianeti giganti in sistemi planetari extra solari con proprietà diverse da quelle del SS promettono di fornire nuovi validi elementi. Per esempio, il modello del *core accretion* prevede che la formazione di pianeti giganti sia molto difficile ad orbite molto esterne (nonostante i dischi di gas possono essere ampi anche più di 100UA).

CAPITOLO 3

LE MIGRAZIONI PLANETARIE

3.1 IL MOTO DI ROTAZIONE

Al fine di meglio comprendere le spiegazioni alla migrazione planetaria che verranno fornite in seguito, è bene che sia chiaro che cosa si intende con “momento angolare”.

La figura 1 seguente mostra un disco libero di ruotare attorno al suo asse di simmetria (centro). Quando esso ruota, parti differenti del disco si muovono con velocità lineari diverse; ad esempio un punto vicino al bordo ruota più velocemente di uno nei pressi del centro. Nonostante questa differenza nelle velocità, in un dato intervallo di tempo ciascun punto descrive lo stesso angolo.

Si consideri ora la particella P; durante un intervallo di tempo Δt essa si muove lungo un arco di circonferenza, percorrendo uno spazio Δs descritto da $\Delta s = v\Delta t$ in cui v è la velocità della particella.

Durante questo intervallo di tempo, P copre un angolo di $\Delta\theta$ descritto dalla relazione

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r}.$$

$\Delta\theta$ è chiamato spostamento angolare. La rapidità di variazione dell'angolo è chiamata **velocità angolare** ed è rappresentata dall'equazione

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

ed è espressa in rad/sec. Dunque 1 giro = 2π rad

La rapidità di variazione della velocità angolare è l'**accelerazione angolare**, data da:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

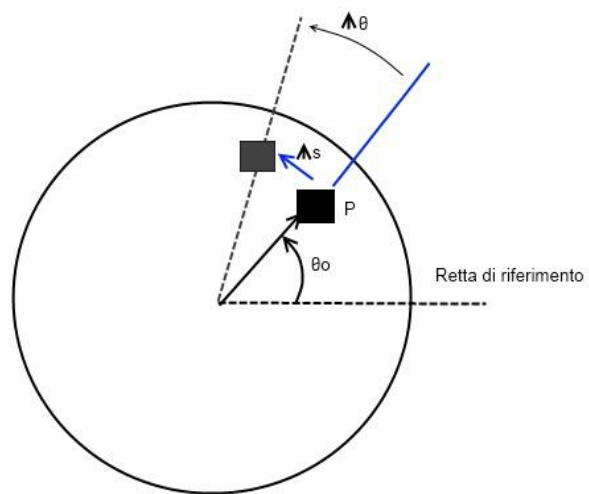


Figura 1 Un disco ruota attorno al suo asse (che passa per il centro). Lo spazio Δs percorso dal corpo P sul disco dipende da r , ma lo spostamento angolare $\Delta\theta$ è lo stesso per tutti i punti del disco.

Esiste anche la relazione $v = rw$, ottenuta dall'unione delle due precedenti. Essa è chiamata **velocità tangenziale**. Allo stesso modo si ottiene l'**accelerazione tangenziale**

$$a_t = r \alpha$$

L'ultima relazione a noi concernente è l'**accelerazione centripeta**, ossia diretta lungo il raggio verso il centro, avente come modulo:

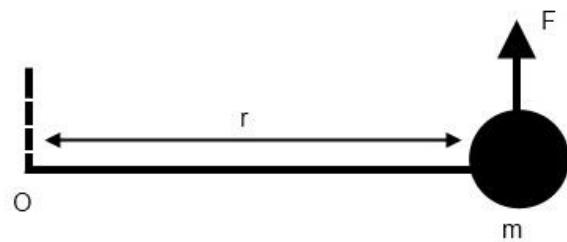
$$a_c = \frac{v^2}{r} = r\omega^2$$

Se un corpo ruota attorno ad un asse, esso continuerà a ruotare con velocità angolare costante fintanto che su di esso non agiranno forze esterne.

Se, però, dovesse esservi un momento dovuto a forze esterne che agiscono su di un corpo, la velocità angolare di esso non rimane costante, ma varia con un'accelerazione angolare direttamente proporzionale al momento delle forze esterne.

Per comprendere questo fenomeno poniamo questo esempio:

il sistema qui a fianco è composto da un oggetto di massa m attaccato ad un'asta di massa trascurabile impernata in un punto O distante r dall'oggetto. Se supponiamo che una forza F agisca sul corpo perpendicolarmente all'asta di raggio r e quindi tangente alla circonferenza, la seconda legge di Newton afferma, per l'oggetto, che:



$$F = ma = mr \alpha$$

dove la relazione utilizzata è $a = r \alpha$ fra l'accelerazione tangenziale e l'accelerazione angolare della massa. Se ogni elemento viene poi moltiplicato per r otteniamo:

$$rF = mr^2 \alpha$$

Il primo membro dell'equazione precedente è il momento, $M = rF$. Esso è esercitato dalla forza F rispetto al perno O . Si ha quindi:

$$M = mr^2 \propto$$

Quest'equazione esprime **il momento di una forza**.

Se ora si somma su tutte le possibili particelle del corpo otteniamo che:

$$\Sigma M = \Sigma mr^2 \propto$$

La grandezza ΣM è il momento risultante dalle forze che agiscono sul corpo, ossia M_{ris} . La grandezza Σmr^2 è una proprietà del corpo e dell'asse di rotazione e viene denominata **momento di inerzia I** ;

$$I = \Sigma mr^2$$

Ciò misura la resistenza che un corpo oppone a variazioni del suo moto rotatorio ed varia in funzione della distribuzione della massa rispetto all'asse di rotazione.

$$M_{ris} = I \propto$$

3.2 MOMENTO DELLA QUANTITÀ DI MOTO O MOMENTO ANGOLARE

Veniamo ora all'aspetto che riguarda quanto ci interessa, ma che senza le precedenti precisazioni non sarebbe possibile spiegare. Se un corpo ruota attorno ad un asse, al suo moto rotatorio corrisponde un'energia cinetica. Questo accade perché, al fine di mettere il corpo in rotazione, occorre compiere lavoro (la forza deve spostare il proprio punto di applicazione). Si consideri nuovamente il disco della Figura 1; l'energia cinetica presente in un sistema rotante è la somma delle energie cinetiche delle singole particelle del sistema, ossia:

$$Ec = \Sigma \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} (\Sigma mr^2) \omega^2$$

In questo caso si noti la relazione $v = r\omega$ spiegata in precedenza.

Si ottiene infine una relazione simile a quella del moto lineare, ovvero:

$$Ec = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Ora, supponiamo che ad un disco venga applicata una forza F tangenzialmente. Se esso ruota di un angolo $\Delta\theta$, il punto di applicazione della forza si sposta $\Delta s = R\Delta\theta$. Il lavoro compiuto dalla forza è quindi: $\Delta W = F\Delta s = FR\Delta\theta = M\Delta\theta$

dove FR è il momento di forza M .

Il momento delle quantità di moto, o momento angolare L di un corpo è definito come il **prodotto fra momento d'inerzia per la velocità angolare**:

$$L = I \omega$$

Se generalizziamo la seconda legge di Newton in modo che valga anche per il moto rotatorio:

“la rapidità di variazione del momento angolare di un sistema è uguale al momento risultante dalle

forze che agiscono su di esso”. Da cui segue: $Mris = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\Delta I \omega}{\Delta t}$

Nel caso di un sistema a particelle, e quindi non rigido, il momento di inerzia I può non essere costante. Se su un sistema non agiscono momenti dovuti a forze esterne, dalla precedente equazione si ottiene:

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = 0, \text{dove } L = \text{costante}$$

“Se il risultante dei momenti delle forze esterne che agiscono su un sistema è nullo, il momento angolare totale del sistema è costante”. Questo è l’enunciato della conservazione del momento angolare.

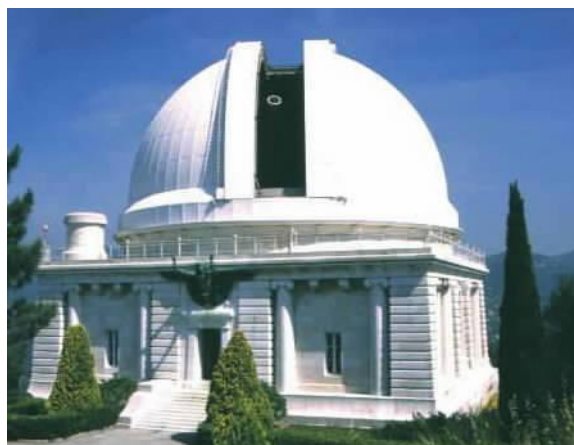
3.3 IL MODELLO DI NIZZA

Quando proviamo a prendere in considerazione, e, magari anche a spiegare la formazione del nostro sistema solare, incorreremo inevitabilmente in una serie di complicazioni, come, tanto per citarne

una, l'idea molto offusca dell'evoluzione planetaria in un disco di accrescimento roteante.

In questo senso il modello di “Nizza” (in inglese “the Nice model”), chiamato così per il luogo dove è stato sviluppato, cioè l’ “Observatoire de la Côte d'Azur” di Nizza, è per lo appunto un modello di simulazione pubblicato per la prima volta nel 2005 in tre pagine dalla nota rivista scientifica inglese “Nature vol. 235” in seguito alla collaborazione internazionale e al lavoro dei quattro scienziati Rodney Gomes, Harold F. Levison, Alessandro Morbidelli e Kleomenis Tsiganis che prova a spiegare in modo abbastanza sintetica l'evoluzione del sistema solare partendo da una posizione dei pianeti più compatta e ravvicinata rispetto all'attuale configurazione (circolavano su orbite comprese tra 5,5 e 17 UA circa). Si trovavano in una sorta di grande disco denso e colmo di planetesimali, rocce e ghiaccio di massa 35 volte quella terrestre circa.

A partire da questa situazione, in seguito alla dispersione dal disco protoplanetario iniziale di gas e polveri, si creò di conseguenza una perturbazione, che andò a cambiare una situazione già instabile delle orbite planetarie; con il passare del tempo i pianeti giganti (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) migrarono nella loro posizione attuale, dove l'orbita del pianeta gigante più esterno è di circa 35 UA, più stabile di quella precedente e caratterizzata da un'orbita molto vicina al circolare e solo leggermente ellittica, provocando tra l'altro anche la cattura dei suoi asteroidi Trojans nel periodo del “Late Heavy Bombardment Period” (in italiano “ Intenso bombardamento tardivo”, abbreviato spesso con la sigla LHB. Vedi paragrafo dedicato).



Un'immagine raffigurante l'Observatoire de la Côte d'Azur.

Grazie a questo modello, in una loro seconda analisi, il gruppo di scienziati cercò anche di spiegare altri eventi storici tra cui la formazione della nube di Oort, l'esistenza di popolazioni di piccoli corpi

all' interno del Sistema Solare come la fascia di Kuiper, i satelliti troiani di Nettuno e Giove, le numerose risonanze trans-nettuniane di oggetti sotto l' influenza di Nettuno stesso.

Anche se i risultati di questa esperienze in alcuni casi non portavano ad ottenere risultati chiarissimi e quindi una definitiva conferma del modello, riuscirono a capire che stavano procedendo sulla strada giusta e che essi siano riusciti a creare il modello di rappresentazione della formazione del Sistema più realistico dei nostri giorni, anche se è vero che non è ancora universalmente riconosciuto da tutti gli scienziati planetari di tutto il globo.

Uno dei limiti attuali di questo modello resta quello della riproduzione dei satelliti esterni al Sistema e di quello della fascia di Kuiper.

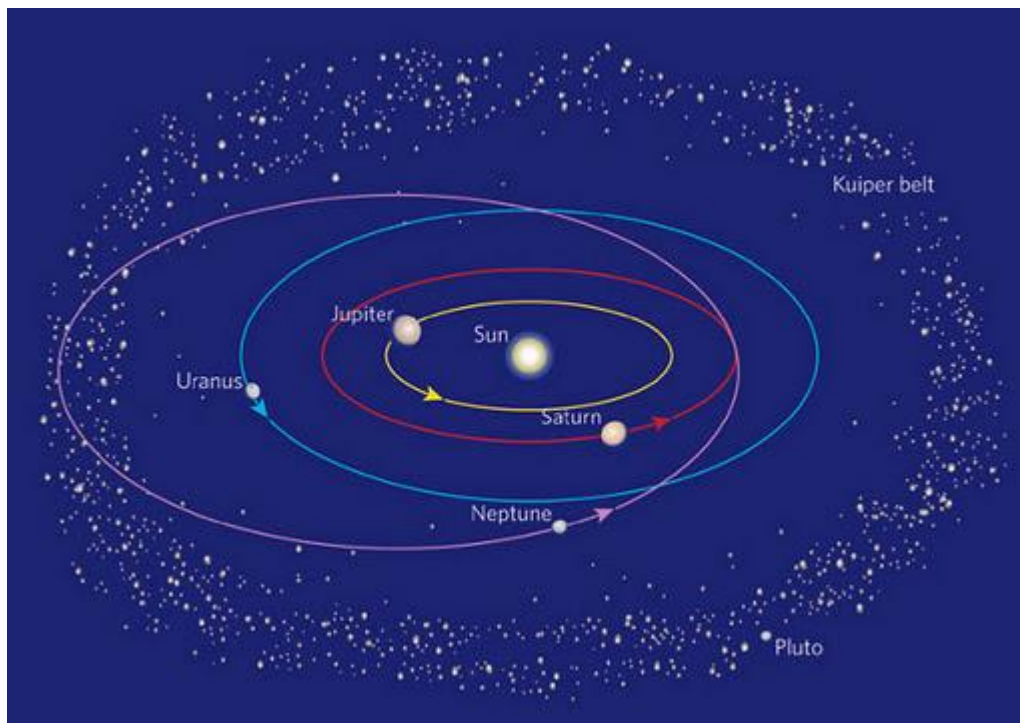


Immagine estratta da "[*When giants roamed*](#)" di Joe Hahn

Gli scienziati, tutt' oggi, conoscono in modo così vago e impreciso circa la formazione di Urano e Nettuno che lo scienziato Levison dichiarò:

"...the possibilities concerning the formation of Uranus and Neptune are almost endless."

(G. Jeffrey Taylor. "Uranus, Neptune, and the Mountains of the Moon". *Planetary Science Research Discoveries*. Hawaii Institute of Geophysics & Planetology.)

Cioè in Italiano:

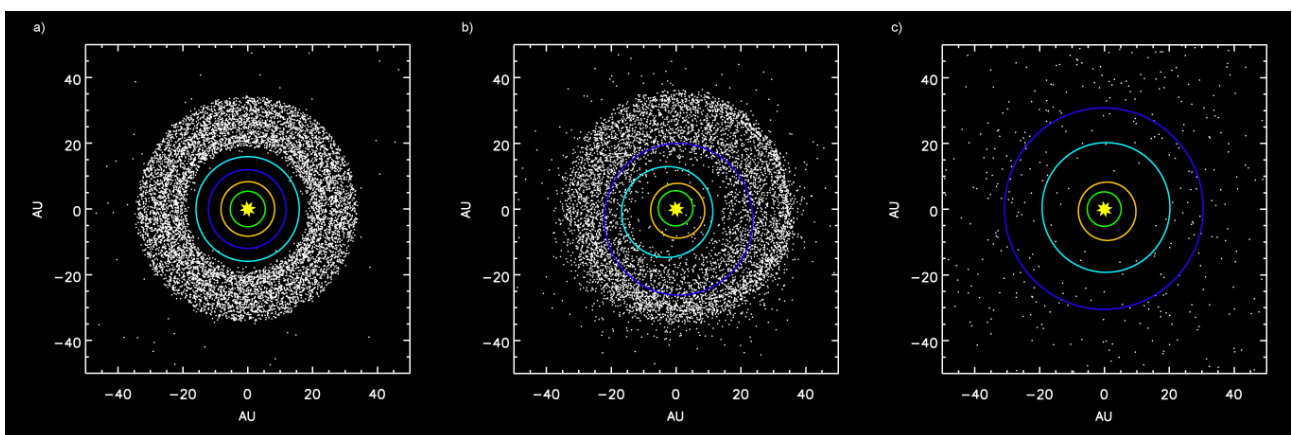
“ Le possibilità relative alla formazione di Urano e Nettuno sono quasi infinite”

Per far capire meglio l'importanza e il peso che questo modello ha avuto riporto una citazione dello scienziato A. Crida nella sua opera “Solar System formation” pubblicata nel 2009:

“In the frame of this model, the orbital and size distribution of the Trojan and Hildas asteroids can be explained. The structure of the Kuiper Belt is also well reproduced. In addition, the irregular satellites of Saturn, Uranus and Neptune can be captured during the global instability. For these reasons, the Nice model is one of the most impressive results of the last decade on Solar System formation.”

Che tradotto in italiano si può così riassumere:

“Nel suo insieme questo modello permette di spiegare la distribuzione e le dimensioni degli asteroidi Trojans e Hildas. Anche la struttura della fascia di Kuiper è riprodotta in maniera chiara. Inoltre, i satelliti irregolari di Saturno, Urano e Nettuno possono essere catturati durante l'instabilità globale. Per questa serie di motivi il “Modello di Nizza” è uno dei risultati più impressionanti dell'ultimo decennio riguardante la formazione del Sistema Solare.”



Questa immagine estratta da Wikipedia rappresenta la simulazione dello spostamento dei pianeti esterni e della fascia degli asteroidi planetesimali: a) configurazione di partenza, prima che Giove e Saturno entrino in sintonia e raggiungessero una risonanza di tipo 2:1; b) dispersione dei

planetesimi all'interno del Sistema Solare, dopo il passaggio orbitale di Nettuno (blu scuro) e Urano (luce azzurra); c) il Sistema in seguito all'espulsione di planetesimi da parte dei pianeti.

3.4 LA MIGRAZIONE PLANETARIA

Dal momento in cui il pianeta extra solare 51b Pegasi è stato individuato, il modello sul quale l'evoluzione del sistema solare si basava è caduto. Le sue lacune, alle quali si è già accennato in precedenza, non potevano essere colmate; era necessario per cui trovare una soluzione. Questa è stata individuata nelle migrazioni planetarie. Il nuovo modello che si propone di spiegare l'evoluzione del sistema solare è chiamato il Modello di Nizza.

Prima di addentrarci nel dettaglio delle migrazioni, è bene fornire qualche informazione di carattere generale. Dopodiché, grazie ad uno studio molto preciso, che, però, non andremo ad analizzare fino in fondo, tenteremo di fornire una spiegazione al meccanismo di migrazione planetaria dei pianeti del tipo di Giove.

Attorno alle stelle giovani è presente, come visto in precedenza, un disco definito proto planetario. Nel caso in cui, a seguito di collisioni, dei planetesimali si formano mentre questo disco è ancora presente, è possibile che il detto planetesimale, o addirittura, in fase avanzata, il pianeta possa cedere una parte del suo momento angolare alla disco di residui che lo circonda. Tutto ciò causa un movimento centripeto.

Il caso che la ricerca seguente prende in considerazione si riferisce a quella situazione particolare dove planetesimali e proto pianeti interagiscono gravitazionalmente fra loro, in modo caotico. Questa interazione porta spesso, per cause che saranno nominate altrove, alla deviazione dei corpi **minori** verso orbite diverse da quelle iniziali. Anche in questo caso, vi è uno scambio di momento angolare ed una successiva deviazione orbitale. Essa può essere centripeta o centrifuga.

Vi sono tre tipologie di migrazione:

- Migrazione di tipo I:

sembra che i pianeti del tipo terrestre inducano delle onde spiraleggianti di densità⁴ nel gas circostante o nel disco planetesimale. Questo risulta spesso in un fenomeno che vede le spirali interne e quelle esterne sottoposte ad uno sbilanciamento; le seconde possiedono infatti un momento maggiore delle prime. La conseguenza è che il pianeta perde momento

⁴ Onda di densità

“Perturbazione del campo gravitazionale generale fatta a forma di spirale, che ruota rigidamente con una velocità angolare superiore a quella della materia presente nel disco. Queste onde di densità si comportano nello stesso modo in cui agisce un'elica che ruota in un fluido.”

<http://digilander.libero.it/andromedda/Galassie%20-%20La%20classificazione%20delle%20galassie.htm>

angolare e si sposta verso l'interno

- Migrazione di tipo II:

I pianeti massicci (con massa pari a 10 volte quella terrestre), possiedono una funzione di “spazzino” cosmico. Durante il loro movimento di orbita, infatti, lasciano dietro di sé uno spazio di lacuna nel disco. Quest'ultima pone fine alla migrazione di tipo I, in quanto manca materiale con il quale scambiare momento angolare (questo fenomeno, vedremo, è definito *damped migration*). Nel corso del tempo, tuttavia, nuovo materiale entra nello spazio di lacuna e ciò porta il pianeta a spostarsi verso orbite più interne. Sembrerebbe questa una delle ipotesi più accreditate volte a spiegare la formazione degli *hot Jupiters*, ossia quei pianeti aventi le caratteristiche di Giove che si trovano però troppo vicine alla propria stella per essersi effettivamente formati in quella posizione (vedi 51 pegasi).

- Scattering gravitazionale:

Un meccanismo che determinerebbe lo spostamento planetario su orbite più esterne è dettato dallo scattering gravitazionale provocato da pianeti massicci. Semplicemente, l'interazione gravitazionale fra due corpi determinerebbe l'espulsione di uno dei due. Nel caso del SS, Urano e Nettuno sembrerebbero aver subito questa sorte, dopo essere entrati in contatto con Giove e Saturno.⁵

Verrà qui di seguito proposta una parte della ricerca eseguita da Harold F. Levison (Southwest Research Institute, Boulder), Alessandro Morbidelli (Observatoire de la Cote d'Azur), Rodney Gomes (Observatorio Nacional, Rio de Janeiro) e Dana Backman (USRA & SETI Institute, Moffett Field), intitolata *PLANET MIGRATION IN PLANETESIMAL DISKS*. Il nostro obiettivo, sebbene saranno presenti alcune formule matematiche che permettono una comprensione quantitativa oltre che qualitativa, è quello di fornire una spiegazione semplice, ma comprensibile, di due tipi di migrazione, ossia la *damped migration* e la *sustained migration*.

⁵ E. W. Thommes, M. J. Duncan, H. F. Levison (2002). *The Formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn*. *Astronomical Journal*

3.4.1 ABTRACT – INTRODUZIONE DELLA RICERCA –

“Planets embedded in a planetesimal disk will migrate as a result of angular momentum and energy conservation as the planets scatter the planetesimals that they encounter. A surprising variety of interesting and complex dynamics can arise from this apparently simple process. In this Chapter, we review the basic characteristics of planetesimal-driven migration. We discuss how the structure of a planetary system controls migration. We describe how this type of migration can cause planetary systems to become dynamically unstable and how a massive planetesimal disk can save planets from being ejected from the planetary system during this instability. We examine how the Solar System's small body reservoirs, particularly the Kuiper belt and Jupiter's Trojan asteroids, constrain what happened here. We also review a new model for the early dynamical evolution of the outer Solar System that quantitatively reproduces much of what we see. And nally, we brievy discuss how planetesimal driven migration could have affected some of the extra-solar systems that have recently been discovered.”

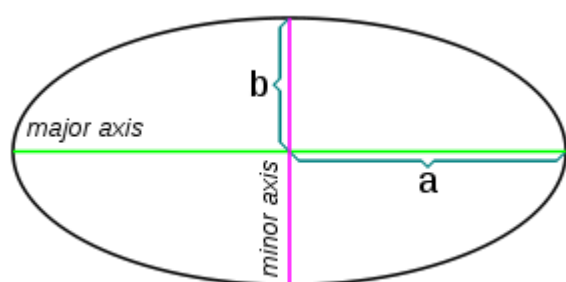
“Pianeti incorporati in un disco planetesimale migreranno come conseguenza della conservazione di energia e di momento angolare e durante tale migrazione disperderanno i planetesimali stessi che incontrano. Un’incredibile varietà di interessanti e complesse dinamiche possono nascere da questo apparentemente semplice processo. In questo Capitolo, [che noi non analizzeremo e riporteremo, per comodità e perché non rientrerebbe nel tema principale, ossia se il pianeta Giove, in passato abbia migrato e se si da dove a dove] passeremo in rassegna le caratteristiche di base di una migrazione guidata da planetesimi. Discuteremo come la struttura di un sistema planetario controlli delle migrazioni. Descriveremo come questo tipo di migrazione può causare l’instabilità dinamica di questi sistemi e come un disco planetesimale massiccio possa impedire che i pianeti vengano espulsi dal sistema durante questa instabilità. Esamineremo come le riserve di corpi piccoli nel Sistema Solare, in particolare nella Fascia di Kuiper [argomento in parte da noi riportato perché detta fascia costituisce una possibile area di provenienza di Giove⁶] e gli asteroidi troiani di Giove [altro argomento trattato]. Realizzeremo inoltre un nuovo modello che spieghi la prima evoluzione dinamica del Sistema Solare esterno che, quantitativamente, riproduce gran parte di ciò che vediamo. Infine discuteremo brevemente di come la migrazione guidata dai planetesimali possa aver influenzato alcuni dei sistemi extra solari che abbiamo recentemente scoperto.”

⁶ cfr. ALLA RICERCA DELLA VITA, Cesare Guaita)]

Vi sono tre dinamiche che possono portare un pianeta a migrare; la prima avviene durante gli stadi iniziali, quando il disco di gas proto planetario esiste ancora. In questo caso le interazioni gravitazionali fra il pianeta e il disco possono causare la migrazione. La seconda può avvenire quando il disco è sparito. Se sono ancora presenti molti planetesimali nel sistema, il pianeta in questione può migrare come conseguenza degli incontri gravitazionali con questi oggetti. Più nel dettaglio, se il pianeta si trova immerso in un “mare” di piccoli corpi, visto che questi ultimi possono provenire da ogni direzione, questo porterà il pianeta a seguire dei percorsi casuali, ma sempre proseguendo lungo il semiasse maggiore⁷. Tuttavia, poiché la direzione di questi piccoli oggetti tende a spostarsi principalmente su di un lato del pianeta, alla fine vi sarà uno spostamento del flusso di materiale verso l'interno o verso l'esterno. In base a quest'ultimo fenomeno, il pianeta si dirigerà in senso opposto, al fine di conservare energia e momento angolare. Tutto ciò non avviene in modo rapido, anzi, ci vorrà molto tempo perché la semiasse cambi. La terza dinamica che provoca una migrazione planetaria è legata al fatto che i sistemi planetari possono subire una “instabilità dinamica” che porta ad un breve ma intenso periodo di evoluzione orbitale durante il quale le eccentricità⁸ del corpo sono ampliate. Se questa instabilità può essere smorzata da un qualche processo, come la frizione contro il disco, l'orbita del pianeta può nuovamente riprendere delle orbite circolari, ma in zone diverse da quelle in cui si è formato. Vi è infine una quarta situazione che vede come oggetto il fenomeno della risonanza; il movimento ondulatorio di due corpi sembra destabilizzare il moto di uno dei due che viene poi espulso. Prima di entrare nel dettaglio del nostro sistema solare (§3.6) analizziamo un modello semplice. Tale modello non è frutto delle nostre ricerche, ci limitiamo a proporre il frutto di studi di ricercatori, al fine di chiarire, seppur non nel dettaglio, il fenomeno della migrazione.

3.5 ALCUNI MODELLI SEMPLICI DI MIGRAZIONE PLANETARIA

Individuare la storia della migrazione di un pianeta risulta complicato, poiché essa dipende da quanto momento angolare scorre nel sistema, ovvero dalla distribuzione e dall'evoluzione della



7

Il semiasse maggiore di un'ellisse è la metà dell'asse maggiore, passa dal centro attraverso uno dei fuochi, fino al bordo dell'ellisse.

⁸ Da definizione, l'eccentricità è la misura di quanto l'orbita di un pianeta devia da una circolare.

massa e del momento angolare del pianeta che attraversa il suddetto mare di oggetti minori. Ci occupiamo dunque ora del comportamento di un pianeta che entra in contatto con un disco massiccio di planetesimali. Questi valori, sono determinati dalla fonte e dalla direzione dei corpi. Al fine di sviluppare delle teorie che spieghino e analizzino le migrazioni planetarie, sono stati creati e studiati dei modelli più semplici, basati su di un solo pianeta che orbita attraverso un disco freddo. Sebbene il nostro obiettivo sia quello di spiegare e portare delle informazioni più di tipo qualitativo, ora è necessario introdurre anche degli elementi più di carattere matematico.

Il modello IBLT00 mostra che il tasso di variazione di una semiasse maggiore di un pianeta a è:

$$\frac{da}{dt} = -\frac{2}{M_p} \sqrt{a} \dot{H}_x$$

dove M_p è la massa del pianeta e H_x è la quantità di trasferimento di momento angolare dai planetesimali al pianeta. L'eccentricità del pianeta è piccola, secondo questa equazione; $G \equiv 1$.

$$\dot{H}_x = \bar{\epsilon} \bar{k} M(t) a^{-1}$$

H_x contiene le informazioni fondamentali sulla geometria e sulla struttura della regione che il pianeta incontra durante la sua orbita; $M(t)$ è la massa totale dei corpi incontrati dal pianeta lungo la sua orbita e $\bar{k}$ è la media del cambiamento del momento angolare per ogni incontro con un planetesimale. Quindi:

$$\frac{da}{dt} = -2\bar{\epsilon} \bar{k} \frac{M(t)}{M_p} \frac{1}{\sqrt{a}}$$

La modifica di $M(t)$ può essere approssimata mediante l'equazione:

$$\dot{M}(t) = -M(t)/\Gamma + 2\pi a' l \Sigma(a)$$

dove il primo termine dopo l'uguaglianza rappresenta il decadimento della popolazione planetesimale a causa del termine del periodo di vita della stessa, mentre il secondo termine rappresenta il planetesimale che, a causa della modifica della posizione del pianeta, entra in una regione dove può essere disperso dal contatto gravitazionale con il pianeta per la prima volta.

$\Sigma(a)$ è la densità della superficie del planetesimo non ancora disperso (senza quindi essere entrato in contatto con il pianeta) alla distanza dal sole a .

Sostituendo la seconda equazione nella terza otteniamo:

$$\dot{M}(t) = (-\Gamma^{-1} + 4\pi \Sigma |k| \sqrt{a} \Sigma(a)/Mp) M(t)$$

Vediamo ora di interpretare il significato dell'equazione di cui sopra.

Per praticità, gli autori assumono che il termine $\alpha = -\Gamma^{-1} + 4\pi \Sigma |k| \sqrt{a} \Sigma(a)/Mp$ non cambi significativamente con il passare del tempo, ciò non è vero, ma ci permette di comprendere il significato del comportamento del pianeta. Data quest'assunzione, prosegue il lavoro di Levison, l'equazione diventa di tipo esponenziale, la quale è risolvibile e permette di individuare qualche indizio sulle modalità secondo le quali un pianeta migra.

Se α è negativo, allora $\dot{M}(t)$ decade esponenzialmente fino a 0 e il pianeta (vedi equazione 1) smette di migrare. In questo caso, la perdita di planetesimali, causata dal termine del periodo di vita dell'oggetto non è colmata dall'acquisizione di nuovi corpi nella regione di dispersione; il pianeta è dunque "a secco". **Questa migrazione è chiamata *damped migration*, o migrazione smorzata**, così chiamata proprio per il fatto che, a causa della mancata presenza di ulteriori planetesimi, la migrazione non prosegue oltre.

Viceversa, se α è positivo, $\dot{M}(t)$ aumenta esponenzialmente e la migrazione planetaria accelera. In questo caso, l'acquisizione di nuovi planetesimi dovuta alla migrazione eccede le perdite e la migrazione continua. Per questo motivo, **questo tipo di migrazione è chiamato *sustained migration* o migrazione sostenuta**.

Uno dei limiti del modello è quello di non fornire nessuna informazione diretta circa la direzione della migrazione, necessaria però al fine di determinare la vera conformazione di un sistema solare al momento della formazione dei pianeti.

Secondo i ricercatori che hanno sviluppato il modello di cui sopra, l'informazione chiave è inclusa nella grandezza k (media del cambiamento del momento angolare).

3.6 IL NOSTRO CASO: LE ZONE ESTERNE SISTEMA SOLARE

Ora, possiamo determinare quale tipo di migrazione è accaduta nel nostro sistema solare? È possibile precisare massa e struttura dell'originale disco proto planetario?

Oltre alle correnti orbite planetarie dei pianeti giganti, la struttura della fascia di Kuiper ci fornisce

importanti indizi circa la storia del Sistema Solare, poiché quest'area porta ancora il segno dell'evoluzione primordiale del sistema planetario.

Le caratteristiche delle regioni più esterne del sistema solare sono spiegabili solo mediante i fenomeni di migrazione dei pianeti più esterni e dalle loro interazioni con Giove. Secondo il modello di Nizza (§3.3), i corpi che, a causa di Giove, sono stati costretti in orbite molto ellittiche, andarono a formare la Nube di Oort, il supposto luogo d'origine delle varie comete nel Sistema Solare, mentre gli oggetti influenzati dalla presenza di Nettuno (come vedremo pure fra poco) andarono a formare l'attuale *Kuiper Belt*.

In principio, si suppone che al limite esterno del SS esistesse una cintura di asteroidi, l'antenata dell'attuale Kuiper, caratterizzata da una maggior densità e da una maggior vicinanza con il Sole. Il suo confine interno si situava a 30 – 35 UA e pure i due giganti ghiacciati, Urano e Nettuno, si trovavano più vicini al Sole di quanto non lo siano invece ai giorni nostri. Unica differenza: le posizioni erano invertite, ovvero, Urano era più lontano dalla stella rispetto a Nettuno. Alcuni oggetti come Plutone, iniziarono ad interagire con l'orbita di Nettuno cominciando così un fenomeno di risonanza orbitale (§3.5). Il suddetto Modello di Nizza è in grado di fornire delle spiegazioni plausibili alle attuali occupazioni delle risonanze nella *Kuiper Belt*.

Citiamo ora tre importanti caratteristiche della fascia di Kuiper:

- Quest'area contiene solo circa 0.1 Me di materiale e ciò è sorprendente visto che i modelli prevedono che vi sia un quantitativo di materiale pari o superiore a 10 Me, necessario affinché gli oggetti che si osservano possano essersi accresciuti.
- La fascia subisce un fenomeno chiamato *Dynamical Excitement*, ovvero gli oggetti al suo interno si muovono troppo velocemente e subiscono troppi disturbi di risonanza orbitale (*Mean-motion resonance*) rispetto a quelli che ci si aspetterebbe.
- LA fascia sembra terminare circa intorno alle 50 UA.

Se poniamo che la cintura primordiale conteneva almeno 10Me fra 40 e 50 UA al fine da permettere l'accrescimento degli oggetti osservati in questa zona, il modello che meglio descrive e simula lo scenario della fascia di Kuiper è quello proposto da Hahn e Malhotra nel 1999.

Detto modello assume che nella cintura vi siano contenuti circa 45 Me di materiale fra 20 e 50 UA. Se ora prendiamo d'esempio un pianeta, Nettuno è partito da 22 UA ed è migrato fino a 30 UA, dove si è fermato, a causa dello smorzamento della sua migrazione (*damped migration*). Ciò ha permesso la permanenza di sufficiente materiale nella fascia, cosicché gli oggetti che oggi osserviamo possano esistere. Tuttavia questo modello possiede un limite: se Nettuno si è fermato (non si è fermato in senso letterale, ma il suo esodo si è interrotto) a 30 UA a causa dello

smorzamento della migrazione, come è possibile che la cintura abbia perso più del 99% della sua massa? Questo è un fatto molto importante: se la migrazione si è smorzata, abbiamo visto, è a causa del mancato apporto di ulteriore materiale (planetesimi e residui) che portino avanti la migrazione. Ciò accadrebbe se il pianeta raggiungesse il confine della cintura, confine che è supposto essere molto più avanti.

Sono due le idee che sono state proposte per spiegare la perdita del materiale. La prima afferma che i fenomeni di eccitamento dinamico della stragrande maggioranza degli oggetti della fascia di Kuiper causino, al passaggio del pianeta Nettuno, l'espulsione degli stessi. La seconda sostiene che la massa della cintura sia stata frantumata in polvere ad opera della collisione con il pianeta. La ricerca sulla quale gli scienziati che hanno prodotto il lavoro su cui ci stiamo basando ha studiato la prima ipotesi e ne esclude la veridicità. Anche la seconda, però possiede dei problemi significativi, fra i quali il fatto che la polverizzazione degli oggetti non si verifica, in realtà, poiché le condizioni necessarie, sviluppate nelle simulazioni non sono soddisfatte, dunque neppure questa ipotesi è verosimile.

La ricerca prosegue e secondo lo studio del fenomeno di migrazione si è scoperto che un pianeta non si ferma necessariamente al confine esatto della fascia. Infatti, poiché il momento angolare deve essere conservato (si ricordi il paragrafo sul momento angolare §3.2) durante il processo di migrazione, la località di destinazione dipende più dal momento angolare totale del disco che dalla localizzazione del confine.

Dunque, la conclusione è che un disco con un confine esterno vicino a 30 UA non è in contraddizione, ma anzi può spiegare l'attuale semiasse maggiore di Nettuno.

3.5 UN'ALTRA FONTE DI MIGRAZIONE: LA RISONANZA ORBITALE

Prima di cominciare ricordiamo che al paragrafo §3.1 e §3.2 è possibile trovare una spiegazione tecnica del moto rotatorio.

Il moto di un corpo celeste attorno ad uno di massa significativamente maggiore (Vedi, ad esempio, la Luna attorno alla Terra o la Terra stessa attorno al sole) è un moto circolare uniforme. Se accade che due pianeti ruotano attorno alla propria stella con tempi di rivoluzione in rapporto fra loro di due piccoli interi, 2:1, 2:3, ecc, quando essi si avvicinano la reciproca attrazione gravitazionale aumenta, per poi diminuire quando si allontanano.

Più nel dettaglio, quando due corpi orbitano attorno ad un terzo e fra i due corpi è presente un rapporto 2:1, significa che quando uno ha effettuato un giro attorno al terzo, l'altro ne ha effettuati due.

Ecco che questo fenomeno diviene significativo a livello di migrazione, poiché se queste modifiche di forza gravitazionale sono rilevanti, l'orbita può modificarsi. Due sono i scenari che possono verificarsi a questo punto:

- 1) Il moto dei pianeti si destabilizza e le orbite, con il tempo, cambiano fino a raggiungere una situazione in cui i due pianeti non si influenzano più.
Nel caso in cui uno dei due abbia una massa molto maggiore dell'altro, il risultato sarà che il minore sarà schiacciato da certe zone dello spazio.
- 2) I due pianeti non si avvicinano sufficientemente per influenzarsi ed entrano in una situazione di equilibrio stabile. In questa situazione, le variazioni dell'orbita sono compensate da modificazioni contrarie nell'arco di ogni periodo orbitale.

3.6 IL FENOMENO DEL LATE HEAVY BOMBARDMENT (LHB)

IL LUNAR LATE HEAVY BOMBARDMENT

Il *late heavy bombardment* (comunemente riferito al *lunar cataclysm*, o *LHB*) è un periodo di tempo ritenuto protrarsi da 4.1 a 3.8 miliardi di anni fa, durante il quale un enorme numero di crateri da impatto sono supposti essere stati formati sulla luna e, per deduzione, pure sulla Terra, su Mercurio, su Venere e su Marte.



Il *LHB* è, in lingua inglese, “late”, ossia tardivo, solo in relazione al periodo principale di accrescimento (*accretion*⁹), quando la Terra e gli altri tre pianeti rocciosi si sono formati inizialmente e guadagnato la maggior parte del proprio materiale; in relazione alla storia del nostro pianeta nel suo complesso, infatti, il fenomeno del *LHB* è relativamente recente.

L'elemento comprovante questo evento è fornito in primo luogo dalla datazione di campioni lunari, che indicano che la maggior parte delle rocce fuse a causa di impatti si sono

formate nel sopracitato periodo di tempo.

Una teoria popolare del modello di Nizza fra gli scienziati postula che i pianeti giganti siano migrati in quest'orbita in questo preciso periodo di tempo, causando l'immissione degli oggetti presenti nella fascia di asteroidi in orbite più eccentriche che hanno poi raggiunto i pianeti del tipo terrestre. Tuttavia, taluni sostengono che il campione lunare non necessita un cataclisma che avviene in un periodo di tempo ravvicinato (che ha portato alla formazione di crateri), ma che l'apparente ammasso di materiale fuso a causa di un impatto sia dovuto ad una singola, enorme collisione. Vi sono molte teorie che si pongono l'obiettivo di spiegare l'origine di questo strano fenomeno, ma noi ci concentreremo, poiché rientra nell'ambito del nostro lavoro, solo sulle cause riferite alla migrazione planetaria, cause che porteranno di nuovo in campo l'operato dei pianeti gassosi giganti. Prima di fare ciò, comunque, ci soffermiamo un momento sugli argomenti a favore del *LHB* su quelli che, invece, lo criticano.

⁹ In astrofisica, questo termine è usato per descrivere due processi distinti:

il primo e più comune è la crescita di un oggetto massiccio mediante l'attrazione gravitazionale di altra materia, in genere materia gassosa presente in un disco proto planetario.

Il secondo, riferito alla *nebular theory* (il modello più largamente accettato inerente la formazione e l'evoluzione del SS, sebbene, come abbiamo visto, è stato messo in crisi dal ritrovamento di pianeti in posizioni particolari e inaspettate (51 pegasi), vede il fenomeno di accrescimento come legato alla collisione e all'attaccamento fra polvere microscopica ghiacciata e particelle di ghiaccio che porta alla formazione di planetesimali.

3.6.1 ORIGINE DEL CATACLISMA DEL LHB

Come già ribadito precedentemente, il fenomeno del LHB può essere ricollegato a quello della migrazione planetaria, in quanto quest'ultima potrebbe aver portato i vari pianeti rocciosi ad entrare in collisione con altri corpi.

Analizzeremo quindi ora l'origine del LHB, seguendo la ricerca sviluppata, nuovamente, da R.Gomes e colleghi.

L'analisi dei campioni di pietra avvenuta sulla Luna porta a pensare che un picco nel tasso di formazione di crateri sia stato raggiunto ad un certo punto, circa 700 milioni di anni dopo che i pianeti si sono formati e questo fenomeno è definito, come detto LHB.

Le teorie che spiegano la formazione planetaria non possono spiegare un fenomeno di questo genere, ovvero un periodo di intenso bombardamento di planetesimali così tardi S. Molti modelli sono stati proposti per spiegare questo picco tardivo di impatti, ma nessuno di essi è stato basato su concetti consistenti che spiegano l'evoluzione del SS.

In questo capitolo, proponiamo la teoria di R.Gomes, affermando che il LHB è stato innescato dalla rapida migrazione dei pianeti giganti, avvenuta dopo un lungo periodo di quiete.

Durante questa esplosione di migrazioni, i dischi planetesimali al di fuoridelle orbite dei pianeti sono stati destabilizzati, causando un'improvvisa spedizione dei planetesimi verso l'interno del SS. Il modello di Gomes e colleghi non solo, afferma l'autore, fornisce una spiegazione del fenomeno in questione, ma riproduce pure le caratteristiche osservazionali del SS esterno.

In altri lavori di ricerca¹⁰, dei quali però non parleremo perché non ambito di questa sede, spiegano l'attuale architettura orbitale del sistema planetario mediante la postulazione di una configurazione compatta secondo la quale il periodo orbitale di Saturno era meno di due volte quello di Giove. Dopo la dissipazione della nebula di gas, le orbite di Giove e di Saturno diversero, come risultato della loro interazione con un disco planetesimale massiccio e così il grado dei loro periodi orbitali

¹⁰ Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A. & Levison, H. F. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature* doi:10.1038/nature03539 (this issue).

Periodo(P)S/Periodo(P)J

è aumentato. Quando i due pianeti hanno attraversato la loro reciproca 1:2 MMR (cfr capitolo) (ossia dove $PS/PJ = 2$) le loro orbite diventarono più eccentriche. Questa transizione temporanea ha destabilizzato i pianeti giganti, portando a una fase (di breve periodo), dove i pianeti Saturno Urano e Nettuno si sono incontrati. Con incontro, ovviamente, intendiamo interazione gravitazionale e non fisica). La conseguenza di questi incontri, e delle interazioni fra i giganti ghiacciati ed il disco, urano e Nettuno hanno raggiunto la loro attuale distanza dal sole e Giove e Saturno, allo stesso modo, hanno modificato le loro orbite fino ad conformarle a quelle attualmente misurate. L'idea principale di questo riferimento è che la stessa evoluzione planetaria potrebbe spiegare il fenomeno del LHB, purché Giove e saturno abbiano realmente incontrato una MMR in rapporto 1:2.

CAPITOLO 4

IL CASO DI GIOVE: VARIE TEORIE A FAVORE DELLA MIGRAZIONE DEL GIANTE GASSOSO

Nonostante, come Guaita afferma nel suo libro, alcuni degli elementi, la cui quantità è stata riscontrata nell'atmosfera gioviana e in seguito valutata come eccessiva, possono essere stati incorporati dal gigante durante la sua permanenza nella fascia di Kuiper. Questo è possibile? Secondo i ricercatori, dai quali abbiamo preso la maggior parte delle informazioni (sempre dalla ricerca *PLANET MIGRATION IN PLANETESIMAL DISKS*), la risposta è positiva.

Vediamo nel dettaglio.

Si ricordi l'equazione

$$\dot{M}(t) = (-\Gamma^{-1} + 4\pi \Sigma |k| \sqrt{a} \Sigma(a)/Mp) M(t)$$

Il termine k nasconde al suo interno le informazioni circa la direzione della migrazione¹¹. L'effetto fisico principale che non è incluso nell'equazione di cui sopra è l'influenza che i planetesimi ed il materiale, sia che entrino sia che escano dalla regione di incontro planetario possono avere su k . Per un singolo pianeta in un disco, ci sono due movimenti principali per le particelle. Esse possono colpire il pianeta, ma questo tipo di direzione non influenza la migrazione (per ulteriori dettagli approfondire direttamente con la ricerca). Oltre a ciò, il pianeta può espellere il materiale con cui entra in contatto. Questo materiale, collidendo con il pianeta, rimuove da quest'ultimo una parte della sua energia e quindi, di conseguenza, il pianeta deve migrare verso l'interno come risposta¹². NB: il sopracitato fenomeno di migrazione sussiste solo fintanto che la massa del pianeta in oggetto sia pari o superiore a quella di Giove.

¹¹ *PLANET MIGRATION IN PLANETESIMAL DISKS*, Harold F. Levison (Southwest Research Institute, Boulder), Alessandro Morbidelli (Observatoire de la Côte d'Azur), Rodney Gomes (Observatorio Nacional, Rio de Janeiro) e Dana Backman (USRA & SETI Institute, Moffett Field)

¹² *Ibidem*

4.1 QUANDO GIOVE ERA AL POSTO DI MARTE: ARTICOLO

Ora, recentemente, una nuova teoria è stata formulata, sostenente che, in passato, Giove si trovasse nell'attuale posizione di Marte.

Riportiamo per informazione qui di seguito dl detto articolo.



Un nuovo scenario, che descrive una tappa-chiave nella formazione del sistema solare, è stato proposto da una collaborazione franco-statunitense, che include ricercatori del Cnrs (il Cnr francese) e delle università di Nizza e Bordeaux. Secondo questo modello, Giove sarebbe migrato verso il Sole, e più esattamente verso la posizione in cui è oggi Marte, prima di cominciare un'ulteriore migrazione verso l'esterno e raggiungere la sua posizione attuale, molto più lontana dal Sole. Attraverso il

nuovo modello, i ricercatori spiegano sia la formazione della cintura di asteroidi sia la differenza di dimensioni tra i pianeti terrestri (Mercurio, Venere, Terra e Marte). Il gruppo sta ora cercando d'includere in questo scenario Urano e Nettuno, i pianeti del sistema solare più distanti dal Sole. Lo studio è pubblicato sul sito web di Nature(mentre la pubblicazione dell'articolo su carta è prevista per luglio 2011)

Perché la massa di Marte, il pianeta più vicino a noi, è dieci volte minore di quella della Terra? La difficoltà nel riprodurre con sufficiente dettaglio la massa di Marte nelle simulazioni al computer ha lasciato a lungo questa domanda senza risposta. Nel 2009, però, l'introduzione di nuove tecniche in questo campo ha permesso a Brad Hansen, un ricercatore statunitense, di avanzare un modello che riproducesse le condizioni iniziali della formazione dei pianeti terrestri. Questi sarebbero stati generati da un disco di materiale spesso 0,3 unità astronomiche (UA: 1 UA è la distanza tra la Terra e il Sole), che si suppone fosse esteso da 0,7 a 1 UA dal Sole. Il centro di questo disco, in cui era concentrato il materiale, può aver contenuto i primi 'mattoni di costruzione' di Venere e della Terra, i pianeti terrestri più grandi del sistema solare. I bordi esterno e interno del disco avrebbero invece generato Marte e Mercurio, rispettivamente. Tuttavia, questo modello non tiene conto dell'esistenza, all'interno del sistema solare, di materiale planetario al di là Marte, nello spazio in cui si trovano la cintura di asteroidi (tra 2 e 4 UA) e i quattro pianeti giganti (Giove, Saturno, Urano e Nettuno, tra le 5 e le 30 UA).

Lo studio degli esopianeti – cioè, i pianeti che non appartengono al nostro sistema solare – ha rivelato che alcuni pianeti giganti possono migrare avvicinandosi alla loro stella di riferimento. Sulla base di questa osservazione, **Alessandro Morbidelli e colleghi** hanno avanzato l'ipotesi che i pianeti giganti del nostro sistema solare (Giove e Saturno) **siano migrati all'interno del sistema solare prima della formazione di pianeti terrestri**. I ricercatori hanno basato il loro studio sul modello di Hansen e hanno immaginato lo scenario seguente: prima della formazione di Saturno, Giove potrebbe essere migrato verso il Sole fino all'attuale posizione di Marte (a 1,5 UA dal Sole). Potrebbe poi aver spostato tutto il materiale presente sul suo percorso, portando così alla formazione di un disco di materiale tronco, spesso 0,3 UA, con un bordo esterno a 1 UA dal Sole (il disco che avrebbe formato i pianeti terrestri, appunto, secondo lo studio di Hansen). Saturno, una volta formatosi, sarebbe a sua volta migrato verso il Sole: sotto la sua influenza, Giove potrebbe aver deviato dalla sua orbita ed essere migrato fino a raggiungere la sua posizione attuale (a circa 5 UA dal Sole), oltre la cintura di asteroidi.

Utilizzando numerose simulazioni digitali, i ricercatori hanno mostrato che le migrazioni di Giove e Saturno sono compatibili con la formazione della cintura di asteroidi tra Marte e Giove. Inoltre, sono riusciti a spiegare la coesistenza tra due tipi di asteroidi nella cintura: alcuni a basso, altri ad alto contenuto d'acqua. Secondo lo scenario della migrazione indotta da gas, Giove potrebbe aver intercettato due popolazioni di piccoli corpi celesti durante la sua migrazione. Quelli che sono oggi situati nella parte interna della cintura di asteroidi potrebbero essersi originati dalla zona situata tra 1 e 3 UA dal Sole, mentre quelli che si trovano nella sua parte esterna proverrebbero da un'altra regione, oltre le 5 UA.

“Questo modello indica che i pianeti giganti del nostro sistema solare hanno subito una migrazione radiale, proprio come i pianeti osservati attorno ad altri soli”, spiega **Sean Raymond**, uno degli autori dello studio. Un altro aspetto importante è che questo nuovo modello fornisce una spiegazione dei primi milioni di anni di vita del nostro sistema solare: una storia fatta di numerosi enigmi, finora inspiegati. Il gruppo franco-statunitense lavora attualmente all'inclusione della formazione di Urano e Nettuno in questo nuovo scenario.

Se osserviamo il nome di uno degli sviluppatori di questa teoria, Alessandro Morbidelli, possiamo constatare che egli è uno degli autori della teoria della migrazione planetaria ad opera di un contatto con il disco di planetesimi in rotazione attorno alla stella. L'articolo è stato riportato per intero ed è stato tratto dal sito internet <http://oggiscienza.wordpress.com/2011/06/22/quando-giove-era-al-posto-di-marte/>.

Tale modello non diverge troppo dalla teoria esposta in *PLANET MIGRATION IN PLANETESIMAL DISKS*, poiché vede il pianeta gigante Giove migrare verso l'interno verso la posizione di Marte, poi, entrando in contatto ed espellendo i planetesimi che, collidendo, avrebbero permesso una composizione più massiccia del pianeta rosso. Perché Giove si è fermato e non ha proseguito la migrazione verso l'interno? Probabilmente a causa dell'interazione con Saturno.

Avi Mandell afferma: “ teorizziamo che Giove abbia smesso di migrare verso il SS a causa di Saturno”.

I risultati del team mostrano che Giove e Saturno sono migrati entrambi verso il SS interno, e poi, sempre entrambi, verso l'esterno.

Nel caso di Giove, il gigante gassoso si è situato nell'orbita attuale a circa 5 UA, mentre Saturno ha terminato il suo movimento inizialmente a circa 7 UA e in seguito ha proseguito fino a 9.5 UA.¹³

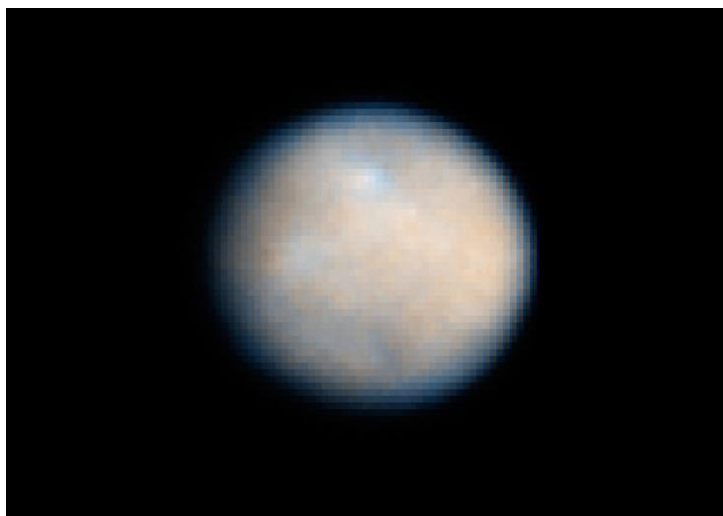
4.2 IL JUPITER HEAVY BOMBARDMENT¹⁴

I ricercatori che hanno sviluppato questo modello investigano sugli effetti che la formazione di Giove ha comportato sulla popolazione di planetesimali durante la prima fase della vita del SS, ovvero la *Solar nebula*.

Più nel dettaglio, il modello sviluppato si basa su due corpi, Vesta¹⁵ e Cerere¹⁶.



4-Vesta



1-Cerere

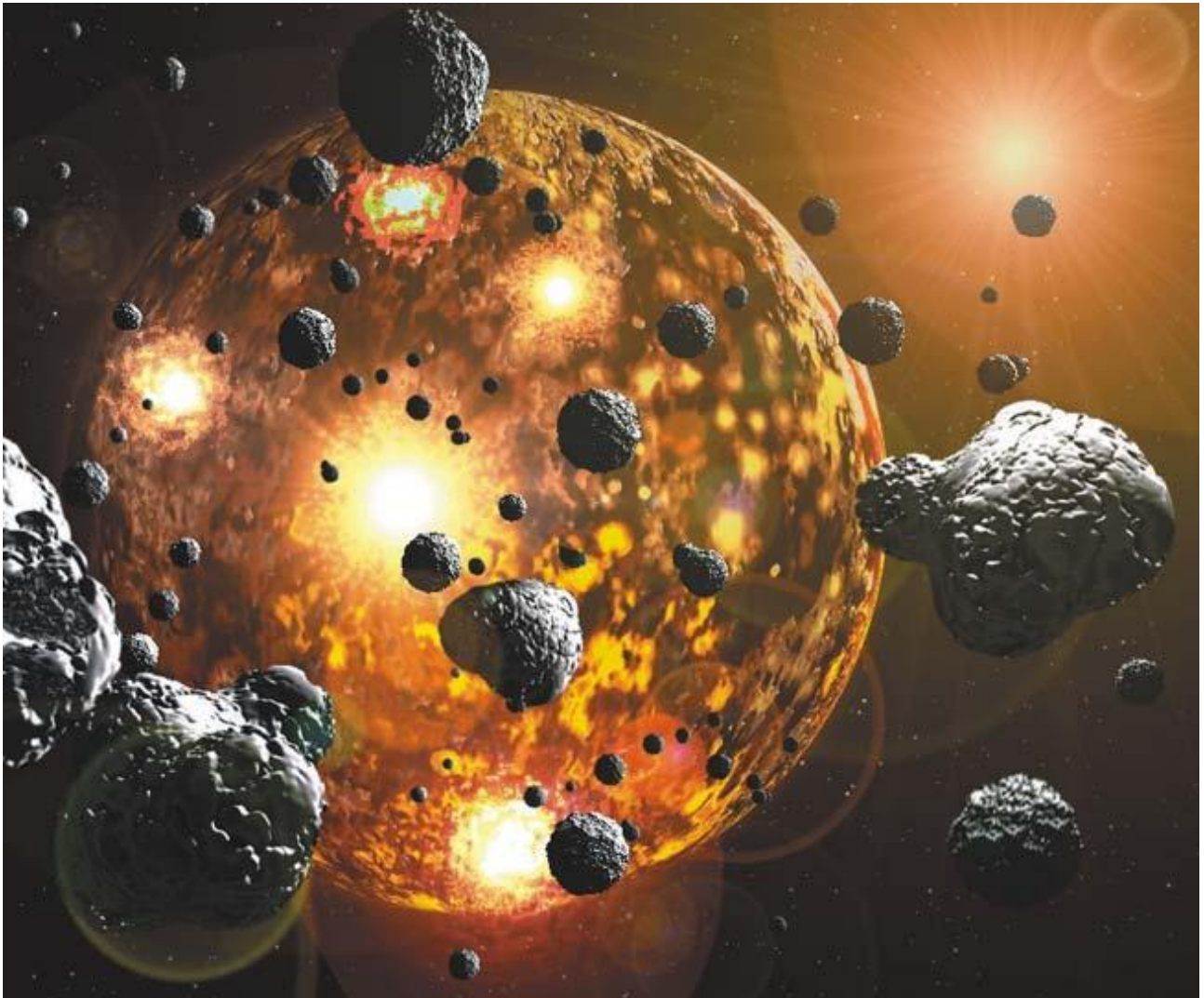
¹³ http://www.ice.csic.es/files/upload_files/File/nature10201_mars_jupiter_migration.pdf

¹⁴ Effects of Jupiter's formation and migration: the Jovian Early Bombardment
D. Turrini, A. Coradini and G. Magni

¹⁵ Vesta è un grande asteroide della Fascia degli Asteroidi, nonché il secondo corpo più massiccio della detta fascia, misura 530 km di diametro.

¹⁶ Cerere è il più massiccio asteroide presente nel SS interno e misura 950km di diametro.

I risultati, sostengono i ricercatori, mostreranno che la formazione di Giove ha innescato un breve, ma intenso, periodo di bombardamento, del quale intensità varia a seconda dal grado e dalla lunghezza della migrazione del gigante gassoso.



I dati che il modello fornirà riguardo Vesta e Cerere permetterà di testare l'ipotesi del *Jupiter Early Bombardment* (JEB) e, possibilmente, di ricavare informazione sui primi stadi della vita del pianeta. Dopo una breve, ma utile, introduzione sulla formazione del SS secondo il modello standard (introduzione che anche noi abbiamo redatto, ai paragrafi 2.8.1 e 2.8.2), gli autori della ricerca giungono a toccare il punto da noi trattato in precedenza, ovvero che, affinché un pianeta gigante gassoso si formi, è necessario che accresca velocemente la sua massa (cfr. capitoli suddetti per approfondimenti). Ciò impone che un corpo con una massa così elevata che si forma in così poco tempo destabilizzi gli equilibri del sistema. Più precisamente, un corpo così massiccio attiva la MMR (capitolo 3.7) fra il corpo stesso e gli altri che occupano la regione orbitale che oggi attribuiamo a quella della Fascia degli Asteroidi. Proseguono poi sostenendo un'affermazione che permette ancora una volta di sottolineare quello che si crede porti all'inizio della migrazione:

“theoretical models predict that giant planets should migrate while accreting their gaseous envelopes due to angular momentum exchange with the circumstellar disk.”

Tradotto:

“modelli teorici predicono che i giganti gassosi dovrebbero migrare, mentre stanno accrescendo il proprio strato gassoso, a causa di scambio di momento angolare con il disco di planetesimali che li circondano.”

Il modello sviluppato non sarà trattato in questa sede, ma per coloro che volessero approfondire questo fenomeno, le referenze sono state citate.

4.2.1 I RISULTATI DEL MODELLO

La formazione rapida di Giove ha, come detto, comportato uno squilibrio nel sistema nel quale esso era presente.

Tale squilibrio ha comportato l'innescò del JEB nella regione orbitale dell'attuale fascia degli asteroidi.

Secondo gli autori, il JEB sarebbe dovuto principalmente dovuto a due popolazioni di planetesimali:

- 1) Planetesimi espulsi dalla MMR con Giove (abbiamo visto che questo fenomeno comporta infatti importanti disturbi orbitali, fino a portare, addirittura, all'espulsione di uno dei corpi in risonanza) secondo un rapporto 3:1 e 2:1 nel SS interno e 7:6 nel SS esterno.
- 2) Planetesimi formati oltre la *Snow Line* e dispersi all'interno del SS da Giove.

Da cosa dipende la sopravvivenza dei due corpi sopraccitati, Vesta e Cerere, all'azione di Giove? Essa dipenderebbe dall'entità della distribuzione dei planetesimi che popolavano la *Solar Nebula*. L'abbondanza di planetesimali, proseguono gli autori, è un fattore chiave nella sopravvivenza dei due corpi, in quanto:

- Se il sistema fosse dominato da corpi massicci (diametro maggiore o uguale a 100km), i due asteroidi non avrebbero potuto sopravvivere e sarebbero stati espulsi
- Se il sistema è dominato da piccoli planetesimi (diametro minore o uguale a 20km), come quelli prodotti da evoluzioni collisionali, lo scenario è molto più favorevole alla sopravvivenza di Vesta e Cerere.

In tutti gli scenari in cui i due corpi sopravvivono al JEB, essi sono stati sottoposti ad un'intensa craterizzazione che ha cosparso la loro superficie con crateri grandi anche 150km.

Stando alla mera assunzione di un'uniforme distribuzione dei crateri, il JEB avrebbe scavato nel

suolo dei due asteroidi almeno 10-15km su Vesta e 20-30 km su Cerere¹⁷.

4.2.2 DISCUSSIONE FINALE DEGLI AUTORI E CONCLUSIONI

I risultati mostrano che la formazione di Giove ha scatenato un periodo di intenso bombardamento, il JEB.

L'intensità del bombardamento a il relativo contributo delle differenti tipologie di popolazioni di planetesimali variano con il grado e il lasso di tempo della migrazione di Giove.

Nello scenario più estremo, ossia quello che vede Giove migrare di 0.5 UA o più e il disco composto in particolar modo da corpi massici, il JEB avrebbe potuto essere abbastanza intenso da causare lo sconvolgimento di corpi del tipo di Vesta e addirittura di Cerere.

Grazie a questo modello è possibile ricavare informazioni utili per meglio comprendere le dinamiche che hanno avuto luogo negli istanti iniziali della *Solar nebula* e del principio del SS.

4.3 L'IMPATTO DELLA MIGRAZIONE DI GIOVE SULLA FORMAZIONE DELLA FASCIA DEGLI ASTEROIDI (*HILDA ASTEROID GROUP* O HAG)¹⁸

Sebbene non tratteremo questo argomento a fondo, ci limiteremo infatti solo a citarne l'abstract, esso potrebbe essere un'ulteriore prova della migrazione di Giove.

L'Hilda asteroid group è un insieme di asteroidi avente posizione nella cintura asteroidale compresa fra Marte e Giove, caratterizzata da una MMR di 3:2 con Giove (per ogni due orbite di Giove attorno al Sole, Hilda ne compie 3).

Le caratteristiche orbitali di HAG sono supposte essere risultate dalla migrazione di Giove verso il Sole durante la formazione del SS.

¹⁷

Turrini D., Magni G., Coradini A., Probing the history of Solar System through the cratering records on Vesta and Ceres, 2011, MNRAS, Online Early, DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18316.x.

¹⁸

HILDA ASTEROIDS AS POSSIBLE PROBES OF JOVIAN MIGRATION

Fred A. Franklin, Nikole K. Lewis,

1

Paul R. Soper, and Matthew J. Holman

CONCLUSIONI

Il fine di questo lavoro di maturità, ossia quello di esporre le dinamiche della migrazione planetaria, sebbene in modo pressoché qualitativo, ma comunque senza banalizzarle, è stato raggiunto.

Come si è visto, quest'ambito è in continua evoluzione. Dall'inizio della ricerca, ossia gennaio 2011, sono già state effettuate nuove scoperte e formulate nuove teorie.

Ci sentiamo di dire che non siamo pienamente soddisfatti del risultato, purtroppo. Essendo, come detto, la sede di questo lavoro soggetta a continue modifiche, causa primaria il fatto che è in costante sviluppo anche nel mentre in cui ci accingiamo a trarre queste conclusioni, non è possibile avvicinare delle considerazioni e/o delle affermazioni definitive e solide, come, del resto, in nessun altro o praticamente nessun altro campo della scienza.

Questo lavoro di maturità testimonia molto bene, al di là del soggetto trattato, come quanto oggi si ritiene essere ciò che meglio spiega la realtà possa, in poco tempo, grazie a nuove osservazioni, essere reso instabile o addirittura non valido.

Il tema delle migrazioni, come visto, è molto dibattuto e ancora non esiste un modello che lo spieghi appieno. È però probabile che, in futuro, coloro che svolgeranno un nuovo e, probabilmente, migliore lavoro di ricerca in questo campo, riescano a giungere a delle conclusioni più definitive.

L'oggetto stesso del lavoro di maturità ha subito una vera e propria migrazione. Ciò che sarebbe voluto e dovuto essere in principio si è evoluto e trasformato. Abbiamo comunque tentato di impegnarci a fondo e lavorare in un campo che non è propriamente il nostro, arrivando a produrre un lavoro, a nostro parere, di non poco valore.

BIBLIOGRAFIA

http://www.atnf.csiro.au/news/results/95Highlights_JupiterProbe.html

<http://www.bo.astro.it/universo/venere/Sole-Pianeti/planets/giostr.htm>

Cesare Guaita, *Alla Ricerca della Vita nel sistema Solare*

Paul A. Tipler, *INVITO ALLA FISICA*

<http://www.adsabs.harvard.edu/abs/2002A&A...394..241T>

<http://www.deepfly.org/TheNeighborhood/7c3-Evolution.html>

[http://it.wikipedia.org/wiki/Formazione di Giove#Migrazione nell.27attuale orbita e cattura dei troiani](http://it.wikipedia.org/wiki/Formazione_di_Giove#Migrazione_nell.27attuale_orbita_e_cattura_dei_troiani)

http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-TTWL198102000.htm

<http://it.wikipedia.org/wiki/Acqua>

[http://fisicaondemusica.unimore.it/Pianeti e risonanze orbitali.html](http://fisicaondemusica.unimore.it/Pianeti_e_risonanze_orbitali.html)

<http://zebu.uoregon.edu/51peg.html>

http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/9801/9801292v1.pdf

[http://it.wikipedia.org/wiki/Momento torcente](http://it.wikipedia.org/wiki/Momento_torcente)

<http://iopscience.iop.org/0004-637X/500/1/428/36904.text.html>

[http://it.wikipedia.org/wiki/Intenso bombardamento tardivo#Migrazione dei pianeti giganti gassosi](http://it.wikipedia.org/wiki/Intenso_bombardamento_tardivo#Migrazione_dei_pianeti_giganti_gassosi)

http://www.lightandmatter.com/html_books/lm/ch15/ch15.html#Section15.1

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2008Icar..196..258L>

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103507006094>

[http://it.wikipedia.org/wiki/Modello di Nizza](http://it.wikipedia.org/wiki/Modello_di_Nizza)

MEAN MOTION RESONANCE

http://crab0.astr.nthu.edu.tw/HEAL/Links/2008_Spring/20080410_Soccer.Report.pdf

<http://web.physics.ucsb.edu/~mhlee/resonances.html>

<http://www.boulder.swri.edu/~hal/PDF/migration.pdf>

[http://www.scholarpedia.org/article/Planetary formation and migration](http://www.scholarpedia.org/article/Planetary_formation_and_migration)

<http://astro.berkeley.edu/~kalas/disksite/library/levison06a.pdf>

<http://www.webalice.it/mizar02/articoli/MorNatu2.pdf>

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1101.3776W>

<http://oggiscienza.wordpress.com/2011/06/22/quando-giove-era-al-posto-di-marte/>

<http://arxiv.org/abs/1009.4525>

[http://queensu.academia.edu/ChristopherCapobianco/Talks/50825/Planetesimal-Driven Migration of Giant Planetary Cores in the Presence of a Gas Disk](http://queensu.academia.edu/ChristopherCapobianco/Talks/50825/Planetesimal-Driven%20Migration%20of%20Giant%20Planetary%20Cores%20in%20the%20Presence%20of%20a%20Gas%20Disk)

<http://iopscience.iop.org/0004-637X/653/2/1464>

<http://www.nature.com/nature/journal/v475/n7355/full/nature10201.html>

<http://www.universetoday.com/88374/how-did-jupiter-shape-our-solar-system/>

http://www.ice.csic.es/files/upload_files/File/nature10201_mars_jupiter_migration.pdf

<http://iopscience.iop.org/1538-3881/128/3/1391/pdf/204076.web.pdf>

http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/9910/9910155v1.pdf