

ALMA Mater Studiorum
Università degli Studi di Bologna

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Astronomia

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Proprietà generali dei pianeti del Sistema Solare e
ricerca di pianeti esterni

Elaborato Finale

Candidato:
Davide Cammareri

Relatore:
Prof. Daniele Dallacasa



Sessione II
Anno Accademico 2014-2015

Sommario

In quest'elaborato verranno trattate le caratteristiche fisiche, chimiche e morfologiche dei pianeti che compongono il Sistema Solare, escludendo però la Terra, in quanto lo studio del globo terrestre, seppur interessante, è argomento di geologia; per cui si è deciso di non descriverne le proprietà, anche se verrà usata la sua massa e il suo raggio come unità di riferimento per tutti i pianeti. Non verranno trattate questioni dinamiche come il problema di Keplero a più corpi e le risonanze orbitali, in quanto quest'argomento è già presente nell'elenco titoli degli elaborati delle laure triennali di Astronomia, per cui si esulerebbe dallo scopo di quest'elaborato; ci si limiterà dunque, soltanto ad accennare alcune questioni solo dove necessario.

L'elaborato è suddiviso in varie sezioni: nella prima si farà un breve inventario di ciò che comprende il Sistema Solare e alle fasi della sua formazione che lo hanno portato alla sua attuale configurazione, nella seconda si analizzeranno le proprietà che definiscono i pianeti da un punto di vista fisico e le condizioni per cui assumono determinate caratteristiche, quali la forma, la temperatura di equilibrio, la presenza o meno di atmosfere e magnetosfere. Successivamente si passerà ad analizzare sommariamente, sotto le condizioni descritte nella sezione precedente, le proprietà caratteristiche di ciascun pianeta mettendo in evidenza analogie e differenze fra ciascun corpo. Dopo una breve sezione sui corpi minori e sulle decisioni che hanno portato a non considerare alcuni di questi corpi più come pianeti, si passerà a descrivere alcuni metodi di ricerca, grazie ai quali sono stati scoperti numerosi pianeti extrasolari. In appendice si riporteranno il significato di tutti i simboli e i valori delle costanti utilizzati spesso durante la stesura dell'elaborato.

Indice

1	Panoramica sul Sistema Solare	1
2	Proprietà Fisiche dei Pianeti	2
2.1	Forma dei Pianeti	2
2.2	Albedo e Stima della Temperatura Superficiale	3
2.3	Atmosfere e Magnetosfere	4
3	Morfologia e Struttura dei Pianeti	6
3.1	I Pianeti Rocciosi	6
3.2	I Giganti Gassosi	8
3.2.1	I Giganti Ghiacciati	10
4	Pianeti Nani e Corpi Minori	11
4.1	Composizione e Dimensioni dei KBOs e TNOs	11
5	Ricerca di Pianeti Extrasolari	13
5.1	Astrometria	13
5.2	Transiti	13
5.3	Velocità Radiali	14
5.4	Micro-lenti Gravitazionali	14
5.5	Imaging	15
6	Appendice	16

*“Il Sistema Solare comprende
il Sole, Giove e detriti vari”
Arthur Charles Clarke*

1 Panoramica sul Sistema Solare

L'ipotesi più accreditata riguardo la sua formazione vede la presenza di una nube di gas e polveri, che circa 4,6 miliardi di anni fa in seguito all'instabilità di Jeans¹ causata probabilmente dall'onda d'urto provocata dall'esplosione di una supernova vicina, collassò su se stessa per effetto della forza gravitazionale, formando una protostella. Durante il collasso al suo centro si raggiunsero temperature e pressioni tali da innescare le reazioni di fusione nucleare dell'idrogeno che sostengono ancora oggi il Sole, attorno al quale si formò per conservazione del momento angolare il disco proto-planetario, costituito da corpi rocciosi di forma irregolare dalle dimensioni di qualche chilometro detti **planetesimi**. Sempre grazie all'attrazione gravitazionale reciproca che questi corpi esercitavano fra di loro, nell'arco di qualche decina di migliaia di anni questi planetesimi si aggregarono formando dei corpi dalle dimensioni di qualche centinaio di chilometri di diametro chiamati **protopianeti**, i quali attraverso l'accumulo di masse più piccole presenti nella loro orbita crebbero ulteriormente fino alle dimensioni odierne. Questo processo chiamato *orbital cleaning*, svuotò lo spazio attorno ai protopianeti che insieme ad altri processi di frizione mareali e risonanze orbitali portò alla separazione attuale osservabile fra i **pianeti**.

Attualmente il Sistema Solare consiste in una stella centrale di dimensioni e luminosità medie chiamata Sole dove è concentrata il 99.85% della massa del Sistema Solare, attorno alla quale orbitano otto pianeti (Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno) con i rispettivi satelliti, svariati pianeti nani, milioni di asteroidi, comete, meteore e oggetti trans-nettuniani (TNOs).

La distinzione fra le categorie di oggetti non è ben definita, ma dal 2006 l'*International Astronomical Union* (IAU), a seguito di nuove scoperte di oggetti trans-nettuniani ha distinto tre categorie fondamentali di oggetti:

- **Pianeta:** è in orbita ellittica con bassa eccentricità percorsa nello stesso verso degli altri pianeti attorno al Sole, complanare al piano dell'eclittica, in maniera tale da presupporre un'origine comune. Ha una massa sufficiente per la sua autogravità tale da superare le forze di corpo rigido in modo che grazie all'equilibrio idrostatico assume una forma pressochè sferica, inoltre ha ripulito la sua orbita da oggetti più piccoli. A loro volta i pianeti sono suddivisi in due categorie: i pianeti interni rocciosi (o terrestri) di cui la Terra è il capostipite e i giganti gassosi (o gioviani) di cui appunto Giove ne è il capostipite.
- **Pianeta Nano:** ha le stesse caratteristiche fisiche del pianeta, ma con un'orbita che può essere anche molto eccentrica e non necessariamente complanare con gli altri corpi, e data la sua piccola massa non ha gravità sufficiente a ripulire la sua orbita da oggetti più piccoli e non è un satellite.
- **Corpi Minori:** Sono tutti gli altri corpi di piccola massa con una forma non ben definita che orbitano attorno al Sole, in quanto non tutti i planetesimi diedero origine ai pianeti. Quelli rocciosi e metallici andarono a costituire gli asteroidi collocati fra le orbite di Marte e Giove, mentre quelli prevalentemente di ghiaccio formarono le comete, e molti degli oggetti trans-nettuniani. Questi ultimi sono dislocati principalmente in due regioni: la fascia di Edgeworth-Kuiper oltre l'orbita di Nettuno, e la Nube di Oort che è ancora più esterna e rappresenta l'estremo limite del Sistema Solare.

¹L'instabilità di Jeans è un argomento di fluidodinamica e non verrà trattato in quest'elaborato.

2 Proprietà Fisiche dei Pianeti

Come già accennato in precedenza i pianeti sono suddivisi in due categorie: i pianeti interni o terrestri hanno un raggio orbitale compreso fra le 0,38 e 1,5 UA; mentre i giganti gassosi esterni distano dal Sole dalle 5 alle 30 UA. Le due categorie hanno caratteristiche fisiche diversissime fra loro sia per composizione, massa, volume e conseguente densità; in quanto i pianeti rocciosi hanno una massa compresa fra $0,05-1 M_{\oplus}$, un raggio dell'ordine di $0,3-1 R_{\oplus}$ e sono caratterizzati da un'elevata densità compresa fra $4-5 \text{ g/cm}^3$; mentre quelli gassosi hanno una massa fra $15-319 M_{\oplus}$, un raggio fra $5-11 R_{\oplus}$, con conseguente bassa densità intorno a 1 g/cm^3 che non gli permette di avere superficie solida; in quanto la densità ρ è proporzionale all'inverso del cubo del raggio.

2.1 Forma dei Pianeti

L'equilibrio idrostatico fa sì che la superficie del corpo segue una superficie equipotenziale con la gravità, ma a causa della resistenza interna, può succedere che esso assuma la forma di un ellissoide di rotazione, quindi un pianeta rotante attorno al proprio asse risulterà sempre appiattito ai poli. Definiamo *dynamical flattening* la quantità f data dall'equazione:

$$f = \frac{R_e - R_p}{R_e}$$

dove R_e è il raggio equatoriale, mentre R_p è quello polare e avendo assunto $R_e > R_p$ essa sarà sempre positiva. Questa quantità sarà trascurabile per i corpi di natura rocciosa con velocità di rotazione moderata, mentre è più importante per i giganti gassosi che data la bassa densità $\rho \sim 1 \text{ g/cm}^3$ e l'elevata velocità di rivoluzione attorno al proprio asse compiuta in massimo 17 ore, assume un valore anche di 0,1 per cui risulta distinguibile anche ad occhio nudo, in quanto il periodo di rotazione si avvicina al valore di smembramento per forza centrifuga, che per un pianeta di massa M e raggio R è ottenuto eguagliando la forza centrifuga alla forza gravitazionale:

$$\frac{GMm}{R^2} = \frac{mv^2}{R}$$

dove m è una piccola massa di test posta sulla superficie del corpo che si elide nel conto. Sostituendo nell'equazione il periodo P di rotazione:

$$P = \frac{2\pi R}{v}$$

otteniamo:

$$\frac{GM}{R^2} = \frac{4\pi^2 R}{P^2}$$

che risolvendola rispetto a P ricaviamo il periodo minimo:

$$P = \sqrt{\frac{3\pi}{G\rho}}$$

dove possiamo notare che rimane solo la dipendenza da ρ al denominatore, per cui sostituendo la densità media di un pianeta gassoso di circa 1000 Kg/m^3 otterremo un periodo minimo di circa 3 ore, che è comunque lontano a quello misurato di circa 10 ore, ma molto più prossimo a quello dei pianeti rocciosi che hanno periodi di rotazione che vanno dalle 24 ore ai 243 giorni e densità più elevate con conseguente periodo minimo di circa 2 ore.

2.2 Albedo e Stima della Temperatura Superficiale

Il campo di radiazione solare è una delle principali fonti di energia che scaldano i pianeti. Per un pianeta posto a distanza D dal Sole, il flusso di radiazione teorica incidente per unità di superficie sarà:

$$F = \frac{L_{\odot}}{4\pi D^2}$$

Questa quantità, che nel caso della Terra vale 1370 W/m^2 e prende il nome di costante solare, è molto importante per definire la zona abitabile nei sistemi extrasolari; in quanto se cade in un range di valori compreso fra 2000 e 1000 W/m^2 ci permette di ipotizzare la presenza di acqua allo stato liquido e quindi un possibile sviluppo di forme di vita, dove però al posto di L_{\odot} dovremo sostituire la luminosità della stella presa in considerazione.

Nel calcolo della temperatura superficiale entrano in gioco altri parametri che possono far discostare molto il valore ottenuto da quello teorico. Questi parametri possono essere: l'albedo, l'effetto serra (Venere è il caso più eclatante) o possibili fonti interne di calore come nel caso di Giove².

L'albedo di ogni pianeta può essere calcolato, note le sue dimensioni e le distanze dalla Terra e dal Sole, misurandone la luminosità apparente e confrontandola con quella di vari materiali sulla Terra per ottenere informazioni sulle proprietà fisiche e la composizione chimica della sua superficie o atmosfera. Per un pianeta di raggio R a distanza D dal Sole la quantità totale di flusso ricevuto integrato su tutte le lunghezze d'onda sarà:

$$F_{in} = \pi R^2 \frac{L_{\odot}}{4\pi D^2} = \frac{L_{\odot} R^2}{4D^2}$$

di cui una parte viene assorbito e convertito in emissione termica da parte del pianeta, mentre quella non assorbita viene riflessa e indicata con F_{out} che sarà pari a:

$$F_{out} = AF_{in}$$

Il rapporto $F_{out}/F_{in} = A$ prende il nome di *albedo di Bond* e sarà un numero compreso fra 0 (per una superficie perfettamente assorbente) e 1 (per una superficie completamente riflettente). In altre parole l'albedo di Bond indica il potere riflettente che possiede un corpo.

Tenendo conto dell'albedo possiamo stimare la temperatura di equilibrio di un corpo in quanto la potenza assorbita sarà:

$$P_{abs} = (1 - A)F_{in} = (1 - A) \frac{L_{\odot} R^2}{4D^2}$$

Mentre quella irradiata, assumendo l'emissione di un corpo nero che emana la stessa potenza complessiva del pianeta, sarà:

$$P_{em} = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4$$

eguagliando le due quantità $P_{abs} = P_{em}$ otteniamo:

$$T_{eff} = \sqrt[4]{\frac{(1 - A)L_{\odot}}{16\pi\sigma D^2}}$$

²Per temperatura superficiale nei giganti gassosi si intende la temperatura al livello in cui la pressione è di 1 Bar .

Questa espressione definisce la temperatura effettiva, dove possiamo notare una dipendenza di $(1 - A)$ al numeratore, quindi possiamo affermare che l'albedo agisce da meccanismo di raffreddamento per i pianeti, ma come detto in precedenza a causa dell'effetto serra o meccanismi di emissione termica si può scostare ulteriormente da quella stimata.

2.3 Atmosfere e Magnetosfere

Con *atmosfera* si intende un alone di gas in equilibrio idrostatico dato dalla seguente equazione differenziale:

$$\frac{dP}{P} = -g \frac{\mu}{kT} dh$$

che avvolge il pianeta. Dove la pressione interna P che tende a farlo espandere, a causa dei gas tendenti ad occupare tutto il volume a loro disposizione, è bilanciata dall'accelerazione di gravità g che tende ad attrarlo in superficie e μ è la massa atomica o molecolare delle particelle del gas che compongono l'atmosfera. Risolvendola rispetto a P otteniamo:

$$P = P_0 \exp\left(-\int_0^h \frac{\mu g}{kT} dh\right) = P_0 \exp\left(-\int_0^h \frac{dh}{H}\right)$$

dove P_0 è la pressione a quota $h = 0$, mentre la quantità $H = kT/\mu g$ prende il nome di *fattore di scala*, ovvero l'altezza oltre la quale la pressione decresce di un fattore e , grazie al quale possiamo approssimare ogni strato di spessore H all'equilibrio termodinamico, in cui la distribuzione in velocità delle particelle che lo compongono è descritta dalla distribuzione di Maxwell-Boltzmann data dalla seguente equazione:

$$f(v)dv = N \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\mu v^2} dv$$

dove N rappresenta la densità locale delle particelle.

La condizione per la permanenza dell'atmosfera da parte di un pianeta è in accordo con la teoria cinematica del gas, in cui la velocità statisticamente più probabile che le particelle assumono ad una data temperatura, deve essere molto minore alla velocità di fuga dal suo campo gravitazionale.

Definiamo la velocità più probabile come:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{\mu}}$$

che rappresenta il picco della distribuzione di Maxwell-Boltzmann ad una data temperatura T , mentre la velocità di fuga per un pianeta di massa M e raggio R è data da:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Se $v_e \gg \bar{v}$ allora il pianeta manterrà la sua atmosfera per miliardi di anni, viceversa se la velocità \bar{v} si avvicina alla v_e si innescherà il meccanismo di evaporazione gravitazionale noto con il nome di *Jean Escape*. In tale processo le particelle con velocità più elevata di v_e costituenti la coda della distribuzione di Maxwell-Boltzmann, sfuggono al campo gravitazionale e per mantenere invariato il profilo della distribuzione, verranno

rimpiazzate da altre che prima si trovavano a velocità inferiori, riducendone la densità atmosferica, fino a quando non verranno disperse tutte nello spazio, lasciando il pianeta privo di atmosfera ed esposto al vento solare. Eccetto Mercurio, tutti i pianeti del Sistema Solare sono provvisti di atmosfera.

La *magnetosfera* è una regione che circonda quasi tutti i pianeti e alcuni satelliti, dove è presente un campo magnetico prodotto per effetto dinamo³ da parte dei corpi stessi. Essa deflette le particelle elettricamente cariche del vento solare confinandole in una regione toroidale che circonda i corpi dal diametro di qualche raggio planetario, proteggendone le atmosfere; in quanto il vento solare tende a strapparle via. Ha la forma allungata in direzione opposta al Sole ed è suddivisa in diverse regioni: il *bow shock* che si trova in direzione del Sole a una distanza di qualche decina di raggi planetari appiattito dalla pressione del vento solare, la *magnetopausa* ossia il punto in cui la pressione della magnetosfera controbilancia il vento solare, la quale si va a chiudere nella *magnetotail* situata in direzione opposta rispetto al Sole che può arrivare anche a una distanza di svariati milioni di chilometri dal pianeta preso in considerazione.

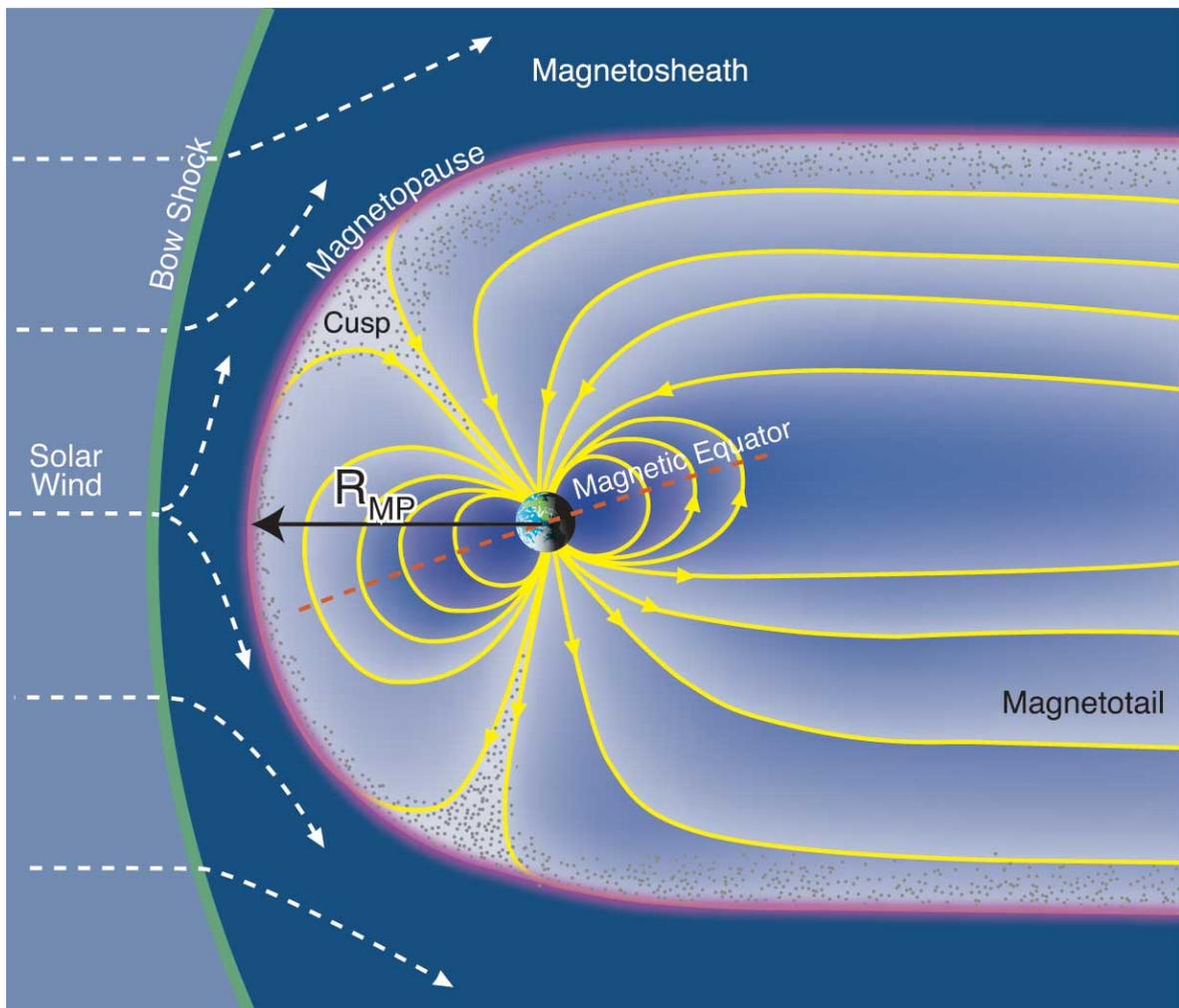


Figura 1: Esempio di magnetosfera

³Le correnti elettriche presenti nei nuclei metallici fluidi grazie alla rotazione del pianeta (legge di Faraday-Neumann-Lenz) generano campo magnetico.

3 Morfologia e Struttura dei Pianeti

Grazie alle sonde inviate dal 1966 (la Venera 3 fu la prima ad atterrare su un altro pianeta) fino ad oggi, si è permesso di effettuare misure sul campo e scoprire più da vicino composizione e caratteristiche atmosferiche e superficiali dei pianeti, per comprenderne meglio le proprietà e farne ipotesi sulla loro struttura interna.

3.1 I Pianeti Rocciosi

Secondo i modelli di formazione planetaria che abbiamo a disposizione, si sono formati in una regione dove le alte temperature causate dal Sole non hanno permesso l'aggregazione di elementi leggeri e volatili.

Mercurio

È il pianeta più piccolo del Sistema Solare con un raggio orbitale medio di 0,39 UA ed è il più vicino al Sole. La sua orbita con un'eccentricità di 0,2 e un'inclinazione di 7° sul piano dell'eclittica, risulta essere la più eccentrica ed inclinata dei pianeti del Sistema Solare. Ciò è dovuto agli effetti perturbativi dovuti al momento di quadrupolo causato dallo schiacciamento polare del Sole unito ad effetti di relatività generale⁴.

Si tratta di un mondo sterile privo di atmosfera, in quanto la sua vicinanza al Sole unita alla piccola massa di circa $1/20 M_{\oplus}$ non gli consente di avere gravità sufficiente a contrastare l'agitazione termica delle particelle per trattenere l'atmosfera. La sua superficie ricoperta da crateri da impatto che a causa anche dell'assenza di atmosfera che schermo dalle meteore e ne erode lo strato più esterno, indicano che Mercurio è geologicamente inattivo ormai da circa 3-4 miliardi di anni. Sempre a causa della debolissima atmosfera che non svolge alcun ruolo nella redistribuzione del calore e della lenta rotazione attorno al proprio asse effettuata in 58 giorni, in risonanza 2:3 con il periodo di rivoluzione attorno al Sole di 88 giorni, abbiamo escursioni termiche elevatissime fra giorno in cui la temperatura è di 670K e notte dove scende a 100K; questo è uno dei pochi casi in cui la temperatura stimata si avvicina a quella misurata.

Grazie alla presunta presenza di un nucleo metallico fuso elettricamente conduttore, la cui massa stimata è circa il 70% del pianeta, è presente un campo magnetico che a causa della lenta rotazione risulta debolissimo, (circa 1% di quello terrestre).

Mercurio non ha satelliti naturali.

Venere

È il pianeta più simile alla Terra per massa e volume (circa 86% di quelle terrestri in quanto ha densità analoga) con un raggio orbitale pari a circa 0,72 UA che si mantiene pressoché costante durante la sua rivoluzione. La caratteristica particolare di questo pianeta è la sua rotazione attorno al proprio asse compiuta in 243 giorni più lunga del periodo di rivoluzione di 225 giorni effettuata in maniera *retrograda* ovvero da est verso ovest, in quanto i pianeti tendono a ruotare attorno al proprio asse nella direzione in cui orbitano attorno al Sole.

Si ritiene che in passato il pianeta potrebbe aver ospitato oceani, ma data la sua vicinanza al Sole evaporarono 3 miliardi di anni dopo la sua formazione liberando anidride carbonica dalle rocce che lasciavano scoperte, disperdendola nell'atmosfera. L'anidride carbonica rilasciata provocò un effetto serra incontrollato e oggi rappresenta il 96%

⁴il problema di Keplero in teoria perturbativa e relatività generale è molto complesso e non verrà trattato in quest'elaborato.

della componente atmosferica, la cui pressione è 90 volte quella dell'atmosfera terrestre. Misure radio già negli anni '60 ci hanno permesso di stimare la temperatura della superficie del pianeta di circa 750K. La densa atmosfera che ne ridistribuisce il calore e l'effetto serra che lo imprigiona, fanno sì che la temperatura rimanga pressoché costante sia di giorno che di notte, nonostante la lentissima rotazione. Si calcola che, se Venere non avesse atmosfera e la sua superficie potesse irraggiare liberamente l'energia solare assorbita, essa dovrebbe avere temperatura inferiore ai 375K.

Su Venere distinguiamo due zone riconducibili all'idea di continenti in quanto si elevano qualche chilometro al di sopra dell'altezza del raggio medio del pianeta e sono: la *Terra di Ishtar* nell'emisfero nord e la *Terra di Afrodite* nella zona sud-equatoriale.

Le scansioni radio della superficie effettuate dalla sonda Magellano hanno evidenziato la presenza di zone opache ai radar, in quanto l'atmosfera ancora non ha eroso lo strato superficiale della lava mettendo a nudo il solfureo di ferro riflettente alle onde radio presente nelle rocce basaltiche; ciò vuol dire che Venere è geologicamente attivo e che abbia una struttura interna simile alla Terra, ma a causa della lentissima rotazione il pianeta risulta essere privo di campo magnetico. Venere non ha satelliti naturali.

Marte

Alla distanza media di circa 1,52 UA di raggio orbitale troviamo Marte, con una significativa eccentricità orbitale di 0,09 che fa sì che le temperature varino in media di 30K fra perielio e afelio. Ha una massa circa $1/10 M_{\oplus}$ e un raggio pari a $1/2 R_{\oplus}$.

Possiede una tenue atmosfera composta per il 95% da anidride carbonica e l'altro 5% da tracce di altri elementi come azoto e argon con una temperatura superficiale compresa fra 130K e 293K.

All'osservazione appare del caratteristico colore rossiccio, dovuto all'abbondanza di ossido di ferro presente sulla sua superficie, che presenta una fitta e complessa rete di canali che si diramano per migliaia di chilometri i quali ricordano i letti di fiumi, in quanto si ritiene che in passato anche Marte possa aver ospitato oceani, la cui acqua oggi si ipotizza si sia infiltrata nel sottosuolo; è questo il motivo per cui è senza dubbio il più studiato dei pianeti del Sistema Solare, in quanto si cerca di trovare acqua allo stato liquido. Grazie all'inclinazione assiale di 24° sul piano dell'eclittica presenta stagioni analoghe a quelle terrestri, rivelate grazie allo scioglimento e congelamento periodico delle calotte polari composte per lo più da ghiaccio secco e in minima parte anche da ghiaccio d'acqua che a causa della bassissima pressione atmosferica, circa 1% di quella terrestre, durante l'estate sublima⁵ formando delle nubi simili a dei cirri.

Su Marte non vi sono evidenze di attività geologica in corso, anche se c'è stata sicuramente in passato; confermata dalla presenza di strutture vulcaniche dalle dimensioni colossali come l'*Olympus Mons*, che con i suoi 27 Km di altezza è la montagna più alta del Sistema Solare. La formazione di tali strutture dimostra la mancanza di una tettonica a zolle come sulla Terra, in quanto senza placche continentali in movimento, il magma è fuoriuscito accumulandosi solo in pochi punti.

Il fatto di essere geologicamente inattivo è confermato anche dall'assenza di campo magnetico a livello globale, segno che il suo nucleo si sia raffreddato e non si trova più allo stato fluido, bensì allo stato viscoso, non più in grado di generare effetto dinamo; lasciando così l'atmosfera esposta al vento solare. Grazie ad un magnetismo crostale permanente sono presenti dei debolissimi campi magnetici distribuiti a "macchia di leopardo" sulla superficie.

⁵il diagramma di fase dell'acqua non verrà discusso in quest'elaborato.

Marte ha due piccoli satelliti naturali: *Phobos* e *Deimos* dalla forma irregolare la cui origine è ancora oggi incerta, probabilmente si tratta di due asteroidi catturati dall'attrazione gravitazionale del pianeta.

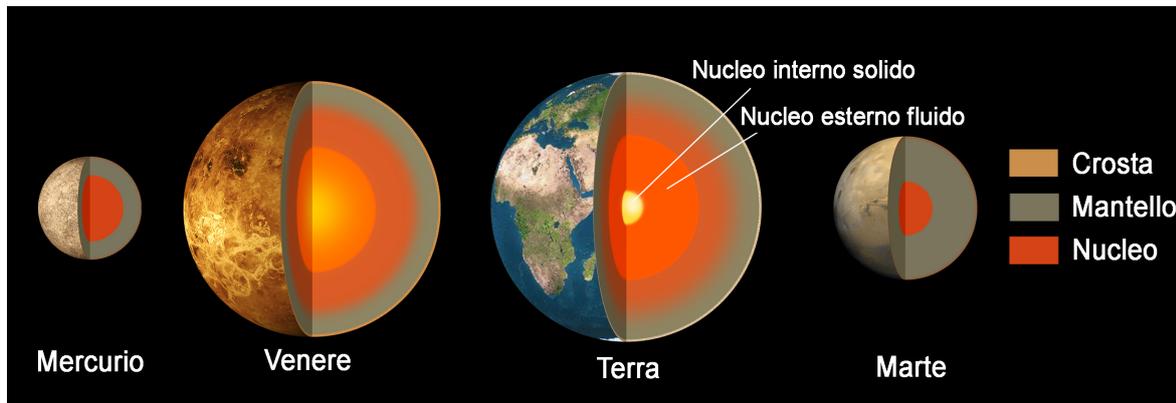


Figura 2: Struttura e proporzioni dei pianeti rocciosi (Terra compresa).

3.2 I Giganti Gassosi

Si sono formati a una distanza dal Sole sufficiente per mantenere involucri gassosi assai imponenti⁶ che circondano nuclei solidi rocciosi e metallici comuni a tutti che ne costituiscono circa il 5-10% della massa totale di ciascun pianeta.

Giove

Dista 5,2 UA dal Sole e con la sua massa di $319 M_{\oplus}$ da solo costituisce il 70% della massa di tutti i pianeti del Sistema Solare, con una densità $\rho \sim 1,3 \text{ g/cm}^3$.

Non trattandosi di un corpo rigido effettua una *rotazione differenziale* in appena 9h50m all'equatore e 9h55m ai poli che fa sì che presenti uno schiacciamento polare $f \sim 0,06$. È composto principalmente da idrogeno ed elio, le cui abbondanze relative sono circa le stesse di quelle presenti nel Sole, anche se l'abbondanza di elio risulta leggermente inferiore rispetto al Sole in quanto Giove non è riuscito ad accumulare abbastanza massa per innescare le reazioni di fusione nucleare che convertono l'idrogeno in elio, guadagnandosi l'appellativo di *stella mancata*. Tuttavia sembra che per un meccanismo noto con il nome di *Kelvin-Helmholtz*⁷, secondo il quale il pianeta converte la sua energia potenziale gravitazionale in energia termica comprimendosi adiabaticamente, Giove è in grado di irradiare una quantità di energia sotto forma di radiazione infrarossa, circa 1,7 volte superiore quella ricevuta dal Sole.

L'atmosfera è composta essenzialmente dagli stessi elementi che compongono il pianeta ed è l'unica struttura visibile di Giove. Presenta delle fasce parallele all'equatore: quelle con una colorazione rossiccia dove le temperature sono più elevate prendono il nome di *bande*, quelle più fredde di colore bianco sono definite *zone*. Il calore rilasciato fa sì che si creino delle correnti a getto e dei moti convettivi lungo le fasce e zone, e delle tempeste di notevoli dimensioni. Il dettaglio più famoso è la *Grande Macchia Rossa*: si tratta di un uragano dalle dimensioni circa doppie rispetto la Terra nell'emisfero sud

⁶Sono stati scoperti giganti gassosi in sistemi extrasolari con orbite più strette di quella di Mercurio che non coincidono con i nostri modelli di formazione planetaria, per cui si ritiene che in quei casi abbiano subito migrazioni orbitali.

⁷Richiede una trattazione più approfondita che per motivi redazionali non è possibile affrontare.

del pianeta, scoperta da Cassini nel 1665 e da allora rimasta pressochè immutata. Trattandosi di un gigante gassoso l'atmosfera transisce gradualmente con gli strati più interni del pianeta dove ad una profondità di circa 0,3 raggi planetari la temperatura raggiunge i 10.000K, sufficiente a ionizzare l'idrogeno e farlo diventare un buon conduttore elettrico. Questo fenomeno, unito all'elevata rotazione attorno al proprio asse, fa sì che Giove abbia la magnetosfera più grande di tutto il Sistema Solare con la magnetotail che si estende fino all'orbita di Saturno, la cui intensità risulta essere 12 volte quella del campo magnetico terrestre, ma con polarità invertita. Possiede un debole sistema di anelli planetari scoperto dalla sonda Voyager 1 nel 1979 e attualmente sono noti più di 60 satelliti, quattro dei quali di grandi dimensioni. Scoperti da Galileo nel 1610 sono rispettivamente: *Io*, *Europa*, *Ganimede* e *Callisto*; di questi gli ultimi 2 sono più grandi di Mercurio e presentano un debole campo magnetico, mentre su Io è presente del vulcanismo in corso e su Europa si ritiene che sotto la sua crosta di ghiaccio vi sia un oceano di acqua liquida.

Saturno

Dista dal Sole 9,5 UA e la sua orbita è in risonanza 2:3 con quella di Giove. Ha una massa di $95 M_{\oplus}$ e la densità media più bassa di tutti i pianeti pari a $\rho \sim 0,7 \text{ g/cm}^3$ che unita alla rotazione effettuata sempre in maniera differenziale in appena poco più di 10 ore all'equatore e in quasi 11 ai poli, presenta il maggior schiacciamento polare di tutti i pianeti, pari a $f \sim 0,1$, per cui facilmente riscontrabile al telescopio.

E' composto essenzialmente dagli stessi elementi che compongono Giove e il Sole ovvero il 75% di idrogeno e il 25% di elio con tracce di altri composti più complessi come ammoniaca e metano. Anche Saturno ha un meccanismo di emissione termica dovuto allo sprofondamento degli strati di elio più pesanti nell'oceano di idrogeno che lo compone, grazie al quale riesce ad emettere 2,8 volte il flusso di radiazione che riceve dal Sole, ma trovandosi ad una distanza approssimativamente doppia rispetto Giove ne riceve circa 1/4, in quanto il flusso decresce come D^{-2} . Per cui esso irradia, sempre sottoforma di radiazione infrarossa, circa il 40% della potenza emessa da Giove.

Anche nell'atmosfera di Saturno si alternano *bande scure* e *zone* chiare, parallele all'equatore dove sono riconoscibili perturbazioni di tipo ciclonico e formazioni di nubi. Saturno però, essendo più freddo rispetto a Giove, presenta caratteristiche meno marcate a causa delle fitte nebbie che sovrastano le nubi; in quanto gli strati nuvolosi condensano più in basso nell'atmosfera e appaiono sfumati dalle nebbie e dalla spessa massa atmosferica sovrastante.

Come tutti i giganti gassosi l'atmosfera transisce gradualmente negli stati più interni del pianeta dove però le temperature necessarie a ionizzare l'idrogeno si raggiungono a una profondità di circa 0,6 raggi planetari, creando una nucleo di idrogeno metallico che anche se molto più piccolo rispetto a quello di Giove, il campo magnetico generato risulta più debole di quanto voluto teoricamente, ovvero il 20% più debole rispetto a quello terrestre e circa 1/20 di quello gioviano.

E' provvisto di un vistoso e complesso sistema di anelli spessi circa 1 km che si estendono da 6.700 a 120.000 km al di sopra della sommità delle nubi, la cui origine risulta sconosciuta. Hanno un albedo di 0,6, per cui risultano essere più riflettenti del pianeta stesso che ha un albedo di 0,47. Sono composti principalmente da piccolissimi corpi di roccia e ghiaccio dalle dimensioni che vanno da qualche micron fino a qualche metro, la cui distribuzione in volume sembra assumere un andamento esponenziale decrescente. Sono noti circa 60 satelliti, 8 dei quali di modeste dimensioni, tra cui *Titano* supera Mercurio ed è l'unico satellite a presentare una densa e complessa atmosfera.

3.2.1 I Giganti Ghiacciati

Urano e Nettuno non erano noti nell'antichità come tutti gli altri; il primo fu scoperto nel 1781 da Herschel, mentre la scoperta di Nettuno nel 1846 è attribuita a Leverrier. Tale scoperta rappresentò il trionfo della gravitazione newtoniana, in quanto l'orbita di Urano non coincideva con le previsioni basate sulla legge di Newton. Si pensò dunque di verificare se oltre Urano vi fossero altri corpi che ne perturbassero l'orbita.

Urano

Dista dal Sole mediamente 19 UA, ha massa pari a $14,5 M_{\oplus}$ e densità $\rho \sim 1,3 \text{ g/cm}^3$. Effettuando una rotazione intorno al proprio asse in poco più di 17 h non presenta un evidente schiacciamento polare che si appresta intorno a $f \sim 0,02$. Urano analogamente a Venere effettua una rotazione di tipo *retrograda*, ma con l'asse di rotazione inclinato di 98° rispetto al piano dell'eclittica, conferendogli una caratteristica anomala rispetto agli altri pianeti che hanno un'inclinazione assiale compresa fra 0° e 26° .

L'atmosfera è composta principalmente da idrogeno ed elio con un'abbondanza più elevata ($\sim 2\%$) di idrocarburi più complessi come metano e ammoniaca che gli danno una colorazione verdastra uniforme, raramente solcata da nubi, in quanto trovandosi alla temperatura di equilibrio con la radiazione solare ricevuta non presenta evidenti segni di turbolenze.

La struttura di Urano sembra essere diversa dagli altri pianeti gassosi, in quanto non ha abbastanza massa per raggiungere al suo interno la temperatura necessaria a ionizzare l'idrogeno. I modelli suggeriscono che sotto il mantello di idrogeno ed elio vi sia un nucleo di ammoniaca e metano dissociati in acqua a causa della pressione. Questa miscela elettrolitica, grazie ai suoi moti convettivi, genera un campo magnetico di intensità paragonabile a quello terrestre, inclinato di 60° rispetto all'asse di rotazione. E' provvisto di un debole sistema di anelli molto scuri paralleli al suo piano equatoriale, scoperti nel 1977 durante un'occultazione stellare e al momento sono noti 27 satelliti.

Nettuno

Dista dal Sole approssimativamente 30 UA, ha una massa pari a $17 M_{\oplus}$, ma il suo volume risulta di poco inferiore a quello di Urano, per cui la sua densità $\rho \sim 1,7 \text{ g/cm}^3$ è più alta dei giganti gassosi, presentando così un appiattimento polare $f < 0,02$.

La sua atmosfera appare di colore blu per via dell'abbondanza di metano maggiore di quella presente su Urano, ma a differenza di quest'ultimo, per via del calore endogeno che esso produce, possiamo riscontrare una maggiore attività e una struttura più complicata organizzata in bande e zone simili a quelle di Giove e Saturno; con una formazione simile alla *Grande Macchia Rossa* ma di colore blu scuro. Il risultato del calore endogeno prodotto è probabilmente dovuto al fatto che Nettuno riceve solo il 40% della radiazione solare ricevuta da Urano, per cui non è escluso che se fossero posti alla stessa distanza dal Sole si comporterebbero in maniera analoga, in quanto si troverebbe alla temperatura di equilibrio.

Sulla sua struttura interna si ipotizza la presenza di un nucleo elettricamente conduttore simile a quello di Urano che ne genera il campo magnetico inclinato di 48° rispetto all'asse di rotazione, con un'intensità misurata circa la metà di quello terrestre, ma con una geometria che risulta molto più complessa.

Come tutti i giganti è provvisto di un debole sistema di anelli scoperti dalla sonda Voyager 2 e sono noti 13 satelliti di cui *Tritone*, il più grande, ha un raggio di 1350 km ed ha la particolarità di essere il posto più freddo conosciuto nel Sistema Solare.

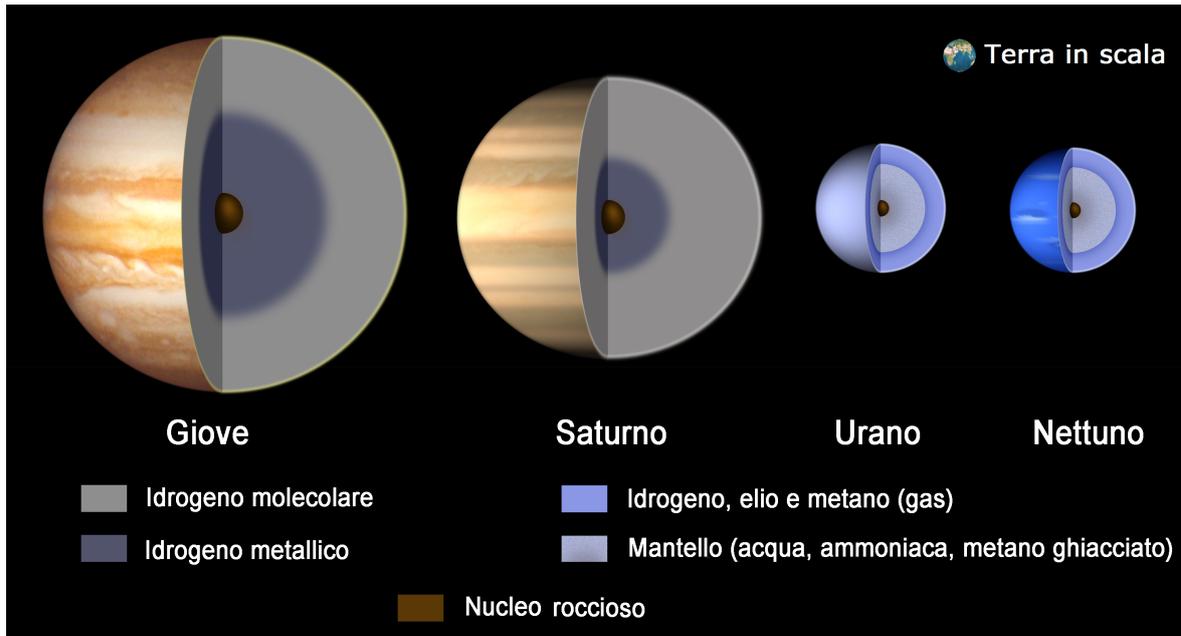


Figura 3: Struttura e proporzioni dei Giganti Gassosi.

4 Pianeti Nani e Corpi Minori

La sola massa di Nettuno non è sufficiente a spiegare le alterazioni orbitali di Urano, per cui qualche decennio dopo la sua scoperta, Percival Lowell dedicò 14 anni alla ricerca di un nuovo (allora) pianeta scoperto nel 1930 da Clyde Tombaugh il quale venne battezzato *Plutone*, la cui massa però non era sufficiente a spiegarne le alterazioni.

A metà secolo scorso gli astronomi Kennet E. Edgeworth e Gerard P. Kuiper, studiando indipendentemente l'uno dall'altro la formazione del Sistema Solare e le comete di medio periodo, ipotizzarono l'esistenza di un insieme di corpi solidi di modeste dimensioni che popolavano una fascia oltre l'orbita di Nettuno di cui si hanno evidenze osservative solo dalla fine del secolo scorso. Battezzata *fascia di Edgeworth-Kuiper* in loro onore, Plutone fu di fatto il primo oggetto appartenente a tale fascia ad essere scoperto.

Nello stesso periodo in cui Edgeworth e Kuiper avanzarono l'ipotesi di un disco di oggetti oltre l'orbita di Nettuno, Jan Oort ipotizzò l'esistenza di un guscio di materia approssimativamente sferico dalle dimensioni di 30k/50k UA, che racchiude il Sistema Solare, per spiegare la forte inclinazione sull'eclittica delle comete di lungo periodo.

4.1 Composizione e Dimensioni dei KBOs e TNOs

Con gli acronimi KBOs e TNOs si intendono rispettivamente i corpi facenti parte della fascia di Kuiper le cui orbite, poiché possono essere molto eccentriche, si trovano interamente o per la maggior parte del percorso, oltre l'orbita di Nettuno, in un disco compreso fra le 30 e 50 UA dal Sole.

La composizione chimica di questi oggetti è stata rivelata grazie alle righe in assorbimento⁸ di determinati composti molecolari, le quali confrontandole con quelle di varie sostanze sulla Terra, si ottengono informazioni sulla loro composizione. Risultano composti da un nucleo roccioso e una "crosta" di ghiaccio, metano, e altri idrocarburi grazie alla quale possiamo distinguerli in 4 classi tassonomiche: BB, BR, IR e RR che mostra-

⁸Non si tratteranno questioni di natura spettroscopica.

no abbondanza di ghiaccio decrescente e presenze di composti organici crescenti. La ragione di tali differenze può risiedere nel fatto che la loro superficie sia stata alterata e rimodellata nel corso della loro storia da collisioni, interazioni col vento solare e raggi cosmici che hanno trasformato il ghiaccio da cristallino alla forma amorfa, e anche a causa di migrazioni orbitali avvenute nelle prime fasi di formazione del Sistema Solare.

Le dimensioni di questi oggetti sembrano seguire approssimativamente una distribuzione descritta da una legge di potenza che in forma cumulativa può essere scritta come:

$$N_{>R}(R) \equiv \int_R^{R_{max}} N(R')dR' = \frac{N_0}{\alpha - 1} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{1-\alpha}$$

dove $N_{>R}$ è il numero di oggetti con raggio maggiore di un certo R , R_0 il raggio di riferimento, N_0 una costante che dipende dalla scelta di R_0 , R_{max} il raggio dei corpi più grandi e $\alpha=3,5$ l'indice spettrale della distribuzione calcolato empiricamente.

Come previsto da questo modello sono stati stimati milioni di oggetti dal diametro di poche decine di chilometri, circa 70.000 dal diametro intorno a 100 km, e pochi oggetti dal diametro che supera i 1000 km. In totale oggi ne sono noti all'incirca 1000, per lo più di grandi dimensioni, i più grandi dei quali sono *Plutone* ed *Eris* che hanno un diametro superiore a 2000 km; ragion per cui nel 2006 la IAU decise di declassare Plutone dallo status di pianeta, in quanto facente parte della distribuzione.



Figura 4: Grandezze in scala dei più grandi TNOs conosciuti confrontati con la Terra.

La fascia di Kuiper si dirada in una regione che si estende fino a 100 UA nota come il *Disco Diffuso*. Caratterizzata da corpi simili ai KBO (noti come SDOs - Scattered Disk Objects), ma con orbite instabili che li portano spesso a “precipitare” nella direzione del Sole, dando luogo alla formazione delle comete a medio periodo come predetto da Edgeworth e Kuiper. Sono ciò che rimane delle prime fasi di accrescimento del disco protoplanetario, che a causa delle interazioni gravitazionali con Nettuno non sono riusciti a formare un unico pianeta, la cui massa stimata risulterebbe compresa fra $1/30$ e $1/10 M_{\oplus}$; mentre la nube di Oort rappresenterebbe il residuo della nebulosa primordiale che formò il Sistema Solare, della quale però non abbiamo osservative.

5 Ricerca di Pianeti Extrasolari

Benché si ritenesse da sempre probabile l'esistenza di pianeti attorno a stelle diverse dal Sole, non si avevano prove a riguardo fino al 1995, quando fu scoperto un pianeta attorno alla stella *Pegasi 51*. Da allora, grazie all'ausilio di strumenti sempre più sofisticati, il numero di pianeti scoperti al di fuori dal Sistema Solare è cresciuto notevolmente, e ad oggi sono noti quasi 2000 pianeti extrasolari. I motivi per cui i pianeti extrasolari sono difficili da individuare sono due: il primo è che i pianeti non emettono radiazione nella banda ottica, il secondo è perchè la luce riflessa è "affogata" dalle stelle attorno a cui orbitano.

I metodi di ricerca si dividono in due categorie: *metodi indiretti* che permettono solo di intuirne la presenza, studiando gli effetti sulla stella attorno alla quale orbitano e *metodi diretti* che danno la possibilità di "vedere" il pianeta tramite *imaging*.

5.1 Astrometria

Questo metodo si usa quando la normale al piano del sistema preso in considerazione coincide con la nostra linea di vista. La tecnica astrometrica è molto sensibile ai pianeti di grande massa, che per effetto della forza gravitazionale, inducono sulla volta celeste, un'oscillazione della stella attorno alla quale orbitano. L'ampiezza dell'oscillazione proiettata, indicata con $\Delta\theta$ è data da:

$$\Delta\theta \leq \frac{M_p a}{M_* d_\odot},$$

dove: M_p è la massa del pianeta, M_* la massa della stella, a è il semiasse maggiore dell'orbita e d_\odot la distanza della stella dal nostro Sistema Solare, con $\Delta\theta$ e r_\odot misurati rispettivamente: in radianti e metri, oppure arcosecondi e UA. Utilizzando l'astrometria sono più facili da rivelare i pianeti distanti dalla stella, in quanto il raggio del moto stellare risulta più ampio, perchè stella e pianeta tendono a ruotare attorno al loro comune baricentro, ma richiede un tempo di osservazione paragonabile al periodo orbitale del pianeta.

5.2 Transiti

Per attuare questa tecnica, è necessario invece, che la normale al sistema stellare osservato deve essere quasi perpendicolare alla linea di vista, ovvero:

$$\cos i < \frac{R_* + R_p}{d}$$

dove d è la distanza fra i due corpi, quando il pianeta si trova frapposto fra l'osservatore e la stella. Si tratta di un metodo fotometrico che consiste nel determinare riduzioni di intensità periodiche nella curva di luce della stella, quando il pianeta ne transita davanti al suo disco. La frazione di riduzione luminosità apparente della stella è data da:

$$\frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2.$$

La Durata del Transito, dove il pianeta blocca in parte la luce proveniente dalla stella è dato da:

$$T_{tr} = \frac{R_* + R_p}{\pi a} \frac{1 - e^2}{1 + e \cos \varpi}$$

dove e è l'eccentricità orbitale e ϖ la lunghezza del periasse misurata relativamente alla linea di vista.

La probabilità del transito invece è data da:

$$P_{tr} = \frac{R_{\star} + R_p}{a(1 - e^2)}.$$

Andando a sostituire valori numerici nell'equazione, si scopre che questo metodo è efficace solo per pianeti con orbite molto strette, il cui semiasse è inferiore a 0.1 UA, con un raggio dell'ordine di $10 R_{\oplus}$.

Queste prime due tecniche discusse rappresentano, prospetticamente parlando, i due casi limite del metodo delle *Velocità Radiali*, che verrà trattato a breve, in cui la normale al sistema stellare osservato potrà formare un angolo qualsiasi con la linea di vista. Inoltre questi ultimi due metodi possono essere combinati insieme per avere un'ulteriore conferma della presenza di un ipotetico pianeta attorno a una stella.

5.3 Velocità Radiali

Il metodo consiste nell'osservazione dello spostamento periodico dovuto all'effetto doppler delle righe in assorbimento nello spettro stellare, misurato sulla componente della velocità lungo la linea di vista, per causa di un pianeta che attraverso la sua attrazione gravitazionale, tende a farla ruotare attorno al baricentro del sistema. L'ampiezza K , di variazione della velocità radiale è:

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P_{orb}} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_{\star} + M_p)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}},$$

dove P_{orb} è il periodo orbitale e i l'angolo formato fra la normale del piano orbitale e la linea di vista. Grazie a questa tecnica è stato scoperto il maggior numero di esopianeti, in quanto è molto più probabile un'orientazione casuale della normale del sistema con la nostra linea di vista. E' molto sensibile per pianeti massicci anche a grande distanza dalla stella, ma con un periodo di osservazione comparabile al periodo di rivoluzione di quel pianeta; mentre pianeti con una massa dell'ordine di M_{\oplus} possono essere rilevati solo se hanno orbite molto strette. La difficoltà in questo metodo risiede nell'elevata precisione strumentale richiesta, in quanto un pianeta dalla massa di Giove posto alla stessa distanza dalla stella, consente di misurare una variazione di circa 1/1000 della larghezza tipica delle righe spettrali. E' quindi necessaria la combinazione di un'alta risoluzione spettrale, un elevato rapporto segnale/rumore e delle righe in assorbimento molto marcate, quindi stelle con elevata metallicità, non riscontrabile per stelle di classe spettrale O e B.

5.4 Microlenti Gravitazionali

In accordo con la teoria della relatività generale di Einstein, i raggi di luce provenienti da una stella, quando passano vicino a un oggetto massivo interposto fra l'osservatore e la sorgente, risulteranno deviati di un angolo piccolissimo. Questo effetto è noto con il nome di *microlensing*. Il massimo ingrandimento da parte della lente si ha quando la luce passa vicino a quello che viene definito con il nome di *Einstein Ring*, indicato con R_E , dato dalla seguente equazione:

$$R_E = \sqrt{\frac{4GM_L r_{\Delta L}}{c^2}} \left(1 - \frac{r_{\Delta L}}{r_{\Delta S}} \right)^{1/2},$$

dove M_L è la massa che causa la deviazione dei raggi luminosi, c la velocità della luce, r_{Δ_L} e r_{Δ_S} rispettivamente le distanze dall'osservatore e dalla sorgente. Questo metodo permette di scoprire anche pianeti dell'ordine di M_{\oplus} , ma è molto difficile da attuare in quanto affinché si verifichi questo fenomeno sorgente, oggetto e osservatore devono essere allineati; per cui è usato per lo più nel determinare la distribuzione di *nane brune*⁹ e pianeti erranti sparsi nella Via Lattea.

5.5 Imaging

L'immagine diretta di un pianeta, come già detto in precedenza, è molto difficile da ottenere, in quanto la potenza della radiazione emessa da un pianeta, indicata con L_P dipendente dalla lunghezza d'onda λ , dal planetario raggio R_P e dal raggio orbitale a ; risulta meno di un miliardesimo della potenza luminosa L_{\star} , emessa dalla stella attorno alla quale orbitano. Tuttavia il loro rapporto non si mantiene costante a tutte le lunghezze d'onda ed è dato da:

$$\frac{L_P}{L_{\star}} = p(\lambda, \delta\theta) \left(\frac{R_p}{a} \right)^2,$$

dove $p(\lambda, \delta\theta)$ è una funzione che dipende dell'inclinazione dell'orbita rispetto al piano del cielo e delle proprietà di scattering dell'atmosfera planetaria; $\delta\theta$ rappresenta la separazione angolare del pianeta dalla stella proiettata sulla sfera celeste.

Per riuscire a distinguerli direttamente, bisogna utilizzare tecniche astrofisiche molto sofisticate come quella interferometrica e non le normali tecniche visuali. L'obiettivo di tali tecniche è quello di ridurre le dimensioni angolari dell'immagine stellare e aumentare il rapporto tra L_P/L_{\star} . Grazie alle diverse temperature, date ad esempio da una stella di tipo solare (5800K) e un pianeta di tipo gioviano (150K) esiste una zona nello spettro di emissione di corpo nero che cade nell'infrarosso a $\lambda \sim 20\mu\text{m}$, che favorisce di un fattore 10^5 questo rapporto, per cui risulta molto conveniente lavorare a queste lunghezze d'onda. Questo metodo è conveniente usarlo per pianeti molto massicci che hanno una forte emissione nell'infrarosso come Giove.

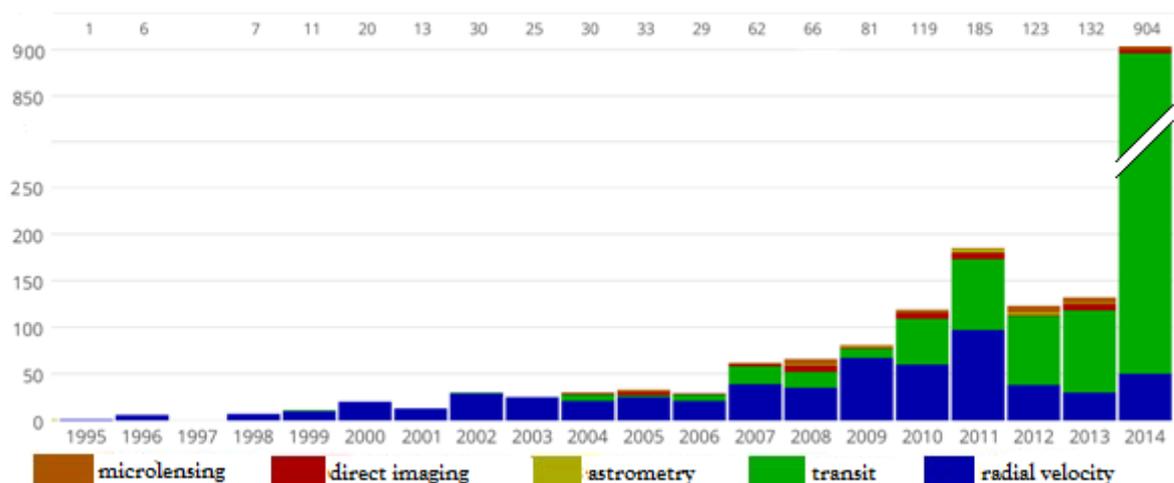


Figura 5: Istogramma del numero di esopianeti scoperti nei metodi descritti fino al 2014.

⁹Oggetti la cui massa non è sufficiente ad innescare la catena p-p, ma abbastanza per fondere il deuterio e il litio.

6 Appendice

Lista delle costanti e dei simboli utilizzati durante l'elaborato espressi nel S.I. e c.g.s..

Simbolo	Significato	Valore nel S.I.	Valore in c.g.s.
M_{\oplus}	Massa terrestre	$5,97 \cdot 10^{24}$ kg	$5,97 \cdot 10^{27}$ g
R_{\oplus}	Raggio terrestre	$6,37 \cdot 10^6$ m	$6,37 \cdot 10^8$ cm
L_{\odot}	Luminosità solare	$3,86 \cdot 10^{26}$ W	$3,86 \cdot 10^{33}$ erg s ⁻¹
UA	Unità Astronomica	$149 \cdot 10^9$ m	$149 \cdot 10^{11}$ cm
k	Costante di Boltzmann	$1,38 \cdot 10^{-23}$ J K ⁻¹	$1,38 \cdot 10^{-16}$ erg K ⁻¹
σ	Costante di Stephan-Boltzmann	$5,67 \cdot 10^{-8}$ J m ⁻² s ⁻¹ K ⁻⁴	$5,67 \cdot 10^{-5}$ erg cm ⁻² s ⁻¹ K ⁻⁴
G	Costante di Gravitazione Universale	$6,67 \cdot 10^{-11}$ N m ² kg ⁻²	$6,67 \cdot 10^{-8}$ g ⁻¹ cm ³ s ⁻²

Riferimenti bibliografici

- [1] Imae de Pater and Jack J. Lissauer. *Planetary Sciences, second edition*. Cambridge University Press, 2014.
- [2] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja M.Poutanen, K.J. Donner(Eds.). *Foundamental Astronomy*. Springer, 2006.
- [3] Patrick G. J. Irwin, *Giant Planets of Our Solar System: Atmospheres, Composition, and Structure*. Springer, 2003.
- [4] Gianluca Ranzini. *Astronomia*. DeAgostini, 2000.
- [5] Luca Ciotti. *Appunti del corso di Astrofisica Extragalattica*. 2015
- [6] Sito Internet: *www.inaf.it*