

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Astronomia

**PROPRIETÁ GENERALI DEI  
PIANETI DEL SISTEMA SOLARE  
E RICERCA DI PIANETI ESTERNI**

Tesi di laurea

Presentata da:  
**Arianna Moscioni**

Relatore:  
**Chiar.mo Prof.  
Daniele Dallacasa**

---

Sessione III  
Anno Accademico 2018/2019



## **Sommario**

In questo elaborato vengono messe in evidenza le principali caratteristiche fisiche, morfologiche e chimiche dei pianeti che compongono il Sistema Solare, evidenziando in particolar modo le differenze tra i pianeti terrestri e i pianeti gioviani, ovvero pianeti rocciosi e giganti gassosi. In particolare si è trattata l'atmosfera delle due categorie di pianeti, sottolineando il processo di formazione che ha portato alla differenziazione tra pianeti terrestri e pianeti gioviani, la loro composizione chimica e successivamente le differenze delle loro strutture interne.

Nella seconda parte di questo elaborato vengono mostrati i principali metodi di ricerca e di individuazione dei pianeti extrasolari. In particolar modo si sono messi in evidenza i principali metodi indiretti, quali lo studio della velocità radiale, il metodo dei transiti, il metodo astrometrico, microlensing e il metodo attraverso cui è possibile ricavare immagini dirette del pianeta stesso.



# Indice

<b>1</b>	<b>Principali proprietà dei pianeti del Sistema Solare</b>	<b>1</b>
1.1	Che cos'è un pianeta . . . . .	1
1.2	Origine del Sistema Solare . . . . .	1
1.3	Atmosfere planetarie . . . . .	3
1.3.1	I pianeti terrestri . . . . .	4
1.3.2	I pianeti gioviani . . . . .	5
1.4	Struttura dei pianeti . . . . .	6
1.4.1	I pianeti rocciosi . . . . .	6
1.4.2	I giganti gassosi . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Ricerca di pianeti esterni</b>	<b>9</b>
2.1	Velocità radiali . . . . .	9
2.2	Transito . . . . .	11
2.3	Astrometria . . . . .	12
2.4	Microlensing . . . . .	12
2.5	Immagini dirette . . . . .	14
2.6	Metodi alternativi . . . . .	14
2.7	Confronto tra i metodi . . . . .	15

# Capitolo 1

## Principali proprietà dei pianeti del Sistema Solare

### 1.1 Che cos'è un pianeta

La scoperta nel 2005 di un oggetto più grande di Plutone nella fascia di Kuiper, portò l'*Unione Internazionale Astronomica* (IAU) a proporre una definizione scientifica di pianeta. Dopo attente considerazioni, nel 2006 fu proposta la soluzione in base alla quale un oggetto può essere considerato pianeta se soddisfa tre condizioni:

- orbita attorno al Sole;
- ha una massa sufficiente affinché la sua gravità possa superare le forze di corpo rigido e far sì che assuma una forma dettata dall'equilibrio idrostatico;
- ha ripulito l'orbita nei suoi dintorni.

Grazie a questa definizione furono riconosciuti solo otto pianeti del Sistema Solare: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Plutone fu declassato definitivamente a pianeta nano, secondo la definizione, poiché soddisfa solamente le prime due condizioni.

### 1.2 Origine del Sistema Solare

L'origine del Sistema Solare è ancora oggi oggetto di dibattito poiché tutte le teorie cosmogoniche proposte presentano punti inspiegabili. Attualmente la più accreditata è la *teoria nebulare* (ipotesi di Kant-Laplace), secondo cui il Sistema Solare deve essersi originato circa 4.5 miliardi di anni fa, dal collasso gravitazionale di una parte di una gigante nube molecolare costituita da polvere e gas, causato per esempio dalla compressione dovuta al passaggio attraverso un braccio a spirale della galassia o all'esplosione di una supernova nei pressi della nube.

Nel momento del collasso, l'energia gravitazionale viene convertita in energia termica, aumentando la pressione e la temperatura del gas e portando alla formazione di un disco di gas caldo in rotazione chiamato *disco protoplanetario*.

Una volta raggiunto l'equilibrio idrostatico il disco inizia a raffreddarsi e il materiale inizia a condensare. In particolare, la temperatura assunta dalla nebulosa in questa fase fornisce informazioni riguardo la differenza tra i pianeti terrestri e gioviani: a circa 1 UA la temperatura raggiunge i 2000 K, temperatura alla quale tutti gli elementi chimici si trovano in forma gassosa. La figura 1.1 rappresenta una lista dei composti più abbondanti nella nebula protoplanetaria e subito sotto una lista dei composti in cui questi elementi si trovavano quando la temperatura era di circa 2000 K. I primi elementi a condensare furono i metalli come calcio, alluminio e nichel (come si può vedere nella parte destra del grafico).

È possibile definire una distanza significativa per la differenziazione dei pianeti che è la *frost line* e rappresenta la distanza a cui solidificano i composti dell'idrogeno.

In particolare all'interno della frost line i composti dell'idrogeno si trovano in forma gassosa a causa delle alte temperature, quindi i pianeti che si sono formati al suo interno sono composti principalmente da rocce e metalli e formano il gruppo dei *pianeti terrestri*; al di fuori della frost line le temperature permettono la condensazione dell'idrogeno e dei suoi composti in ghiacci, caratterizzanti i *pianeti gioviani* dal nucleo ghiacciato e denso che vediamo oggi.

Si formano così all'interno di ogni orbita tanti *pianetesimi*: oggetti dalle dimensioni di circa 1 km, che attraverso la forza di gravità e frequenti collisioni si uniscono a formare gli *embrioni*, che inglobano al loro interno tutto quello che trovano nella loro orbita entro una *distanza di Hill* (ossia la regione attorno all'oggetto in cui la sua gravità è la forza dominante) fino a formare i veri e propri pianeti che vediamo oggi.

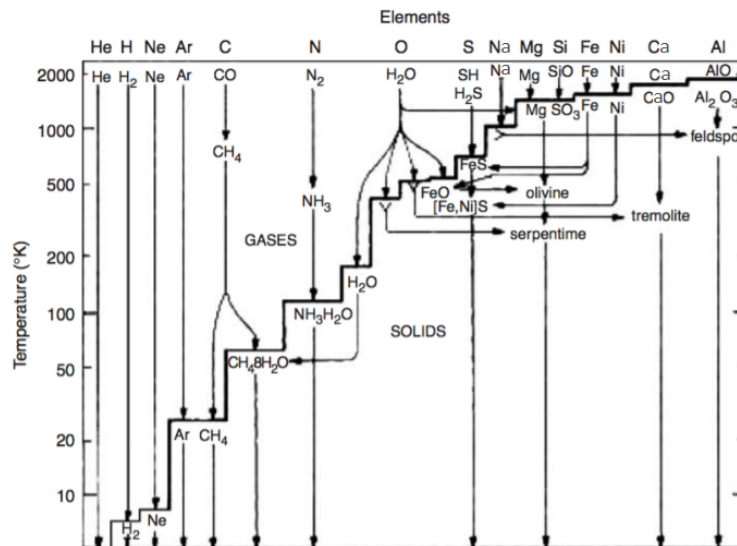


Figura 1.1: Sequenza in cui condensarono (da destra a sinistra) le specie chimiche della nebula protoplanetaria.

### 1.3 Atmosfere planetarie

L'atmosfera dei pianeti terrestri si è originata molto probabilmente da gas come vapore acqueo e anidride carbonica, in regioni con un'alta abbondanza di materiali ferrosi e silicati e in cui i composti dell'idrogeno sono rimasti in forma gassosa a causa delle alte temperature. I pianeti gioviani si sono formati ad una distanza dal Sole sufficiente per mantenere strati gassosi significativi, portando ad atmosfere costituite principalmente dai composti dell'idrogeno e dell'elio. Inoltre a differenza di quelle dei pianeti terrestri, le atmosfere dei pianeti gioviani sono atmosfere dette primarie poichè questi pianeti non hanno perso effettivamente le atmosfere create inizialmente e per questo offrono informazioni importanti per la comprensione della composizione della nebulosa proto-planetary al tempo della formazione dei pianeti.

Le attuali atmosfere dei pianeti terrestri invece, sono atmosfere dette secondarie, poichè non derivano direttamente dalla nebulosa originaria ma sono originate da gas liberati per effetto del vulcanismo interno o in seguito ad impatti con comete e da composti volatili contenuti all'interno dei planetesimi da cui si sono formati subendo processi di modifica. Il principale di questi processi è il *meccanismo di fuga di Jeans*: esso è un meccanismo selettivo che permette ad alcuni gas di sfuggire dall'atmosfera del pianeta. Si introduce la *velocità di fuga* di un pianeta di raggio  $R$  e massa  $M_p$  che rappresenta la velocità minima da superare affinché una particella sfugga dall'atmosfera.

La velocità di fuga è definita come:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM_p}{R}} \quad (1.1)$$

Il valore della velocità di fuga va confrontato con la velocità delle particelle in *esosfera*, ovvero lo strato di atmosfera che si trova a circa 500 km dalla superficie e in cui le particelle mostrano traiettorie balistiche, di conseguenza si ha una bassissima probabilità di collisione tra le particelle rendendo possibile la loro fuoriuscita dall'atmosfera.

La velocità più probabile delle particelle è data da:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (1.2)$$

in cui  $k$  è la costante di Boltzmann e  $m$  è la massa della molecola.

Se  $v_e \gg v_0$  allora il pianeta manterrà la sua atmosfera per miliardi di anni, poichè le particelle non hanno una velocità tale da superare la velocità di fuga del pianeta e quindi fuoriuscire dalla sua atmosfera. Viceversa se la velocità  $v_0$  si avvicina alla  $v_e$  si innescherà tale meccanismo di evaporazione gravitazionale.

Il meccanismo di Jeans spiega la perdita degli elementi più leggeri dall'atmosfera dei pianeti del Sistema Solare, soprattutto quelli più piccoli. Infatti, a parità di temperatura, molecole pesanti (per esempio azoto ed ossigeno) hanno una velocità probabile



che è più bassa della velocità di fuga e quindi sfuggono più difficilmente dall'atmosfera, mentre gli atomi più leggeri (per esempio idrogeno ed elio) tendenzialmente hanno velocità maggiori e di conseguenza sfuggono più facilmente. Il risultato che si ottiene è che i pianeti terrestri hanno subito nel tempo una grande perdita di atomi leggeri ed hanno quindi atmosfere più pesanti poiché sono caratterizzati da velocità di fuga più basse; dall'altra parte, le masse dei pianeti gioviani sono così grandi e la temperatura della loro esosfera è così fredda, che il meccanismo di fuga è trascurabile e questi pianeti hanno perso una quantità trascurabile di atmosfera durante la loro evoluzione.

### 1.3.1 I pianeti terrestri

I pianeti terrestri, quali Mercurio, Venere, Terra e Marte sono caratterizzati principalmente da atmosfere costituite da atomi pesanti. Corpi che per le loro rispettabili dimensioni riescono a trattenere molti gas, come la Terra e Venere, hanno un'atmosfera abbastanza consistente; l'atmosfera è invece molto tenue su Marte e praticamente assente su Mercurio, entrambi troppo piccoli per sviluppare una gravità capace di mantenere in modo stabile e duraturo un'atmosfera compatta.

Infatti su **Mercurio** a causa delle altissime temperature e delle ridotte dimensioni del pianeta, attraverso il meccanismo di fuga di Jeans sono state eliminate tutte le possibili molecole volatili così da impedire la presenza di un'atmosfera. Questo fa sì che la superficie presenti il più grande sbalzo di temperatura tra giorno e notte di tutti i pianeti del Sistema Solare: le temperature variano da  $100^\circ - 150^\circ$  K nella parte non esposta al Sole, a  $500^\circ - 700^\circ$  K in quella esposta.

Al contrario, l'atmosfera estremamente densa di **Venere**, la sua eccentricità quasi nulla (0.0068) e la rotazione del suo asse che è quasi perpendicolare al piano dell'orbita ( $177.3^\circ$ ), fanno sì che il pianeta non presenti variazioni significative di temperatura tra giorno e notte. L'anidride carbonica è l'elemento predominante della sua atmosfera, quasi sicuramente il risultato di passate eruzioni vulcaniche. Nella parte più alta dell'atmosfera è stato anche trovato una miscela di biossido di zolfo e acido solforico che vanno a formare grosse nubi. È presente uno strato di monossido di carbonio sotto queste nuvole, che genera sul pianeta un intenso effetto serra, portando la temperatura della superficie fino a circa  $730^\circ$  K.

Per quanto riguarda la **Terra**, la sua atmosfera è costituita principalmente da azoto e ossigeno ed è molto povera di idrogeno atomico. Infatti l'ossigeno ha una velocità probabile di 0.6 km/s e la probabilità di fuoriuscita corrisponde a  $10^{-84}$ , il che implica un tempo comparabile ai tempi di vita del Sistema Solare. Invece l'atomo di idrogeno ha una velocità probabile che corrisponde a circa 3.2 km/s il che significa che la probabilità di fuoriuscita dall'atmosfera è dell'ordine di  $10^{-6}$  e la frazione di molecole che hanno velocità superiori alla velocità di fuga corrisponde a circa  $10^{-4}$ , questo significa che nell'esosfera terrestre una frazione significativa degli atomi di idrogeno viene persa in circa  $10^5$  secondi (1 giorno).

A differenza di Venere e Marte, la Terra presenta uno strato nell'atmosfera chiamato *stratosfera* (tra i 16-50 km) la cui esistenza è giustificata dalla presenza di ozono ( $O_3$ ) che protegge gli organismi viventi dall'effetto nocivo che avrebbero alcune radiazioni UV. Anche l'atmosfera di **Marte**, composta principalmente di  $CO_2$  (95%) e piccole quantità di azoto (2.7%), a causa dell'inerzia termica dell'atmosfera, dell'inclinazione del suo asse ( $25.19^\circ$ ) e della sua eccentricità (0.09), presenta delle variazioni significative di temperatura tra giorno e notte ma anche a seconda della latitudine e della stagione. In particolare in inverno e autunno le temperature calano a tal punto che un quarto dell'atmosfera condensa e precipita sotto forma di anidride carbonica ghiacciata formando depositi di ghiaccio secco in una delle due calotte polari. L'atmosfera di Marte inoltre presenta una differenza fondamentale rispetto a quella della Terra, ossia quella di contenere costantemente polveri di silicati, la cui sospensione nell'atmosfera è favorita dalle continue tempeste di sabbia che si scatenano sulla superficie marziana.

### 1.3.2 I pianeti gioviani

A differenza dei pianeti terrestri, i pianeti gioviani, Giove, Saturno, Urano e Nettuno, non hanno una superficie definita e il confine tra l'atmosfera e la superficie del pianeta è indistinguibile.

Il contenuto di metalli (elementi più pesanti dell'elio) aumenta man mano che ci muoviamo verso l'esterno del Sistema Solare. Infatti la loro abbondanza corrisponde a 3-5 volte l'abbondanza solare per Giove, circa 10 volte per Saturno e 30-50 volte per Urano e Nettuno. Questo è collegato al fatto che Giove e Saturno sono diventati abbastanza grandi e in un tempo così rapido da aver catturato una grande massa di idrogeno ed elio, mentre Urano e Nettuno non sono stati in grado di attrarne abbastanza. Inoltre, le temperature più basse nelle regioni più esterne del Sistema Solare, fanno sì che l'abbondanza di materiali ghiacciati sia maggiore in Urano e Nettuno che in Giove e Saturno.

In **Giove** e **Saturno** le temperature sono così basse ( $90 - 120^\circ$  K) che la maggior parte dei costituenti dell'atmosfera condensa molto in profondità e solo i composti più volatili riescono a raggiungere altitudini dell'atmosfera in cui possono interagire con la radiazione ultravioletta. Nell'atmosfera di Giove e Saturno è presente un complicato sistema di nubi e foschie, strati di ammoniaca, idrosolfuro di ammonio ed acqua; le nubi di ammoniaca più alte sono il principale elemento visibile dall'esterno.

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 dal pianeta fa sì che si creino delle correnti a getto e dei moti convettivi lungo le fasce a 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 del pianeta, scoperta da Cassini nel 1665 e da allora rimasta pressoché immutata.

Per quanto riguarda Saturno, la sua caratteristica principale è il 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, composti principalmente da piccolissimi corpi di roccia e ghiaccio dalle dimensioni che vanno da qualche micron fino a qualche metro.

Come Giove anche Saturno possiede numerosi satelliti, circa 60, 8 dei quali di modeste dimensioni, tra cui Titano le cui dimensioni superano quelle di Mercurio ed è l'unico satellite a presentare una densa e complessa atmosfera.

I giganti ghiacciati, quali **Urano** e **Nettuno**, sono più piccoli e densi rispetto a Giove e Saturno, perché composti principalmente da acqua, ammoniaca e metano ghiacciati. L'atmosfera osservabile di entrambi i pianeti ha una temperatura minore rispetto a Giove e Saturno e questo fa sì che l'ammoniaca condensi a profondità maggiori dell'atmosfera. In ogni caso, la sua abbondanza è così bassa che sembrerebbe che la maggior parte dell'ammoniaca si combini con altre molecole per formare probabilmente ammoniaca allo stato liquido, nubi di idrosolfuro di ammonio o addirittura un oceano di ammoniaca e acqua. La loro atmosfera inoltre è costituita da uno strato principale di nubi la cui composizione è sconosciuta, sopra cui si trova uno strato molto sottile di nubi di metano ghiacciato.

## 1.4 Struttura dei pianeti

La disposizione e la composizione dei pianeti e degli altri corpi nel nostro Sistema Solare sono dovuti al processo attraverso cui esso si è formato.

Più vicino al Sole, solo il materiale roccioso poteva resistere a temperature dell'ordine di 2000° K quando il Sistema Solare era giovane. Per questo motivo, i primi quattro pianeti (Mercurio, Venere, Terra e Marte) sono i pianeti rocciosi, pianeti piccoli caratterizzati da solide superfici rocciose e densità alte. Nel frattempo, ghiacci, liquidi e gas si stabilirono nelle regioni esterne del giovane Sistema Solare. Attraverso la gravità è stato possibile il raggruppamento di questi materiali, ed è qui che troviamo i giganti gassosi (Giove e Saturno) e i giganti ghiacciati (Urano e Nettuno).

### 1.4.1 I pianeti rocciosi

I pianeti rocciosi presentano sempre la stessa struttura generale com'è possibile vedere in figura 1.2: un nucleo costituito principalmente da ferro che si può trovare allo stato solido o allo stato liquido, attorno cui si trova un mantello di silicati circondato dalla crosta. Sulla superficie dei pianeti terrestri è possibile individuare strutture comuni come gole, crateri, montagne e vulcani.

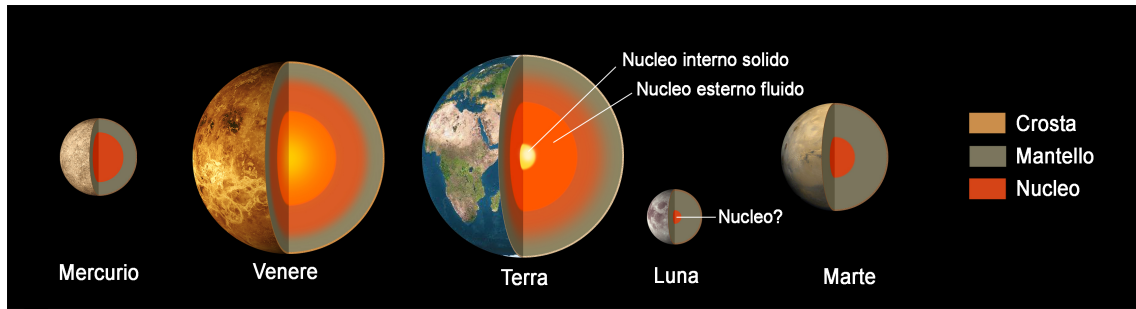


Figura 1.2: Struttura interna e proporzioni dei pianeti terrestri.

**Mercurio** è costituito per l'80% da un grosso nucleo di materiale ferroso allo stato solido nello strato interno e allo stato liquido nello strato più esterno, la cui lentissima rotazione provoca la presenza di un campo magnetico debolissimo (1% di quello terrestre).

Pur essendo dotato di un nucleo di ferro, **Venere** non presenta un campo magnetico intrinseco, la cui assenza è legata alla lentezza della sua rotazione attorno al proprio asse. Venere però presenta un campo magnetico estrinseco dovuto alla ionizzazione delle particelle nelle quote più alte dell'atmosfera per opera del vento solare.

La **Terra** è costituita da un nucleo interno solido composto per la maggior parte da ferro (80%), nichel ed altri elementi leggeri in quantità minori. Il nucleo interno solido è circondato da un nucleo esterno liquido la cui convezione combinata con l'*effetto di Coriolis*, produce il campo magnetico terrestre. Lo strato che ricopre il nucleo esterno è il *mantello*, costituito da silicati e la cui convezione si manifesta alla superficie attraverso le placche tettoniche.

Infine, anche **Marte** presenta la stessa struttura interna ma la crosta superficiale del pianeta è più spessa di quella terrestre anche per il fatto che il suo spessore deve essere in grado di sorreggere le enormi strutture vulcaniche presenti in superficie, come l'enorme massa del Monte Olimpo, che, con la sua base di 600 km di diametro e l'altezza di 26 km, è il monte più alto di tutto il Sistema Solare.

#### 1.4.2 I giganti gassosi

La maggior parte della massa dei pianeti gioviani è presente sotto forma di gas (oppure gas compresso in uno stato liquido) pur presentando un nucleo roccioso, la cui presenza è stata necessaria per la loro formazione. A differenza dei pianeti rocciosi, i giganti gassosi non hanno una superficie ben definita.

**Giove** e **Saturno** sono i pianeti più massicci del Sistema Solare, infatti la loro massa rappresenta il 90% della massa complessiva di tutti i pianeti. Il nucleo è costituito probabilmente da carbonio e silicati circondato da un denso mantello di idrogeno liquido metallico.

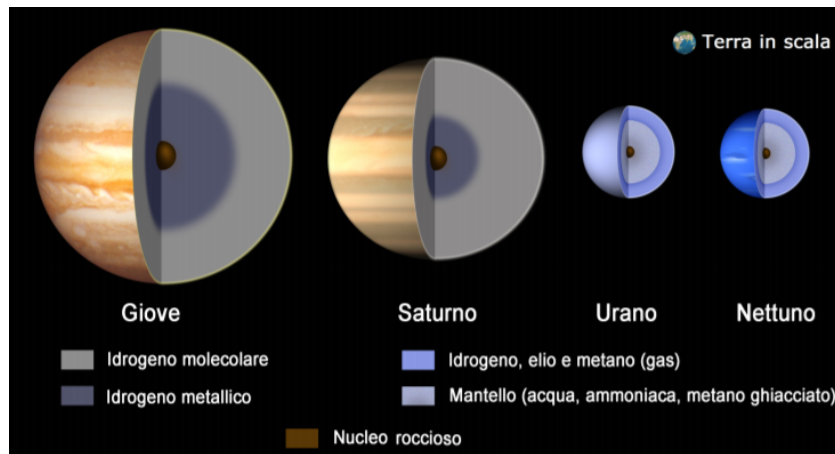


Figura 1.3: Struttura interna e proporzioni dei giganti gassosi.

Proprio a causa della loro composizione interna, unita al fatto che entrambi i pianeti hanno un tempo di rotazione attorno al proprio asse in circa 10 ore, Giove e Saturno presentano una dinamo molto potente alla quale è associato il campo magnetico più forte di tutto il Sistema Solare, che varia da 4.2 Gauss all'equatore fino a 13 Gauss ai poli.

**Urano** e **Nettuno** contengono al loro interno molto meno idrogeno e maggiori quantità di acqua, ammoniaca, e metano allo stato solido, per questo sono stati definiti anche giganti ghiacciati. Nonostante la composizione interna non sia ben conosciuta, possono essere presenti anche rocce e gas, ma in misura molto minore. Urano e Nettuno sono in molti modi simili alla parte interna di Giove e Saturno, senza però la massiccia presenza di idrogeno metallico liquido che i due pianeti giganti posseggono grazie alle pressioni enormi che esercitano sulle loro parti interne. Infatti Urano e Nettuno, di massa più piccola, non possono generare una pressione sufficiente affinché sia presente al loro interno dell'idrogeno metallico liquido.

# Capitolo 2

## Ricerca di pianeti esterni

La conferma del primo esopianeta nel 1995 fu di fondamentale importanza per la comprensione dell'evoluzione dell'Universo e da allora, grazie all'ausilio di strumenti sempre più sofisticati, il numero di pianeti scoperti al di fuori del Sistema Solare è cresciuto significativamente, contando ad oggi più di 4000 pianeti.

Il grande successo nel campo è stato finora ottenuto prevalentemente utilizzando metodi indiretti di rivelazione, che sfruttano una varietà di effetti che gli esopianeti inducono sulle loro stelle, quali occultazioni (metodo dei transiti) o moto orbitale dovuto alla legge di gravitazione universale (metodo delle velocità radiali).

I metodi diretti includono le tecniche che permettono di osservare direttamente al telescopio i pianeti, tuttavia risulta molto difficile in quanto l'osservazione di tali corpi celesti è sovrastata dalla luce della stella attorno a cui orbitano, la quale offusca la debole luminosità riflessa dei pianeti.

### 2.1 Velocità radiali

Questo metodo si basa sul fatto che due corpi legati tra loro dall'attrazione gravitazionale, ruotano attorno al comune centro di massa del sistema, che in generale non coincide con il centro di nessuno dei due corpi.

Se il sistema è costituito da un solo corpo, ad esempio una stella senza pianeti, non si avrà alcun movimento attorno al centro di massa, perché coinciderebbe con il centro stellare, ma nel momento in cui è presente un pianeta che orbita attorno alla stella, esso indurrà su di essa un movimento la cui ampiezza dipende dalla massa del pianeta. Nel caso delle stelle, molto più brillanti dei pianeti, è possibile, attraverso la spettroscopia, misurare l'eventuale velocità causata dalla presenza di un altro corpo nel sistema tramite l'*effetto doppler*, attraverso cui, quando la stella nel suo moto orbitale si allontana rispetto alla Terra, le righe del suo spettro risulteranno spostate verso il rosso; viceversa quando la stella si avvicina alla Terra le righe del suo spettro risultano spostate verso il blu. Analizzando gli spettri quindi è possibile misurare la velocità radiale della sorgente, lungo la linea di vista.

Quando si è in presenza di una stella con un pianeta che le orbita attorno, dallo studio del suo spettro si scopre un andamento di velocità radiale periodico: questo è il segno inequivocabile della presenza di almeno un altro corpo nel sistema.

Inoltre, poiché la velocità misurata dipende dalla massa dei due corpi, stimando la massa della stella, si può stimare la massa del corpo sconosciuto e dire se si tratta di un pianeta o meno.

Infatti è possibile definire l'ampiezza  $K$  della variazione di velocità radiale:

$$K \approx \left( \frac{2\pi G}{PM_*^2} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_p \sin(i)}{\sqrt{1-e^2}} \quad (2.1)$$

che dipende dalla massa  $M_p$  del pianeta, dalla massa  $M_*$  della stella attorno a cui orbita e dall'angolo di inclinazione  $i$  lungo la linea di vista.

Data la dipendenza diretta dalla massa del pianeta, verranno rivelati da questo metodo prevalentemente pianeti di grande massa e breve periodo orbitale; la dipendenza dal periodo orbitale  $P$  non è molto forte e spesso la misura di  $K$  è limitata dalla durata delle osservazioni.

È importante applicare la *correzione baricentrica*: ai dati di velocità radiale deve essere sottratto il contributo del moto della Terra attorno al Sole, che altrimenti determinerebbe uno spostamento delle righe spettrali dovuto al moto dell'osservatore.

Il metodo della velocità radiale è stato uno dei primi metodi di successo per trovare esopianeti e continua ad essere uno dei più produttivi. Spesso, questo metodo è utilizzato anche per confermare pianeti extrasolari trovati attraverso altri metodi. È un metodo utilizzato in tutto il mondo, ma i due osservatori più importanti in cui si svolge questo lavoro sono i telescopi Keck alle Hawaii e l'Osservatorio di La Silla in Cile.

Attualmente attraverso questo metodo sono stati scoperti 779 pianeti, tra cui il primo pianeta extrasolare scoperto nel 1995 che orbita attorno alla stella 51 Pegasi e per cui Michel Mayor e Didier Queloz hanno vinto il premio Nobel per la fisica l'8 ottobre 2019. Si tratta di *51 Pegasi b*, un gigante gassoso massiccio la metà di Giove che orbita attorno ad una stella di tipo solare in un intervallo di tempo che copre 4 giorni. Il pianeta sembra anche avere un diametro maggiore di quello di Giove ed essere altamente riflettente. Queste sono proprietà tipiche di un pianeta detto "gioviano caldo", molto vicino alla stella madre ed esposto a una luce stellare intensa.

## 2.2 Transito

Quando un pianeta passa direttamente tra un osservatore e la stella attorno a cui orbita, blocca parte della luce di quella stella e per un breve intervallo di tempo, la luminosità della stella diventa effettivamente più bassa.

Il metodo dei transiti è un metodo fotometrico basato su questa variazione temporanea della curva di luce della stella (pari circa all'1% della luminosità totale di una stella di tipo solare per un pianeta di raggio gioviano e allo 0.01% per uno di raggio terrestre) quando un pianeta transita davanti ad essa bloccando parte della sua luce.

Le dimensioni e la lunghezza di un transito possono dirci molto sul pianeta che sta causando il transito: i pianeti più grandi bloccano più luce, quindi creano curve di luce più profonde; inoltre, più lontano è un pianeta più tempo impiega ad orbitare e passare davanti alla sua stella, quindi più è lungo un evento di transito, più lontano quel pianeta è dalla sua stella.

Le variazioni della curva di luce causate dal transito di più pianeti possono darci le stesse informazioni di una singola.

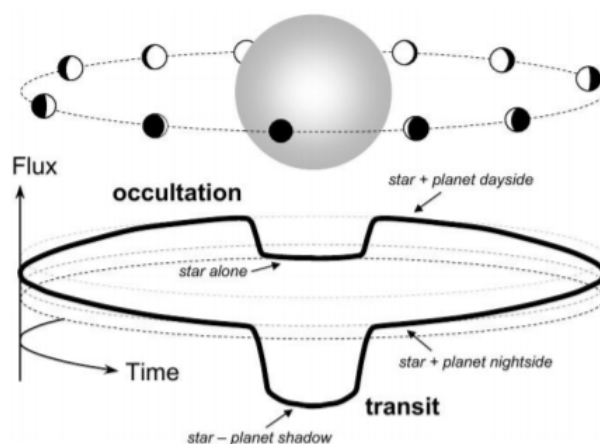


Figura 2.1: Rappresentazione di transito, occultazione e variazione del flusso nel tempo.

Il metodo dei transiti non è solo utile per trovare pianeti, ma può anche darci informazioni sulla composizione dell'atmosfera di un pianeta o sulla sua temperatura. Quando un esopianeta passa davanti alla sua stella, parte della luce delle stelle passa attraverso la sua atmosfera. È possibile analizzare i colori di questa luce al fine di ottenere importanti informazioni sulla sua composizione.

Questo metodo ha avuto un successo enorme nel trovare nuovi esopianeti; basti pensare che su 4099 pianeti confermati, 3131 sono stati scoperti attraverso questo metodo.

La missione Kepler della NASA, che ha cercato i pianeti utilizzando il metodo di transito dal 2009 al 2013, ha trovato migliaia di possibili scoperte di esopianeti e ha fornito agli astronomi preziose informazioni sulla distribuzione di esopianeti nella galassia.



## 2.3 Astrometria

Analizzando la posizione di una stella è possibile mettere in luce lo spostamento rispetto ad altre stelle fisse causato dalla presenza di un pianeta.

Nel caso delle velocità radiali si analizza lo spettro per misurare la velocità della stella; nel caso astrometrico si analizza invece il suo spostamento.

Se è nota la distanza  $d$  del sistema planetario possiamo ricavare il semiasse maggiore  $a_*$  dell'orbita della stella di massa  $M_*$  misurando il *segnale astrometrico*  $a_a$ ;

$$a_a = \left( \frac{M_p}{M_*} \right) \left( \frac{a_p}{1AU} \right) \left( \frac{d}{1pc} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

in cui  $M_p$  è la massa del pianeta; poi, attraverso l'espressione 2.2 e la terza legge di Keplero con  $a_p + a_*$  e assumendo  $M_* + M_p \approx M_*$ , dove la massa della stella si può ricavare dal tipo spettrale o dai modelli di evoluzione stellare, si può ottenere il semiasse maggiore del pianeta  $a_p$ . In questo modo, si può ottenere una stima della massa  $M_p$  del pianeta, tramite la formula:

$$a_* = \frac{M_p}{M_*} a_p \quad (2.3)$$

Dall'equazione 2.2 notiamo che il segnale astrometrico dipende dalla distanza delle stelle osservate, rendendo via via più difficile il metodo astrometrico all'aumentare della distanza del sistema stellare: sarà quindi più probabile trovare oggetti planetari attorno a stelle vicine al Sole. Sempre dall'equazione 2.2 si nota anche che pianeti massicci attorno a stelle nane sono favoriti, data la dipendenza di  $a_a$  dal rapporto  $M_p/M_*$ .

Questo metodo è sfruttabile quando la normale al piano del sistema preso in considerazione coincide con la nostra linea di vista, ma purtroppo la precisione di questo metodo non è grande e permette di individuare solo oggetti estremamente massicci.

Attualmente attraverso questo metodo è stato confermato solo un pianeta.

## 2.4 Microlensing

È un fenomeno fisico che consiste nella deviazione dei raggi luminosi provenienti da una sorgente di fondo a causa dell'attrazione gravitazionale di un corpo massivo che agisce da lente.

Una sorgente vicina, come per esempio una stella con eventuale pianeta, che passa prospetticamente davanti ad una molto lontana, come una stella o un Quasar, si comporta come una lente d'ingrandimento, amplificando la luce della sorgente posta dietro di essa e focalizzando i raggi di luce della stella distante sull'osservatore. Se la sorgente vista dalla Terra è posta esattamente dietro alla stella che funge da lente si ha il massimo ingrandimento e i raggi di luce provenienti dalla sorgente e che circondano la stella

lente formano il cosiddetto *Einstein ring*.

Se la stella che fa da lente possiede un pianeta, anch'esso amplifica l'immagine della sorgente di fondo, attraverso la comparsa di un picco luminoso secondario nella sua curva di luce come mostrato in figura 2.2 [b].

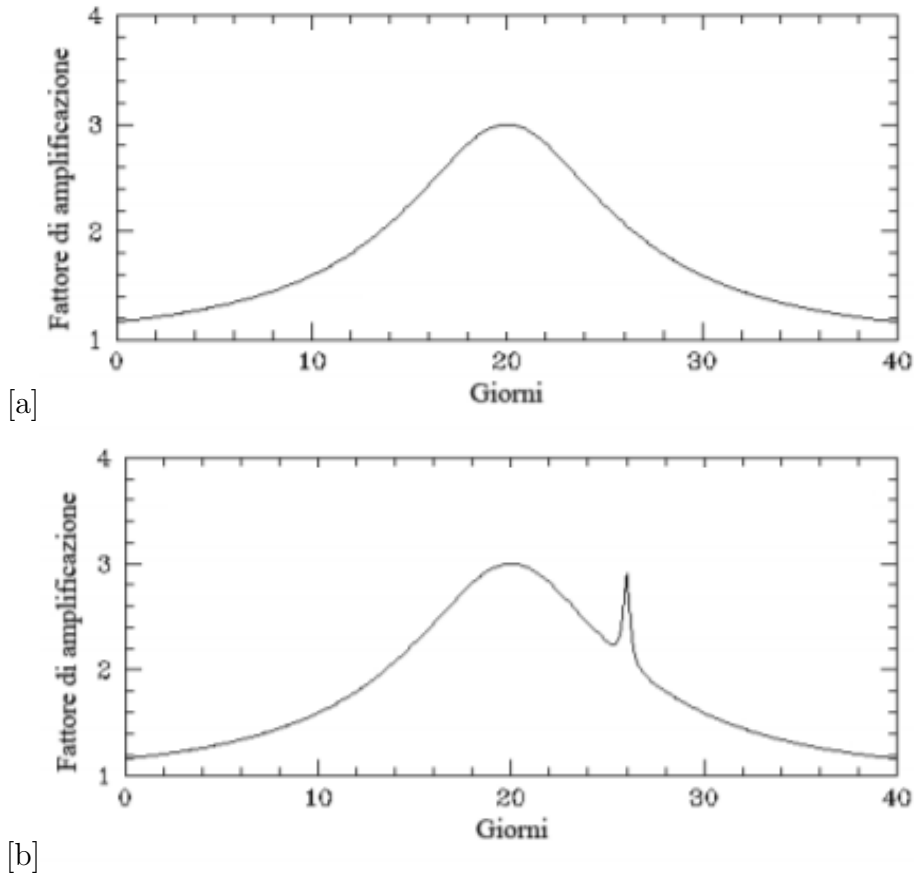


Figura 2.2: a) Stella di fondo amplificata da una singola lente; b) Stella di fondo amplificata da una lente contenente un pianeta.

Questo metodo permette di scoprire pianeti relativamente piccoli, anche di massa simile a quella terrestre; purtroppo l'evento di lente è quasi sempre unico e non ripetibile poiché occorre che il moto proprio della stella la porti a transitare prospetticamente di fronte alla sorgente di cui misuriamo la luce.

Attualmente attraverso questo metodo sono stati confermati 86 pianeti.

## 2.5 Immagini dirette

L'individuazione di pianeti extrasolari mediante immagini dirette risulta molto difficile in quanto qualsiasi luce riflessa dal pianeta o radiazione di calore proveniente dal pianeta stesso viene soffocata dalle enormi quantità di radiazione proveniente dalla stella attorno a cui orbita, che risulta milioni di volte più luminosa del pianeta.

Per risolvere i problemi derivanti dalla luce della stella madre, l'osservazione diretta richiede particolari strumenti e tecniche, come ad esempio l'uso di *coronografi* che riducono l'intensità della luce proveniente dalla stella attraverso uno specchio e una maschera tra lo specchio principale del telescopio e il piano dell'immagine, lasciando però visibile quella proveniente dal pianeta. In questo modo il coronografo riesce ad attenuare la luce della stella di circa 100 volte.

Inoltre risulta molto conveniente utilizzare tecniche interferometriche dallo spazio, lavorando a precise lunghezze d'onda. Infatti esiste una zona nello spettro di emissione di corpo nero che favorisce di circa  $10^5$  il rapporto tra la luminosità del pianeta e della sua stella, dato da:

$$\frac{L_p}{L_*} = p(\lambda, \delta\theta) \left( \frac{R_p}{a} \right)^2 \quad (2.4)$$

con  $\delta\theta$  che rappresenta la separazione angolare tra il pianeta e la stella. Questa zona cade nell'infrarosso a  $\lambda \approx 20\mu m$ .

## 2.6 Metodi alternativi

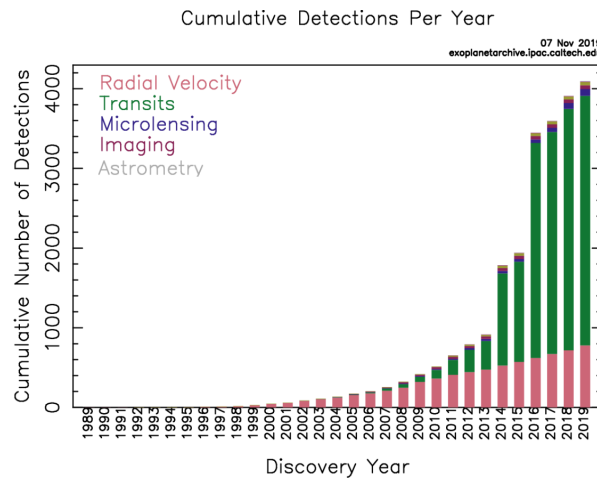
La ricerca di pianeti extrasolari è possibile anche studiando la variazioni degli intervalli di emissioni di una *pulsar*. Infatti una pulsar, ruotando, emette onde radio a intervalli estremamente regolari. Piccole anomalie negli intervalli delle emissioni possono essere usate per tracciare cambiamenti nel moto della pulsar, causati dalla presenza di uno o più pianeti.

Un altro metodo si basa sullo studio delle nubi di polveri che circondano molte stelle che possono essere individuate poiché in grado di assorbire la luce stellare e riemetterla sotto forma di radiazione infrarossa. Analizzando attentamente le nubi di polveri, è possibile individuare elementi che suggeriscano la presenza di pianeti.

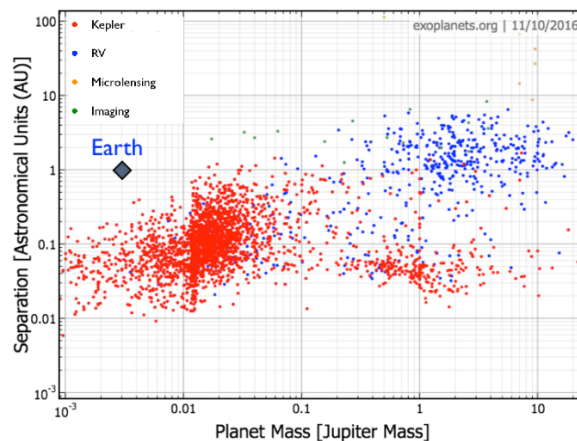
Inoltre, attraverso antenne sempre più sensibili come quelle di *ALMA*, è stato possibile dedurre la presenza di pianeti studiando il moto del gas all'interno dei dischi protoplanetari. In realtà, i solchi in questi dischi non sono sufficienti a fornire la certezza che al loro interno si stiano formando pianeti, poiché il gas potrebbe generare una pressione tale da riprodurre questi solchi senza bisogno di pianeti in formazione. A metà del 2018 si è giunti così a elaborare un nuovo metodo che consiste nello studiare proprio il flusso di gas, tecnica resa possibile dall'estrema sensibilità delle antenne di *ALMA*.

## 2.7 Confronto tra i metodi

Tra questi metodi di ricerca, quelli che attualmente hanno portato a risultati più soddisfacenti sono il metodo dei transiti e il metodo delle velocità radiali, che rispettivamente hanno portato alla conferma del 95% dei pianeti trovati e che hanno contribuito alla conferma ad oggi di 4099 pianeti al di fuori del Sistema Solare.



Il grafico sottostante plotta la separazione dei pianeti dalla stella attorno a cui orbitano in funzione della loro massa espressa in masse gioviane. Si può vedere che la maggior parte dei pianeti è stata scoperta dal satellite Kepler (in rosso) attraverso il metodo fotometrico, mentre una sostanziale minoranza è stata scoperta con il metodo della velocità radiale (in blu). Il metodo del microlensing è stato efficace per trovare pianeti molto massicci e molto lontani. Si può notare che non sono presenti pianeti extrasolari con una massa simile a quella della Terra e ad una separazione di 1 UA dalle loro stelle centrali, dovuto al fatto che la nostra tecnologia non ci consente ancora di trovarli.



# Bibliografia

- [1] Perryman, M. et al. (2014). «Astrometric Exoplanet Detection with Gaia». The Astrophysical Journal 797
- [2] Wright, J. T. (2017). «Radial Velocities as an Exoplanet Discovery Method».
- [3] Maestri T., Appunti e dispense del corso Atmosfere Planetarie, 2019
- [4] H. Karttunen, P. Kroger, H. Oja M.Poutanen, K.J. Donner(Eds.). Fundamental Astronomy. Springer, 2006.
- [5] Cimatti A., Appunti e dispense del corso Astronomia, 2017
- [6] [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)