

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA
CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

PROPRIETÀ GENERALI DEI PIANETI
DEL SISTEMA SOLARE E RICERCA
DEI PIANETI ESTERNI

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Presentata da:

Vittoria Cavazzoni
Matricola 0000900582

Relatore:

**Chiar.mo Prof. Daniele
Dallacasa**

Anno Accademico 2020-2021

*A tutti coloro che occupano
un posto speciale nel mio cuore.
Ai miei genitori, a mia sorella
e al mio dolce compagno di vita,
tutto questo è stato possibile
soprattutto grazie a voi.*

Indice

1	Pianeti del Sistema Solare	1
1.1	Origine del Sistema Solare	1
1.2	Cos'è un pianeta	2
1.3	Pianeti	2
1.3.1	Pianeti rocciosi	3
1.3.2	Pianeti gassosi	6
1.3.3	Pianeti nani e corpi minori	10
1.3.4	Ipotetico Pianeta X	11
2	Ricerca dei pianeti esterni	12
2.1	Velocità radiale	12
2.2	Transito	13
2.3	Astrometria	14
2.4	Microlensing	14
2.5	Direct imaging	15

Sommario

Il Sistema Solare non è solo la culla del pianeta Terra che ospita l'umanità, ma è molto di più. Un complesso equilibrio di pianeti, pianeti nani e corpi minori che orbitano attorno alla grande stella centrale, il Sole. In questo elaborato si cercherà di spiegare come si pensa che il Sistema Solare si sia formato. Si evidenzieranno, poi, le principali caratteristiche dei pianeti che lo compongono, dividendoli in *pianeti rocciosi* e *pianeti gassosi*. Si analizzeranno brevemente, per completezza, anche i corpi minori (*comete, asteroidi, meteore, meteoriti*) e i pianeti nani, incuriosendo infine il lettore con qualche caratteristica dell'ipotetico *Pianeta X*. Nella seconda parte dell'elaborato si analizzeranno le principali tecniche utilizzate per la ricerca di pianeti esterni al Sistema Solare, detti *esopianeti*. Questi metodi si dividono in diretti, come il *direct imaging*, e indiretti, come *velocità radiale, transito, microlensing* e *astrometria*. Si vedrà, quindi, come si è arrivati alla scoperta del primo pianeta extrasolare, come si applicano i vari metodi e quali hanno portato a numerose scoperte e quali a poche.

Capitolo 1

Pianeti del Sistema Solare

Il Sistema Solare (SS) è composto da 8 pianeti, 5 pianeti nani attualmente conosciuti, satelliti e corpi minori. Tutti loro ruotano attorno alla stella centrale chiamata *Sole*. Quest'ultima ha una massa pari a $M_{\odot}=1.989\times 10^{30}$ kg, contenuta in un raggio di circa 6.95×10^5 km e possiede una temperatura superficiale pari a 5780 K. Questo sistema si colloca in un braccio, chiamato *braccio di Orione*, di una galassia a spirale barrata (SBb), detta *Via Lattea*, facente parte del cosiddetto *Gruppo Locale*.

1.1 Origine del Sistema Solare

L'origine del SS risulta ancora incerta per le conoscenze attuali. Ad oggi, però, la teoria più accreditata dagli astronomi è quella *nebulare*: il SS si sarebbe originato dal collasso di una nebulosa composta da gas e polvere per effetto di un evento esterno come, per esempio, lo scoppio di una supernova vicina. Questa nube doveva avere un diametro maggiore di circa 100 UA (Unità Astronomica, corrisponde alla distanza Terra-Sole pari a 1.496×10^{11} m) e una temperatura di circa 23 K.

La nebulosa, cominciando a contrarsi e a collassare, converte l'energia gravitazionale in energia termica, provocando un innalzamento della temperatura, che aumenta verso le zone centrali. Questo genera un disco di gas, detto *disco protoplanetario*, in rotazione attorno alla *protostella* centrale, che diventerà poi il Sole. Il disco in rotazione, una volta raggiunto l'equilibrio idrostatico, comincia a raffreddarsi. Ciò permette la creazione al suo interno di corpi che accrescono di continuo la loro massa. Essi sono detti *planetesimi*, i mattoni dei pianeti, dei satelliti e degli altri corpi minori. La maggior parte della massa presente nel disco ha generato il pianeta più grande del SS, Giove. Dopo cento milioni di anni, quando nella protostella si innescano le *reazioni termionucleari*, essa diventa la stella del SS, il *Sole*. Quest'ultimo affronta una fase detta *T-Tauri* durante la quale genera un forte vento solare che spazza via il gas e la polvere residui dal disco, arrestando il fenomeno di accrescimento gravitazionale dei pianeti. L'ipotesi nebulare, attualmente, è avvalorata anche da alcune osservazioni fatte con i telescopi ALMA. Queste ultime mostrano dischi protoplanetari con al centro una protostella e orbite dei pianeti in rotazione attorno a essa già visibili.

Attualmente si può stimare che l'età del SS sia pari a circa 4.5 miliardi di anni. I metodi usati per questa datazione prevedono l'analisi di rocce antiche o di frammenti di meteoriti caduti sulla Terra. L'analisi tiene conto dei tempi di decadimento di materiali al loro interno come argon e potassio.

1.2 Cos'è un pianeta

Fino a poco più di un decennio fa si considerava il SS composto da 9 pianeti: *Mercurio*, *Venere*, *Terra*, *Marte*, *Giove*, *Saturno*, *Urano*, *Nettuno* e *Plutone*. Nel 2005 gli astronomi scoprirono un corpo nella *Fascia di Kuiper* (regione posta ai confini del SS) denominato *Eris*. Nel 2006 si determinò la sua dimensione, scoprendolo essere più grande di Plutone. La International Astronomical Union (IAU) possiede l'autorità sulla definizione di alcuni parametri fondamentali in astronomia e venne scossa da questa scoperta. Dopo un lungo dibattito si giunse a una nuova definizione di *pianeta*. I requisiti che un corpo celeste deve quindi soddisfare per essere definito *pianeta* sono:

- Orbitare attorno al Sole;
- Avere una massa che permetta alla propria forza di gravità di superare le forze rigide interne, ottenendo l'equilibrio idrostatico e una forma quasi sferica;
- Aver ripulito il percorso della sua orbita da oggetti di massa inferiore.

Se un corpo celeste rispetta i primi due requisiti ma non il terzo, a patto che non sia un satellite, viene definito *pianeta nano*. Questo è quanto è accaduto con Plutone e, ad oggi, il SS è formato dai restanti 8 pianeti.

1.3 Pianeti

I pianeti del SS si possono dividere in due grandi famiglie: *pianeti rocciosi* (Mercurio, Venere, Terra, Marte) e *pianeti gassosi* (Giove, Saturno, Urano, Nettuno). La *fascia degli asteroidi*, situata tra Marte e Giove, è il limite che rende possibile questa divisione. Codesta classificazione si basa sulla struttura interna dei pianeti e per comprenderla si introduce la *snow line*. Questa è una zona molto importante, oltre la quale la temperatura è abbastanza bassa da permettere la solidificazione dei composti dell'idrogeno. Nello spazio tra la snow line e il Sole si sono creati i pianeti rocciosi, mentre, oltre questa linea, si sono formati quelli gassosi.

Nella tabella 1.1 si riassumono i principali dati relativi ai pianeti, successivamente analizzati singolarmente.

Nome	Distanza dal Sole [UA]	Massa [M_{\oplus}]	Inclinazione asse	Lune	Anelli
Mercurio	0.4	0.055	$\simeq 0.0^{\circ}$	0	No
Venere	0.7	0.82	$\simeq 177.3^{\circ}$	0	No
Terra	1.0	1.00	$\simeq 23.5^{\circ}$	1	No
Marte	1.6	0.11	$\simeq 25.2^{\circ}$	2	No
Giove	5.2	318	$\simeq 3.1^{\circ}$	>79	Si
Saturno	9.5	95.2	$\simeq 26.7^{\circ}$	>80	Si
Urano	19.6	14.5	$\simeq 97.7^{\circ}$	>25	Si
Nettuno	30.1	17.1	$\simeq 28.3^{\circ}$	>13	Si
Plutone	39.5	0.0022	$\simeq 115.6^{\circ}$	5	No

Tabella 1.1: *Stime dei principali dati relativi ai pianeti del SS. Si noti la presenza dei valori riguardanti Plutone anche se, come già detto, è attualmente considerato pianeta nano. Si ricorda che $M_{\oplus} = 5.97 \times 10^{24}$ kg e che il valore dell'inclinazione fornito è rispetto all'eclittica.*

1.3.1 Pianeti rocciosi

I pianeti rocciosi del SS sono: *Mercurio*, *Venere*, *Terra* e *Marte*. Essi sono vicini tra loro e si collocano nella zona più vicina al Sole del SS. Sono meno massicci ma più densi degli altri pianeti, hanno una superficie rocciosa, una tettonica a placche e sono pressoché privi di satelliti. Si sono formati in una regione dove le alte temperature, causate dalla vicinanza al Sole, non hanno permesso l'aggregazione di elementi leggeri e volatili (sono pianeti interni alla *snow line*).

La struttura interna dei pianeti rocciosi, come si può apprezzare dalla figura 1.1, presenta un nucleo solido, o in parte liquido, composto da elementi pesanti come ferro e nichel. Questo è sovrastato da un mantello di elementi come silicio e carbonio, sempre più leggeri man mano che si va verso l'esterno. Il tutto è ricoperto da una crosta che connette l'interno all'eventuale atmosfera.

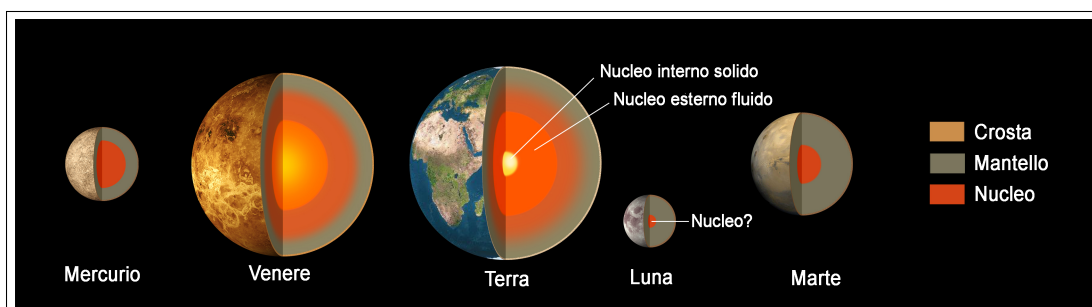


Figura 1.1: *Rappresentazione dei pianeti rocciosi: dimensione e struttura interna.* [Fonte: NASA]

Mercurio

Mercurio è il pianeta più vicino al Sole del SS. Ha un diametro pari a 4879 km ed è, quindi, poco più grande della Luna.

La struttura interna di Mercurio, conforme a quella dei pianeti rocciosi già descritta, vede però la presenza di un nucleo estremamente grande rispetto alle dimensioni del pianeta, occupante quasi il 75% dell'intero corpo. Possiede quindi una densità anomala dovuta a una eccessiva presenza di elementi pesanti, in particolare ferro. Probabilmente Mercurio era un pianeta molto più grande ma, in seguito a una collisione con un corpo celeste di grandi dimensioni, ha perso gran parte del proprio mantello.

La superficie di Mercurio è ricoperta da crateri, a evidenza dell'inattività geologica da miliardi di anni: i crateri da impatto, in caso contrario, sarebbero stati cancellati da movimenti della crosta. “Di recente” si sono osservate delle pieghe sulla superficie dovute, si pensa, alla contrazione del pianeta per effetto del raffreddamento del nucleo centrale.

Mercurio non ha satelliti ed è troppo piccolo per trattenere un'atmosfera, ma attorno a esso esiste un'*esosfera* costituita prevalentemente da ossigeno, sodio, idrogeno, elio e potassio. La vicinanza al Sole e l'assenza di atmosfera fanno sì che su Mercurio ci sia una fortissima escursione termica tra la notte, che si aggira attorno ai 100 K, e il giorno, con una temperatura di circa 700 K. Questo rende molto improbabile la possibile abitabilità del pianeta. Per effetto dell'inclinazione pressoché nulla del suo asse di rotazione rispetto all'eclittica, Mercurio ha i poli perennemente congelati e su esso non si susseguono le stagioni.

Possiede un'orbita estremamente ellittica, ha un *periodo di rivoluzione* (giro completo

dell'orbita) pari a 88 giorni e un *periodo di rotazione* (giro completo su se stesso) pari a 59 giorni e questo porta a una risonanza 3:2, 3 periodi di rotazione eguagliano 2 periodi di rivoluzione. La durata del giorno su Mercurio è, quindi, pari a circa 176 giorni terrestri.

Questo pianeta, infine, possiede un *campo magnetico* pari all'1% di quello terrestre.

Mercurio è stato visitato da diverse spedizioni spaziali tra le quali si ricorda quella della NASA MESSENGER. Di recente è stata lanciata la spedizione BepiColombo dell'ESA (Agenzia Spaziale Europea) che entrerà nell'orbita di Mercurio nel 2024.

Venere

Venere è il secondo pianeta del SS ed è, in cielo, l'astro più luminoso dopo il Sole e la Luna. Ha dimensioni molto simili a quelle della Terra, con un raggio pari a 6052 km e non possiede né satelliti né anelli.

Sulla sua superficie, grazie alla missione NASA Magellano di fine anni Ottanta, si riscontra la presenza di valli e montagne del tutto simili a quelle terrestri, e il monte più alto (circa 8.8 km) è denominato *Maxwell Montes*. Si notano decine di migliaia di vulcani di cui alcuni ancora attivi: si pensa che circa 300-500 milioni di anni fa, un'intensissima attività vulcanica del pianeta, ne abbia modificato la superficie.

Nel 1975, la missione spaziale Venera 9 cercò di visitare la superficie di Venere ma di tutti gli strumenti, che si provavano a far atterrare, se ne perdeva il segnale a pochi chilometri dal suolo. Si capì che le sonde implodevano arrivate sulla superficie del pianeta a causa di una pressione pari a circa 92 bar, unita a un'atmosfera ricca di nubi fatte di acido solforico, il tutto a una temperatura di circa 330 K. Venere quindi possiede una densissima atmosfera, circa 100 volte più densa di quella terrestre, composta prevalentemente da anidride carbonica. Attorno al pianeta, si estende una densa coltre di nubi dello spessore di circa 30 km composta da acido solforico e vapore acqueo. Queste nubi sono responsabili del fortissimo *effetto serra*: il 10% dell'energia che riesce a oltrepassare le nubi, rimane poi intrappolato e provoca un aumento di temperatura dell'atmosfera stessa. Quest'ultima, però, è in grado di mantenere la temperatura superficiale costante, che varia solo con l'altitudine del luogo.

Come si nota dalla tabella 1.1, l'inclinazione dell'asse di rotazione garantisce un clima stabile, senza stagioni. Un particolare non trascurabile è che Venere, come si vedrà per Urano, svolge una *rotazione retrograda*, ossia opposta alla rotazione degli altri pianeti (il Sole sorge a Ovest e tramonta a Est). Una rivoluzione del pianeta dura 225 giorni e una rotazione completa avviene in 243 giorni e ciò porta a una durata del giorno su Venere pari a 117 giorni terrestri.

Dopo Marte, Venere è il pianeta più visitato da missioni spaziali. Una spedizione ancora operativa è quella giapponese della JAXA, chiamata Akatsuki.

Terra

La Terra è il terzo pianeta del SS per vicinanza al Sole. È il più grande tra i pianeti rocciosi, con un raggio di 6371 km. È il pianeta conosciuto meglio dal momento che si può direttamente studiare. La forma di questo corpo è detta *geoide*: è più schiacciato ai poli e più largo all'equatore.

La Terra è un pianeta abitato, un'eccezione non solo nel SS ma, dalle conoscenze attuali, nell'Universo e rappresenta per eccellenza ciò che si crede essere un pianeta abitabile. Il suo periodo di rotazione dura poco meno di 24 ore e la rivoluzione viene compiuta

in poco più di 365 giorni. Come si nota dalla tabella 1.1, l'inclinazione dell'asse di rotazione provoca il susseguirsi delle stagioni durante il percorso della Terra nella sua orbita.

La struttura interna è conforme a quella già descritta per i pianeti rocciosi. Presenta un nucleo prevalentemente composto da ferro e pochissimo nichel, al centro solido e poi ricoperto da una parte liquida di circa 3400 km. I moti convettivi di materiali elettricamente conduttivi presenti nel nucleo, sono responsabili del campo magnetico terrestre. Questo ripara la superficie del pianeta dal vento solare, creando il fenomeno dell'*aurora boreale*. Sopra il nucleo vi è il mantello con uno spessore di 2800 km composto prevalentemente da ossigeno, silicio, zolfo e magnesio. Tutto è ricoperto da una crosta. La superficie della Terra non ha una conformazione perpetua poiché è attiva la tettonica a placche, responsabile della deriva dei continenti.

L'atmosfera di questo pianeta è pressoché l'1% dello spessore dello stesso ed è costituita per il 78% da azoto, 21% ossigeno e il restante è un composto di gas minori come argon e anidride carbonica. Questi ultimi sono essenziali per generare l'effetto serra che, se contenuto, rende il pianeta abitabile e non in perenne glaciazione. La visione della Terra dallo spazio, la distingue da tutti gli altri pianeti poiché, grazie all'atmosfera e al fatto che il 70% della superficie è coperto da acqua liquida, il pianeta risulta di un acceso colore blu.

La Terra possiede un satellite, la *Luna*, che ha effetti dinamici (forze mareali) sul pianeta stesso, oltre che un'importante presenza visiva già annotata nei dettagli da Galileo Galilei. La superficie lunare è ricoperta da crateri, colline e monti, tutto ricoperto a sua volta da una polvere detta *regolite*. Questo satellite mostra alla Terra sempre la stessa faccia, la quale è ricoperta dai cosiddetti *mari*. Essi sono regioni per lo più pianeggianti, con pochi crateri, che risultano scuri vista la loro poca riflettività della luce solare. I mari sono posti più in basso rispetto al livello medio della superficie lunare. Sono presenti anche delle zone molto luminose e ricche di crateri, con una maggiore elevazione rispetto ai mari, dette *terre*. Soprattutto attorno ai mari sono presenti alcune catene montuose. Esistono tre possibili ipotesi sull'origine del satellite: cattura (la Luna si è formata lontano dalla Terra ed è stata catturata dal pianeta successivamente); accrescimento (Terra e Luna sono nate separatamente, il satellite è poi accresciuto grazie ai frammenti in orbita attorno al pianeta); fissione (la Luna si è formata dai frammenti espulsi dalla Terra per effetto di una collisione in tempi remoti con un corpo di dimensioni simili a quelle di Marte).

La Terra, essendo la culla dell'umanità, non ha bisogno di spedizioni spaziali per essere conosciuta e visitata.

Marte

Marte è il quarto pianeta del SS, possiede un raggio pari a 3389 km e ha una bassa densità.

La struttura di Marte è simile a quella già introdotta per i pianeti rocciosi. Non presenta, allo stato attuale, un campo magnetico anche se le sue rocce ne testimoniano la presenza in passato. La sua superficie è piena di vulcani, crateri da impatto, fratture e bacini. Questi ultimi testimoniano che in passato doveva essere un pianeta ricco di acqua superficiale (oggi sono ben visibili dei solchi del tutto simili a letti di fiumi). Attualmente non è possibile avere acqua liquida in superficie vista la temperatura che si aggira sui 213 K e l'atmosfera molto poco densa. Grazie alla missione dell'ESA Mars Express, però, si afferma la presenza di laghi o mari sotto la superficie, là dove

la pressione è maggiore. Marte è anche chiamato *pianeta rosso*, nome dovuto alla presenza di ossidi ferrosi sulla sua superficie che gli donano il caratteristico colore rosso. Su Marte spicca il *Monte Olimpo*, il rilievo più grande presente in tutto il SS. L'inclinazione dell'asse di rotazione permette il susseguirsi delle stagioni su questo pianeta. Si nota anche da Terra, quindi, che i poli sono ricoperti da calotte di ghiaccio d'acqua su cui d'inverno si sovrappone uno strato di ghiaccio secco. In base alla stagione esse si espandono o riducono. La velocità del processo porta l'anidride carbonica a sublimare e, successivamente, a dirigersi verso il polo opposto. Se questo processo avviene troppo velocemente, si creano delle tempeste di polvere che possono rendere opaca l'atmosfera dell'intero pianeta anche per diverse settimane. La mancanza di azoto nell'atmosfera, per il 96% formata da anidride carbonica, unitamente ai raggi ultravioletti che arrivano alla superficie indisturbati, rendono la terra marziana sterile. La vita, quindi, potrebbe svilupparsi solo sotto la superficie. Marte ha un tempo di rotazione pari a circa 24 ore e un tempo di rivoluzione pari circa a 687 giorni. Il pianeta rosso possiede due satelliti denominati *Phobos*, dominato da un immenso cratere detto *Stickney*, e *Deimos*. Sono lune naturali, di piccole dimensioni e con una scarsa riflettività della luce. La loro superficie presenta molti crateri, è ricoperta di *regolite* e si pensa che siano costituiti principalmente da rocce carbonatiche. La prima spedizione con meta il pianeta rosso risale alla missione NASA Mariner 4 del 1965. Attualmente, tra le molte missioni dirette verso Marte, si cita la spedizione ExoMars 2020. Questa è la seconda fase di una missione iniziata nel 2016 che ha portato una sonda a orbitare attorno a Marte. Prossimamente, si pensa verso Settembre 2022, avrà inizio la seconda fase che porterà un rover a toccare la sua superficie. Sarà dotato di un perforatore costruito in Italia, in grado di penetrare nel terreno marziano per circa 2 metri con l'obiettivo di rilevare, se esistono, forme di vita. Tutte queste missioni hanno lo scopo ambizioso di portare l'uomo su Marte negli anni a venire.

1.3.2 Pianeti gassosi

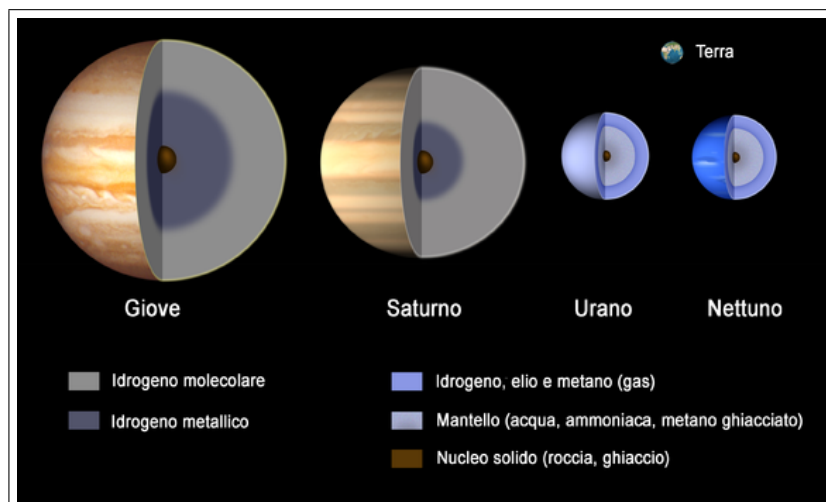


Figura 1.2: Rappresentazione dei pianeti gassosi: dimensione e struttura interna. Si può notare il paragone tra le dimensioni dei pianeti gassosi e quella della Terra. [Fonte: NASA]

I pianeti gassosi del SS sono: *Giove*, *Saturno*, *Urano* e *Nettuno*. Sono i pianeti più lontani dal Sole, oltre la già citata snow line. La loro struttura interna, come si può

apprezzare dalla figura 1.2, è composta da un nucleo solido roccioso e metallico pari a circa il 5-10% della massa totale del pianeta. Il tutto è accerchiato da uno spesso strato gassoso. Essi sono molto massicci e freddi e possiedono intere famiglie di satelliti.

Giove

Giove è il quinto pianeta del SS. Con un raggio 10 volte il raggio terrestre, è il pianeta più grande del sistema. È facile osservarlo nel cielo notturno dalla Terra, secondo per luminosità solo a Sole, Luna e Venere.

Questo pianeta gassoso ha una densità relativamente bassa e si muove su un'orbita leggermente ellittica. È composto principalmente da idrogeno ed elio. Esso possiede una gigantesca atmosfera in cui sono presenti metano, acqua, ammoniaca e altri elementi, fonti del caratteristico colore che si osserva puntando un telescopio su Giove. Nella sua atmosfera sono presenti molti cicloni e un perenne uragano conosciuto come *grande macchia rossa*.

Si pensa che la struttura interna del pianeta presenti un nucleo molto denso, ghiacciato o roccioso, ricoperto da una vasta regione di idrogeno metallico liquido, sovrastata da una regione di idrogeno superfluido. L'idrogeno metallico liquido si comporta come un conduttore elettrico e ciò genera un enorme campo magnetico.

Un anno su Giove dura più di 11 anni terrestri ma ha un periodo di rotazione molto corto, pari a circa 10 ore. Il suo asse di rotazione, come si evince dalla tabella 1.1, è molto poco inclinato rispetto all'eclittica e ciò porta al non susseguirsi delle stagioni.

Giove possiede una flebile struttura ad anelli e innumerevoli satelliti, più dei 79 attualmente conosciuti. Tra loro si ricordano i quattro più famosi, già scoperti da Galileo Galilei: *Io*, *Europa*, *Ganimede* e *Callisto*. I satelliti più interni sono Io ed Europa: hanno una dimensione pari a circa quella della Luna e sono composti principalmente da roccia e metallo. Europa, però, contiene anche molta acqua sotto forma di un guscio superficiale ghiacciato che si pensa ricopra un oceano d'acqua globale. La sua superficie presenta pochi crateri da impatto, sintomo della giovane età del satellite. Io è il corpo vulcanicamente più attivo del SS e possiede una superficie ricoperta da zolfo e lava. I satelliti più esterni, Ganimede e Callisto, hanno dimensioni maggiori di quella di Mercurio e sono composti in parti eguali da roccia e acqua. Ganimede è la luna più grande del SS ed è l'unico satellite ad avere un proprio campo magnetico. La sua superficie è formata per lo più da acqua ghiacciata in cui si notano zone più chiare (ghiaccio giovane fuoriuscito dall'interno). La superficie di Callisto è quasi completamente ricoperta da crateri, rappresentanti la vecchiaia del satellite. Questa luna non mostra quasi per nulla un'attività geologica recente, a differenza delle altre.

Grazie a due missioni spaziali della NASA, Galileo e Juno, si conoscono molte cose su Giove. La prima missione citata è iniziata nel 1995 e, grazie ai numerosi strumenti scientifici utilizzati, ha fornito molti dati sulle lune di Giove, cosa che non è successa con la missione Juno. Quest'ultima, arrivata a destinazione nel 2016, è attualmente in orbita attorno al pianeta e ha come obiettivo ultimo quello di fornire dati per riuscire a comprendere l'origine e l'evoluzione del corpo celeste. Altre numerose spedizioni sono in programma con meta il sistema di Giove. Tra queste c'è la missione dell'ESA JUICE dedicata all'esplorazione della luna Ganimede e delle altre lune galileiane, con lo scopo di identificare ambienti favorevoli alla vita. Infine, la missione Europa Clipper, voluta dalla NASA per studiare esclusivamente il satellite Europa vista la sua importanza astrobiologica.

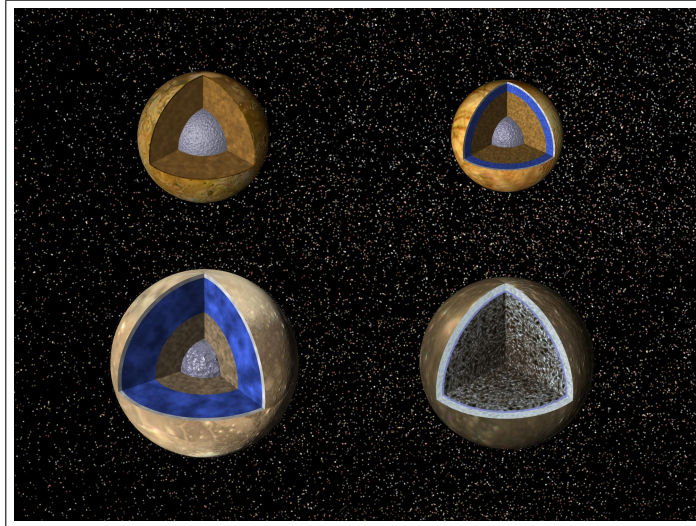


Figura 1.3: Si raffigura la struttura interna delle lune di Giove: Europa in alto a destra, Io in alto a sinistra, Callisto in basso a destra e Ganimede in basso a sinistra. Tutti i loro nuclei, a eccezione di quello di Callisto, sono metallici e sono circondati, sempre a eccezione di Callisto, da gusci di roccia (in marrone). Si notano gusci di acqua in forma ghiacciata (in blu) e in forma liquida (in bianco). Callisto è rappresentato come una miscela relativamente uniforme di uguali quantità di acqua e roccia. [Fonte: Ferreri W., Ferrara A., VIAGGIO NELL'UNIVERSO - Scoperte e segreti dell'universo, Milano, RSC MediaGroup S.p.A., 2019]

Saturno

Saturno è il sesto pianeta del SS ed è il secondo pianeta gigante gassoso, con un raggio medio pari a circa 58232 km. Questo gigante è composto prevalentemente da elio, idrogeno, un po' di ammoniaca e alcuni idrocarburi, composizione molto più simile a quella di una stella. Ha tempo di rotazione pari a 10 ore e di rivoluzione pari a 29 anni. Saturno possiede una splendida *struttura ad anelli* osservabile anche da Terra per la sua estensione e ottima proprietà di *albedo* (riflettono molta luce). Gli anelli si estendono da circa 6600 km dall'equatore del pianeta, fino a 12000 km e hanno uno spessore di circa 20 metri. Questo disco si divide in 7 anelli formati da ghiaccio d'acqua, polvere, gas e roccia. Si possono notare tre divisioni principali, denominate A (anello più esterno), B (anello centrale, grande e brillante) e C (interno all'anello B, quasi trasparente).

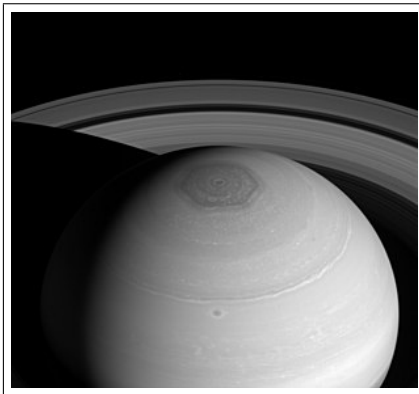


Figura 1.4: Immagine di Saturno: si intravedono gli anelli e la forma esagonale presente al polo.

[Fonte: NASA/JPL]

Gli anelli A e B sono separati da uno spazio detto *divisione Cassini*, ma si ricorda anche la *divisione Encke*, all'interno dell'anello A. Ci sono, poi, altri anelli detti D, F, G ed E.

Osservandone il Polo Nord (vedi figura 1.4) si nota la presenza di una struttura con forma esagonale nel cui interno si trova un enorme vortice polare accerchiato da piccole formazioni, simili a temporali terrestri. Il centro del vortice viene detto *The Rose*. Non è ancora chiaro se questa struttura esagonale, probabilmente presente anche al Polo Sud, sia perenne.

Il satellite più grande che Saturno possiede è *Titano*, più grande persino di Mercurio. Titano è l'unico esempio, al di fuori della Terra, su cui è presente metano ed etano in forma liquida. Esso è l'unico satellite ad avere

un'atmosfera rilevante composta prevalentemente da azoto. Un'altra luna degna di nota è *Encelado*. Ha una superficie ghiacciata che presenta dei geysir dai quali fuoriesce acqua salata e altri composti organici. Questi derivano dall'oceano che vi è sotto la superficie della luna. Oltre a questi satelliti, ne sono attualmente conosciuti 80, tra cui alcuni detti *satelliti pastore*: sono le lune che orbitano all'interno o subito oltre il sistema degli anelli di Saturno e garantiscono orbite stabili agli anelli stessi.

Non si sono verificate molte missioni con direzione Saturno ma si ricorda la missione NASA Cassini, o anche detta Cassini-Huygens. Quest'ultima dal 2004 sta fornendo dati e immagini sorprendenti del pianeta. Spesso, però, si sono ottenuti dati durante i *flyby*, incontri ravvicinati di sonde di passaggio che permettono di acquisire informazioni molto dettagliate in poco tempo.

Urano

Urano è il settimo pianeta del SS e, con un raggio pari a 25362 km, è il primo dei giganti ghiacciati. La sua superficie presenta alcune macchie scure (nubi e temporali) sparse su una distesa uniforme. Si osserva anche una macchia scura persistente, simile alla già citata macchia rossa di Giove.

Questo pianeta è composto principalmente da idrogeno, elio, tracce di ammoniaca, acqua e idrocarburi, tra cui il metano. Quest'ultimo rende il pianeta del suo caratteristico colore blu-verde, assorbendo la luce rossa che incide su di esso. Si pensa che al centro del pianeta ci sia un nucleo denso, sovrastato da fluidi densi e molto caldi, tutto ricoperto da una freddissima atmosfera, che arriva a circa 50 K. Su Urano si verificano violente raffiche di vento che toccano anche i 900 km/h.

Una particolarità non trascurabile del pianeta è l'angolo tra il suo asse di rotazione e l'eclittica: è quasi un angolo retto. Questo comporta il fatto che il Polo Nord e il Polo Sud del pianeta siano sullo stesso piano del SS. La conseguenza diretta è che per 21 anni un intero emisfero sarà illuminato dal Sole e l'altro no. Un'ipotesi che spiega questa insolita inclinazione del suo asse di rotazione, è che Urano abbia avuto un fortissimo impatto in tempi remoti con un corpo celeste delle dimensioni simili a quelle della Terra, che ha modificato in questo modo il suo asse. L'inclinazione porta Urano, come Venere, ad avere una rotazione retrograda. Su questo pianeta l'anno dura ben 84 anni terrestri ma ha un periodo di rotazione molto breve, circa 17 ore.

Urano possiede un campo magnetico originato da uno strato fluido al di sopra del nucleo roccioso. L'asse del suo campo magnetico non coincide con l'asse di rotazione, cosa che invece succede per tutti gli altri pianeti, a eccezione di Nettuno. Questi assi formano un grande angolo, pari circa a 55° .

Attorno a questo pianeta, si evidenzia un complesso sistema di 13 anelli, molto più sottili di quelli di Saturno, e più di 25 lune attualmente conosciute. Queste ultime mostrano sempre la stessa faccia al pianeta dato che hanno tempo di rotazione e rivoluzione uguali. Il satellite maggiore è *Titania* e ha una superficie ghiacciata ricoperta da fratture, sintomo di un'attività geologica importante. La presenza di anidride carbonica sulla superficie di questa luna, indica la possibile esistenza di una sottile atmosfera stagionale di CO_2 .

Man mano che si trattano pianeti sempre più ai confini del SS, le missioni spaziali che li vedono protagonisti diminuiscono. Urano, infatti, non è stato meta di nessuna spedizione ma gli unici dati che si possiedono derivano da alcuni flyby. Quello che ha fornito maggiori informazioni è relativo alla missione NASA Voyager 2 del 1986. Altri dati si sono ottenuti grazie alle osservazioni compiute dai telescopi Hubble e terrestri.

Nettuno

Nettuno è l'ottavo pianeta del SS ed è il secondo gigante ghiacciato, con un raggio pari a circa 24622 km. Un anno per Nettuno dura ben 165 anni terrestri e la struttura interna del pianeta è del tutto simile a quella di Urano.

Grazie a telescopi come il VLT (Very Large Telescope) dell'ESO, si osserva la dinamicità dell'atmosfera di Nettuno. Il colore caratteristico di questo pianeta è il bluastro su cui spicca una grossa macchia scura detta *Great Dark Spot*. Questa si pensa essere un grande ciclone in movimento, accerchiato da nubi più chiare. Queste nubi di metano ghiacciato sparse sul pianeta sono spinte da venti fortissimi che raggiungono velocità di circa 2000 km/h. Si può, quindi, considerare Nettuno come *il pianeta dei venti*.

L'inclinazione dell'asse di rotazione, simile a quella della Terra, fa supporre l'esistenza delle stagioni, le quali durano circa 40 anni l'una. Questo gigante ghiacciato possiede un campo magnetico ben 27 volte più intenso di quello della Terra ma il suo asse non coincide con l'asse di rotazione del pianeta, come visto per Urano.

Ha un piccolo sistema di 5 anelli abbastanza instabile, in perenne fase di modifiche e possiede più di 13 satelliti, tra cui *Tritone*. In quest'ultimo si suppone la presenza di un oceano sotto-superficiale. Percorre, poi, un'orbita particolare: è l'unico satellite tra quelli di grandi dimensioni a orbitare attorno al pianeta in direzione opposta a quella della sua rotazione. Si pensa quindi che questa luna appartenesse precedentemente alla Fascia di Kuiper e solo successivamente sia stata catturata dal pianeta. A causa delle forze mareali, poi, Tritone rivolge sempre la stessa faccia a Nettuno.

Nettuno è meta di poche missioni spaziali, si ricorda solo la sonda NASA Voyager 2.

1.3.3 Pianeti nani e corpi minori

Oltre ai pianeti, nel SS si trovano i cosiddetti *corpi minori* e *pianeti nani*. Di questi ultimi, attualmente, se ne conoscono 5: *Plutone*, *Cerere*, *Haumea*, *Makemake* ed *Eris*. Sono tutti situati oltre Nettuno, a eccezione di Cerere, il quale si trova nella fascia di asteroidi tra Marte e Giove. Per molti anni Plutone venne considerato il nono pianeta del SS, per questo merita un'analisi più dettagliata.

Per corpi minori invece, ci si riferisce principalmente a *comete*, *meteore*, *meteoriti* e *asteroidi*, anche questi trattati in seguito.

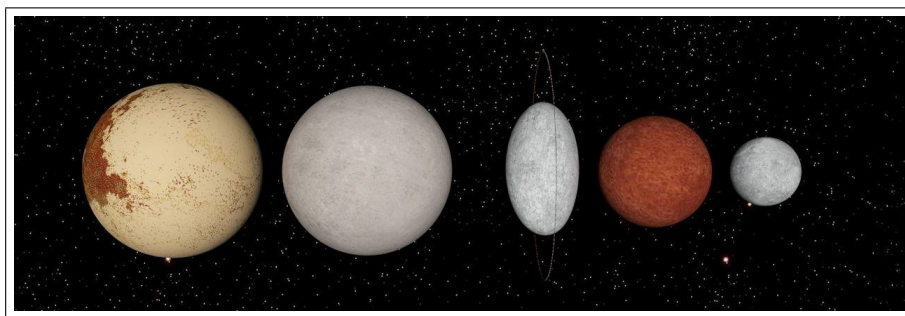


Figura 1.5: Rappresentazione dei pianeti nani in scala di dimensioni. Da sinistra: *Plutone*, *Eris*, *Haumea*, *Makemake* e *Cerere*. [Fonte: <http://www.focus.it/>]

Plutone

Plutone è il primo pianeta nano della Fascia di Kuiper e ha un raggio pari a 1151 km, un sesto di quello terrestre. Ha una superficie simile ai pianeti terrestri, con pianure, montagne, crateri e ghiacciai di acqua e di metano. Ha un nucleo centrale solido e pesante ricoperto, si pensa, da un enorme mantello di acqua ghiacciata. Su tutta la superficie è visibile una perpetua presenza di tettonica. A causa della continua

evaporazione dell'azoto ghiacciato presente in una delle pianure più estese del pianeta, esso possiede un'atmosfera abbastanza densa e spessa. Plutone non ha un campo magnetico e non ha strutture ad anelli, ma possiede 5 satelliti: *Caronte*, il più grande, seguito da *Notte*, *Idra*, *Cerbero* e *Stige*. Caronte e Plutone formano una sorta di sistema binario dovuto a una particolare rotazione sincrona (si mostrano sempre la stessa faccia). Questa luna ha una superficie giovane e variegata e presenta zone in cui si riscontra la presenza di *toline*, sostanza chimica alla base del possibile sviluppo della vita. Vista la notevole distanza dalla Terra, ci sono state pochissime missioni spaziali con meta Plutone. Si può solo ricordare la sonda NASA New Horizons del 2015.

Asteroidi, comete, meteore e meteoriti

Gli *asteroidi* fanno parte dei corpi celesti minori. Si pensa che siano i resti della materia primordiale che ha creato i pianeti del SS. Si originano in grandi zone preferenziali come la *cintura di asteroidi* posizionata tra Giove e Marte. Si conoscono poi asteroidi situati nei cinque *punti troiani* di Giove detti *asteroidi troiani*. Questi non si sposteranno mai da questa zona perché sono controllati dal campo gravitazionale del pianeta.

Si citano anche gli asteroidi detti *Apollo-Amor*, asteroidi piccoli che entrano nell'orbita della Terra: si dividono in NEA (Near-Earth Asteroids) e PHA (Potentially Hazardous asteroids). Esistono infine asteroidi lontani, situati addirittura nelle vicinanze di Urano. In base alla composizione, generalmente, si dividono in *C-type* (contengono carbonio), *S-type* (contengono silicati) e *M-type* (contengono metalli). Gli asteroidi presentano molti crateri sulla superficie, non hanno atmosfera e non hanno forma sferica.

Dopo Nettuno si incontra la *Fascia di Kuiper* che contiene oggetti estremamente freddi e poco brillanti, composti da rocce e ghiaccio di molecole, alcune anche organiche. Questa zona è la culla di molte *comete*, oggetti delicati con un nucleo di ghiaccio che possono formare una coda di polveri e una di gas avvicinandosi al Sole. Molte comete, però, arrivano da una zona ancora più remota, addirittura esterna al SS, detta *Nube di Oort*. Quasi tutte le comete descrivono delle orbite fortemente ellittiche attorno al Sole e, se non si distruggono con un passaggio troppo ravvicinato con la stella, tornano a essere visibili dalla Terra periodicamente.

Le *meteore*, infine, sono corpi solidi provenienti dallo spazio. Queste si disintegrano a contatto con l'atmosfera della Terra generando delle scie luminose (si chiamano comunemente *stelle cadenti*). Quando questi corpi sono abbastanza grandi da non distruggersi a contatto con l'atmosfera terrestre, arrivano a impattare la superficie del pianeta. Questi prendono il nome di *meteoriti*.

1.3.4 Ipotetico Pianeta X

Il team di Caltech, studiando le orbite di alcuni corpi presenti nella Fascia di Kuiper, ha notato in esse delle deviazioni anomale. Queste sono state ricondotte a un effetto della gravità generato dall'ipotetica presenza di un pianeta detto *Pianeta Nove* o *Pianeta X*. Esso non è stato ancora scoperto, ma si ipotizza la sua esistenza come soluzione a un modello matematico che, altrimenti, risulterebbe insolitamente errato. Il Pianeta X avrebbe una dimensione simile a quella di Nettuno e una massa 10 volte quella terrestre. Dovrebbe percorrere un'orbita molto allungata attorno al Sole in un tempo che va dai 10000 ai 20000 anni. Sarebbe, infine, 20 volte più lontano dal Sole rispetto alla posizione di Nettuno.

Capitolo 2

Ricerca dei pianeti esterni

La ricerca dei *pianeti extrasolari* o *esopianeti*, inizia nel 1922 quando Aleksander Wolszczan e Dale Frail scoprirono la prima massa planetaria attorno a una *pulsar*, una stella di neutroni. Intorno alla metà del 1900 per trovare esopianeti venivano usati metodi come la *velocità radiale*, sfruttando *l'effetto Doppler*, o i *transiti*. Solo alla fine del 1980 si cominciarono ad avere tecnologie più avanzate e vennero introdotti altri metodi

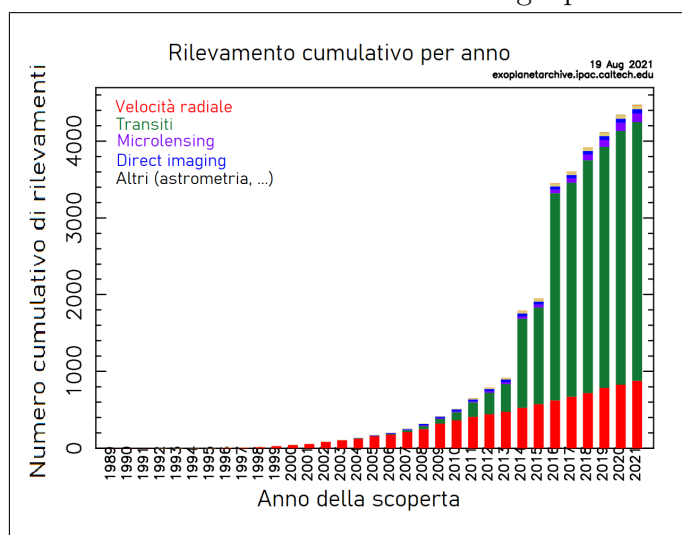


Figura 2.1: *Diagramma cumulativo che mostra l'efficienza dei vari metodi, diretti e indiretti, nel tempo.*

[Fonte: NASA e riadattata]

extrasolari e oltre 5000 sono classificati come candidati. Il metodo, tra quelli che si analizzeranno, che ha dato maggiori risultati è quello dei transiti, seguito dal metodo della velocità radiale. A pari merito si hanno poi i metodi di microlensing e direct imaging e, in ultima posizione, l'astrometria (vedi figura 2.1).

2.1 Velocità radiale

La già citata scoperta del primo pianeta extrasolare attorno alla stella 51 Pegasi, è stata possibile grazie all'applicazione del metodo indiretto della *velocità radiale*. Questa tecnica sfrutta *l'effetto Doppler*: non si osserva direttamente l'esopianeta, ma solo i suoi effetti gravitazionali sul moto della stella attorno alla quale orbita. Il pianeta e la stella orbitano attorno al *centro di massa* del loro sistema. Il corpo minore, il pianeta,

provoca cambiamenti di velocità e posizione nel corpo più grande, la stella. Di questo moto, si considera la *velocità radiale* che è la componente di velocità del corpo celeste lungo la linea di vista dell'osservatore. Questa velocità provoca uno spostamento delle righe spettrali generate dalla stella verso il blu, se si sta avvicinando all'osservatore, o verso il rosso, se si sta allontanando, detti rispettivamente *blueshift* e *redshift*.

La variazione di velocità è maggiore per pianeti su orbite più strette. Le prime applicazioni infatti, hanno portato alla scoperta di pianeti giganti molto vicini alla stella attorno alla quale orbitano, detti *giovinani caldi*.

Questo metodo ha diversi limiti di applicabilità. Se la variazione di velocità avviene non radialmente all'osservatore, egli non noterà nessuna differenza e il metodo è inutilizzabile. Inoltre lo strumento usato, ovvero uno spettrografo, deve raggiungere una risoluzione adeguata pari almeno ad alcuni metri al secondo. Un'altra difficoltà si incontra osservando sistemi con più pianeti in orbita attorno alla stessa stella.

Grazie a questo metodo si ottengono molte informazioni tra cui il periodo, le masse, a volte l'eccentricità e l'ampiezza della variazione di velocità. Quest'ultima si indica con K e si calcola come espresso dall'equazione 2.1:

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P_{orb}} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_* + M_p)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (2.1)$$

con $G = 6.67 \times 10^{-8} \left[\frac{cm^3}{gs^2} \right]$ costante di gravitazione, P_{orb} periodo orbitale, M_p massa del pianeta, M_* massa della stella, i angolo formato fra la normale del piano orbitale e la linea di vista, e eccentricità.

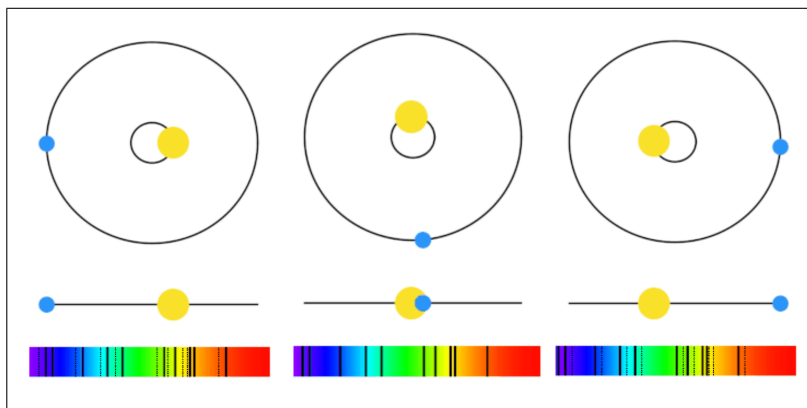


Figura 2.2: La stella (in giallo) si allontana radialmente dall'osservatore (a sinistra) e poi si avvicina (a destra). Si apprezza lo spostamento, blueshift e redshift, delle righe spettrali (in nero) rispetto a quelle attese in assenza di oscillazione radiale della stella (tratteggiate). [Fonte: Alysa Obertas, e riadattata]

Gli strumenti più precisi per applicare questa tecnica che attualmente si possiedono sono HARPS e HARPS-N al telescopio da 3.6 m dell'ESO (European Southern Observatory) e al Telescopio Nazionale Galileo alle Canarie. Di recente si è aggiunto ESPRESSO al Very Large Telescope dell'ESO. Questi hanno permesso la determinazione di oltre 700 esopianeti.

2.2 Transit

Il *transito* è il metodo che ha portato a più risultati. Si basa sulla misura della variazione di luminosità di una stella nel tempo, servendosi di un fotometro. Questa variazione la si ottiene dal *transito* del pianeta tra la stella e l'osservatore che genera una diminuzione di luminosità ricevuta da quest'ultimo. Questa variazione è direttamente proporzionale al quadrato del raggio del pianeta e inversamente proporzionale al quadrato del raggio

della stella. Questo metodo diventa molto più efficace se applicato con strumentazioni situate nello spazio, così da non avere l'atmosfera a disturbare la ricezione del segnale.

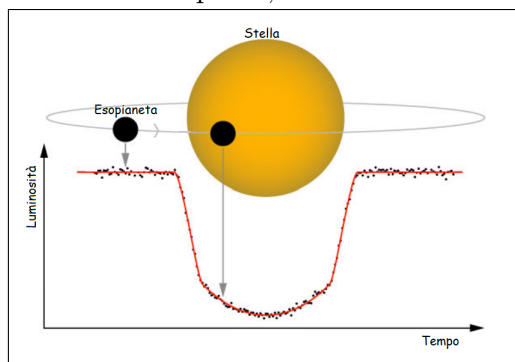


Figura 2.3: *Curva di luminosità della stella.* [Fonte: Nicolas Cretton e riadattata]

Osservando i transiti, si possono ottenere molte informazioni come il periodo (osservando più transiti), la durata del transito e la sua ampiezza. Osservando poi i *transiti secondari*, ossia quando l'esopianeta è oscurato dalla stella, è possibile avere informazioni sulla temperatura superficiale del pianeta extrasolare. Questo è successo nel 2005 con l'osservazione degli esopianeti attorno a TrES-1 e HD 209458 da parte del satellite Spitzer della NASA. La maggior parte degli esopianeti transitanti scoperti, sono i già citati pianeti gioviani caldi.

Nel 2001 è stato trovato un pianeta senza anelli, senza satelliti e con massa maggiore di 3 masse terrestri, orbitante attorno la stella HD 209458B. Nel 2011 si scopre, con questo metodo, un sistema planetario di 6 esopianeti orbitanti attorno alla stella Kepler 11 con periodi orbitali tra i 10 e i 50 giorni e masse tra le 2 e le 13 masse terrestri.

L'Hubble Space Telescope applica questo metodo di ricerca, ma il vero primo satellite pensato per questo scopo è il satellite francese COROT. A esso si deve la scoperta del primo esopianeta roccioso detto *Corot 7*. La missione della NASA Kepler ha portato alla scoperta di molti esopianeti transitanti grazie proprio a questo metodo indiretto.

2.3 Astrometria

Grazie all'*astrometria*, si può rilevare la presenza di un esopianeta misurando la posizione della stella proiettata sulla sfera celeste. In assenza del pianeta, la stella si muove di moto rettilineo uniforme. Se il pianeta orbita attorno a essa, il suo moto subisce delle oscillazioni rispetto alle altre stelle in cielo. La stella procederà compiendo un'elica, che in proiezione appare come un'ellisse. Il semiasse dell'ellisse, che rappresenta l'ampiezza dell'oscillazione, è chiamato *segnale astrometrico*. Questo aumenta all'aumentare della massa del pianeta rispetto alla massa della stella. Il massimo segnale astrometrico si ottiene per esopianeti di massa maggiore attorno a stelle vicine.

Sebbene sia un metodo indiretto usato dall'Ottocento, ha portato alla scoperta accertata di un solo esopianeta, orbitante attorno a una delle stelle che compongono la binaria HD 176051. Il motivo di questo unico successo è che per l'applicazione di questo metodo è richiesta una risoluzione difficile da raggiungere anche con gli strumenti più moderni. Grazie, però, al lavoro del satellite HIPPARCOS dell'ESA, in funzione tra il 1990 e il 1994, e al satellite GAIA dell'ESA lanciato nel 2014, si stanno accumulando dati sempre più precisi per migliorare l'applicazione dell'astrometria. In particolare, grazie a GAIA, si continuano a ottenere dati di orbite in cui viene diviso l'effetto dovuto al moto del pianeta e quello dovuto alla parallasse.

2.4 Microlensing

Lo spazio-tempo, come previsto dalla Relatività Generale di Einstein, viene deformato dalla presenza di un corpo dotato di massa. Anche il percorso della luce viene, quindi,

deviato in prossimità del corpo stesso. Questo effetto di *lente* è alla base del *microlensing*. Per applicare questo metodo indiretto si deve avere, dietro alla stella che si osserva (lente), una sorgente luminosa lontana allineata lungo linea di vista dell'osservatore. L'effetto di microlente si viene a creare quando la lente e la sorgente di fondo appaiono proiettate nel cielo a una distanza piccola, inferiore al cosiddetto *raggio di Einstein*. In questo caso oltre alla variazione della posizione, si osserva una variazione della luminosità apparente. Questo effetto è tanto maggiore tanto più lente e sorgente luminosa sono allineate sulla linea di vista.

Con il *microlensing*, grazie a un *blip* (picco luminoso secondario) nella curva di brillantezza, è possibile anche decretare la massa dell'esopianeta in questione (vedi figura 2.4). Questo blip si genera quando l'esopianeta si allinea con il sistema stella-osservatore: la massa dell'esopianeta unita a quella della stella, genera una lente più potente e così si amplifica la luminosità della sorgente posta in lontananza ricevuta dall'osservatore. Questa tecnica di ricerca, però, ha due principali limiti: il fenomeno ha una durata breve e la probabilità di perfetto allineamento tra le due stelle è bassa.

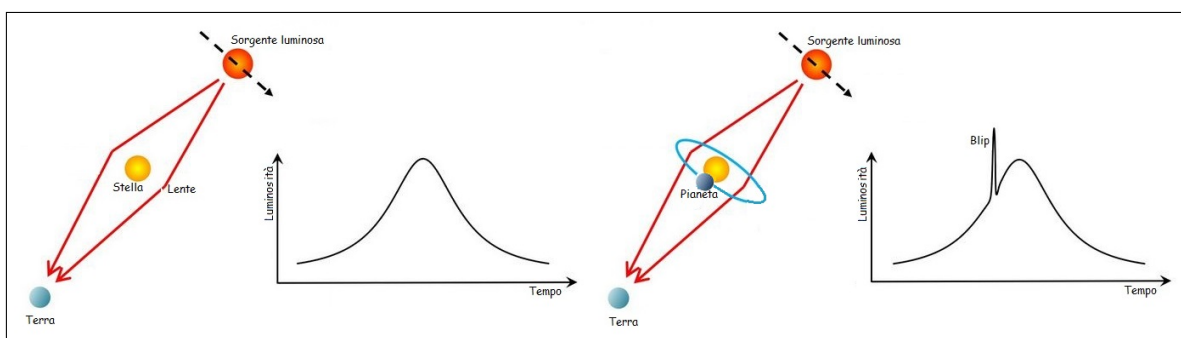


Figura 2.4: *Microlensing gravitazionale: la curva di luminosità a destra presenta un blip, dovuto alla presenza dell'esopianeta orbitante attorno alla stella.* [Fonte: www.media.inaf.it e riadattata]

Sono in corso molti programmi che prevedono la ricerca di esopianeti tramite l'applicazione di questo metodo. Tra i più importanti si ricordano MOA e OGLE che hanno portato alla scoperta di decine di eventi. Quest'ultimo programma ha rilevato nel 2004 il primo esopianeta scoperto grazie al microlensing e, attualmente, si conoscono circa 90 esopianeti grazie a questo metodo.

2.5 Direct imaging

Tra quelli finora analizzati, il *direct imaging* è l'unico metodo diretto per la rilevazione di esopianeti. Questa tecnica si basa sull'acquisizione con un telescopio di un'immagine dell'esopianeta, prova inequivocabile della sua esistenza. Un limite di questo metodo, sviluppato molto di recente, è che la luce riflessa da ogni esopianeta viene sovrastata dalla luce della stella attorno alla quale orbita ed ecco perché è molto più semplice rilevare esopianeti massicci con forti emissioni nell'infrarosso. Questo problema è spesso eliminato grazie all'uso di un *coronografo*. Nel 2008, infatti, il telescopio Hubble, grazie all'uso di questo strumento che impedisce l'ingresso di una porzione di luce nel telescopio, è riuscito a individuare un disco di accrescimento di polveri attorno alla stella *Fomalhaut (Piscis Austrini)*. Dopo il 2012 è stata confermata la presenza di un esopianeta denominato *Fomalhaut b* orbitante attorno alla stella appena citata.

Bibliografia e sitografia

1. Cimatti A., *Appunti del corso di Astronomia*, Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2019.
2. Maestri T., *Dispense: PHYSICS OF PLANETARY ATMOSPHERES*, Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2021.
3. Galletti S., *Appunti del tirocinio svolto presso l'Osservatorio Astronomico di Loiano*, Bologna, Osservatorio Astronomico di Loiano, 2021.
4. Karttunen H., Kroger P., Oja H., Poutanen M., Donner K. J., *Fundamental Astronomy*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
5. Ferreri W., Ferrara A., *VIAGGIO NELL'UNIVERSO - Scoperte e segreti dell'universo*, Milano, RSC MediaGroup S.p.A., 2019
6. <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/our-solar-system/overview/>