

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 di pianeti esterni**

Tesi di laurea

Presentata da:
Carlotta Rinaldi

Relatore:
**Chiar.ma Prof.ssa
Marcella Brusa**

Appello I
Anno Accademico 2025-2026

Abstract

Questa tesi ha come obiettivo una trattazione generale del nostro Sistema Solare, concentrandosi sulle caratteristiche dei suoi pianeti. Nel primo capitolo, dopo una breve introduzione su cosa sia il Sistema Solare, si discutono la sua dinamica e le principali teorie di formazione, fino ad arrivare alla struttura attuale. Il secondo si concentra sulle proprietà generali dei pianeti, analizzando le differenze tra corpi terrestri e giganti, e toccando aspetti come l'atmosfera, il campo magnetico e la presenza di lune e sistemi di anelli. Il terzo ed ultimo capitolo è dedicato alla ricerca di pianeti extrasolari. Risulta dunque fondamentale soffermarsi sulle tecniche di rilevazione di esopianeti più utilizzate o comunque più conosciute, con un accenno finale ad una scoperta recente e significativa nell'ambito della ricerca. L'elaborato si conclude con un approfondimento alla derivazione matematica e fisica delle leggi di Keplero.

Indice

1	Il Sistema Solare	1
1.1	Definizione	1
1.2	Le leggi del moto planetario	1
1.2.1	Il significato fisico delle leggi di Keplero	3
1.3	Origine del Sistema Solare	3
1.4	Struttura e pianeti	4
2	Proprietà generali dei pianeti	5
2.1	Dimensioni, massa, densità media, distanza	5
2.2	Campo magnetico	6
2.3	Atmosfera	8
2.4	Lune e sistemi di anelli	9
2.4.1	Terra	9
2.4.2	Giove	10
2.4.3	Saturno	10
3	Ricerca di pianeti esterni	11
3.1	Velocità radiale	11
3.2	Transiti	12
3.3	Microlensing gravitazionale	13
3.4	Astrometria	14
3.5	Variazioni dei tempi orbitali	14
3.6	Imaging diretto	14
3.6.1	Wispi2	15
A	Dimostrazione delle Leggi di Keplero	16
A.1	Seconda Legge	16
A.2	Prima Legge	16
A.3	Terza Legge	17
	Bibliografia	18

1. Il Sistema Solare

1.1 Definizione

Il Sistema Solare è un insieme di corpi celesti in rotazione attorno al Sole. Ne fanno parte, oltre al Sole stesso, 8 pianeti, centinaia di lune, milioni di asteroidi, ed un numero imprecisato di comete. Partendo dal Sole, troviamo per primi i pianeti interni: Mercurio, Venere, la Terra e Marte ed infine i pianeti esterni: Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Tra l'orbita di Marte e quella di Giove c'è la fascia degli asteroidi. Il Sole possiede circa il 99,86% della massa totale del sistema e una luminosità 400 milioni di volte superiore a quella di Giove, il secondo oggetto più luminoso. Sotto questo punto di vista, i pianeti appaiono come semplici "detriti" insignificanti. Dall'altro lato, però, i pianeti giocano un ruolo fondamentale per quanto riguarda il momento angolare (cioè la rotazione complessiva del sistema): oltre il 98% di esso è contenuto nei moti orbitali dei pianeti, non nel Sole.



Figura 1.1: Earthrise: fotografia AS8-14-2383HR della NASA fatta da William Anders il 24 dicembre 1968 durante la missione Apollo 8.

1.2 Le leggi del moto planetario

Già nel III secolo a.C. Aristarco aveva proposto un modello eliocentrico, ma fu oscurato dal geocentrismo tolemaico, che rimase predominante per secoli, anche a causa della mancata osservazione del moto apparente delle stelle che ci si sarebbe aspettato da una Terra in movimento. Solo con Copernico la teoria eliocentrica riprese vigore, sfidando il dogmatismo medievale. Le accurate osservazioni di Tycho Brahe e le leggi di Keplero le fornirono una solida base quantitativa. Keplero formulò tre leggi empiriche basandosi sulle osservazioni di Tycho Brahe:

Prima legge di Keplero: orbite ellittiche

Tutti i pianeti si muovono su orbite ellittiche, di cui il Sole occupa uno dei due fuochi. L'equazione dell'ellisse in coordinate cartesiane è:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (1.1)$$

dove a e b sono i semiassi maggiore e minore. L'eccentricità e dà una misura dello schiacciamento dell'orbita ellittica: e varia da 0 a 1, il caso dell'orbita circolare ($a = b$) corrisponde a $e = 0$, $0 < e < 1$ un'ellisse schiacciata e $e = 1$ una parabola.

Seconda legge di Keplero: velocità areale costante

Il segmento che collega un pianeta al Sole descrive aree uguali in tempi uguali:

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \text{costante} \quad (1.2)$$

Facendo riferimento alla figura 1.2, l'area descritta dal pianeta spostandosi da 1 a 2 è identica a quella descritta quando si sposta da 3 a 4. Il tempo per percorrere i due archi è identico, di conseguenza la velocità orbitale del pianeta è più elevata lungo l'arco 3-4 che lungo l'arco 1-2. In pratica la velocità orbitale varia continuamente ed è massima quando il pianeta è alla minima distanza dal Sole (perielio), mentre è minima quando il pianeta è alla massima distanza dal Sole (afelio).

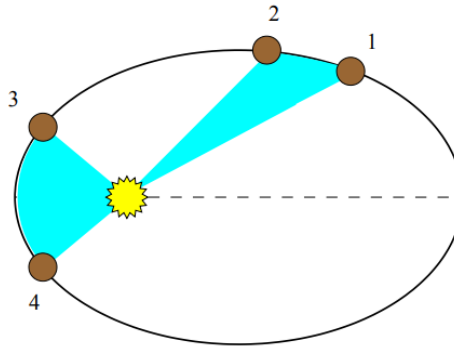


Figura 1.2

Terza legge di Keplero: periodi e distanze

Il quadrato del periodo di qualunque pianeta è proporzionale al cubo della sua distanza media dal Sole.

$$\frac{r^3}{P^2} = \text{costante} \quad (1.3)$$

Tuttavia, Keplero non conosceva la causa fisica di queste leggi. Fu Isaac Newton a fornirne una spiegazione, unificando la dinamica terrestre e celeste con la legge di gravitazione universale che descrive la forza gravitazionale tra due corpi:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (1.4)$$

Combinando questa con la seconda legge della dinamica ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$), Newton dimostrò che le orbite dei pianeti sono necessariamente sezioni coniche (ellissi, parabole o iperboli) e che la forza di gravità è la causa delle leggi di Keplero. In particolare, dalla legge di gravitazione si ricava che la forma dell'orbita è un'ellisse (prima legge),

che il momento angolare si conserva (seconda legge) e che il periodo orbitale soddisfa la relazione:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3 \quad (1.5)$$

dove a è il semiasse maggiore dell'orbita e m_1, m_2 le masse dei due corpi. Nel Sistema Solare, essendo la massa del Sole molto maggiore di quella dei pianeti ($m_1 + m_2 \approx M_\odot$), la relazione si riduce alla terza legge di Keplero nella sua forma classica 1.3. Nel caso di sistemi binari di stelle, dove le masse sono confrontabili, è invece necessario utilizzare la formulazione completa.

1.2.1 Il significato fisico delle leggi di Keplero

Le leggi di Keplero, se interpretate alla luce della dinamica newtoniana, rivelano aspetti fondamentali della forza gravitazionale:

- La **prima legge** indica che la forza che agisce sul pianeta è centrale, cioè diretta lungo la congiungente Sole-pianeta. Questa condizione è necessaria affinché l'orbita sia una sezione conica.
- La **seconda legge** è una diretta conseguenza della conservazione del momento angolare: la forza agisce sempre lungo la congiungente Sole-pianeta, quindi non esercita alcun momento torcente.
- La **terza legge**: la forza centripeta $F \propto r/P^2$, combinata con la terza legge $P^2 \propto r^3$ dà $F \propto 1/r^2$, cioè la forza gravitazionale varia con l'inverso del quadrato della distanza.

1.3 Origine del Sistema Solare

Un modo per affrontare la questione è cercare regolarità tra i pianeti. Tutti giacciono approssimativamente sullo stesso piano e ruotano nella stessa direzione antioraria attorno al Sole, il quale ruota anch'esso nella stessa direzione. Gli astronomi interpretano ciò come prova che il Sole e i pianeti si siano formati insieme da una nuvola rotante di gas e polvere, la nebulosa solare. La composizione dei pianeti fornisce un altro indizio: il Sole ha la stessa composizione dominata dall'idrogeno di Giove e Saturno, mentre i pianeti terrestri e la Luna sono ricchi di elementi pesanti come ferro e silicio. Questo suggerisce che i materiali leggeri siano sfuggiti dalla parte interna del disco, dove le temperature erano più elevate a causa del maggiore attrito tra le particelle. La parte interna era quindi troppo calda perché l'acqua potesse solidificare sotto forma di ghiaccio, il che spiega perché i pianeti interni sono rocciosi e quelli esterni ghiacciati. Un ulteriore processo che ha modificato l'assetto del Sistema Solare primordiale è la migrazione planetaria, causata dall'interazione gravitazionale tra i pianeti giganti e il disco di gas residuo. Questo fenomeno spiega la posizione attuale di Giove, Saturno, Urano e Nettuno, e ha probabilmente contribuito al cosiddetto 'bombardamento tardivo' che ha segnato la superficie dei pianeti interni. Un secondo approccio consiste nell'osservare altri sistemi planetari in formazione, dove sono ancora visibili dischi protoplanetari che assomigliano agli stadi iniziali del nostro Sistema Solare.

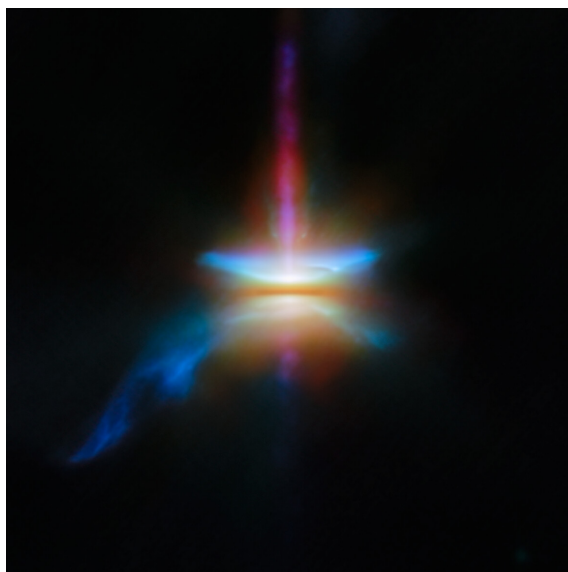


Figura 1.3: Il disco protoplanetario di HH 30 fotografato dal telescopio spaziale James Webb. Crediti: Esa/Webb, Nasa & Csa, Tazaki et al.

Le simulazioni mostrano che il materiale si aggrega formando planetesimi, oggetti con dimensioni comprese tra frazioni di millimetro e centinaia di chilometri, che sotto l'effetto della gravità si uniscono per formare i pianeti. Questo processo, noto come accrezione, è caratterizzato da impatti violenti e dal calore generato dal decadimento degli elementi radioattivi, che portarono i pianeti a fondersi e a differenziarsi, spiegando così le loro attuali strutture interne. Le collisioni gigantesche possono anche giustificare alcune eccezioni alle regole del Sistema Solare: Urano e Plutone ruotano “su un fianco”, Venere presenta una rotazione retrograda e la Luna, pur mostrando una composizione simile a quella terrestre, presenta differenze sostanziali che suggeriscono un'origine da un impatto gigante. Oggi, circa 4,5 miliardi di anni dopo la sua origine, il Sistema Solare è un luogo molto meno violento.

1.4 Struttura e pianeti

Come già visto in precedenza, gli 8 pianeti si dividono in interni(terrestri) ed esterni(giganti). Questi due gruppi sono delimitati dalla linea del gelo che si trovava tra 2.7 e 4 AU dal Sole nel momento di formazione dei pianeti. Questa segna il confine nel disco protoplanetario primordiale oltre il quale le temperature scendono abbastanza da permettere ai composti volatili, come l'acqua, di condensarsi in ghiaccio. L'ordine in cui si sono disposti i pianeti quindi non è casuale ma dato dal fatto che vicino al Sole, solo i materiali rocciosi riuscirono a resistere al calore del Sistema Solare primordiale. Dunque i primi quattro sono detti terrestri. Hanno dimensioni inferiori con superfici solide e rocciose. Mentre materiali come ghiaccio, liquidi e gas si insediarono nelle regioni più esterne del giovane Sistema Solare. La gravità unì questi materiali insieme, andando a formare i giganti gassosi Giove e Saturno, e i giganti ghiacciati Urano e Nettuno. Tra l'orbita di Marte e quella di Giove c'è la fascia degli asteroidi. Plutone sembra per molti versi un pianeta anomalo, che non fa parte di nessuno dei due sottosistemi, declassato a “pianeta nano” nel 2006.

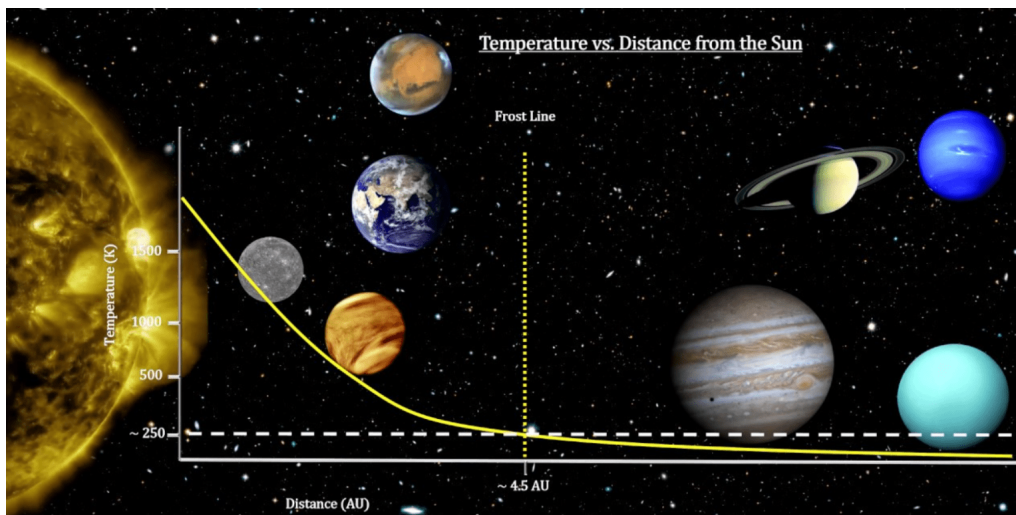


Figura 1.4: Grafico (non in scala) che evidenzia la frost line, che separa il Sistema Solare interno e quello esterno.

2. Proprietà generali dei pianeti

La distinzione tra i pianeti si basa principalmente sulle loro caratteristiche fisiche misurabili nonché per l'eventuale presenza e numero di satelliti e anelli. Alcune di questa verranno affrontate più nel dettaglio nelle prossime sezioni.

2.1 Dimensioni, massa, densità media, distanza

I pianeti rocciosi hanno dimensioni relativamente modeste (meno di 15.000 km di diametro) e densità abbastanza alte (da 3 a 5, dove 1 è la densità dell'acqua). Essi sono composti da un nucleo ferroso circondato da un mantello basaltico. I pianeti giganti, invece, devono il loro nome alle notevoli dimensioni (con diametri maggiori di 50.000 km). Essi hanno densità prossime ad 1 e si dividono a loro volta in pianeti gassosi (Giove e Saturno) e pianeti di ghiaccio (Urano e Nettuno). I pianeti gassosi sono composti da un nucleo roccioso circondato da un mantello liquido, a sua volta ricoperto da uno spesso strato di gas. I pianeti di ghiaccio sono composti invece da un nucleo di roccia, ricoperto da uno strato di ghiaccio, il tutto circondato da un'atmosfera. Queste quantità si possono misurare sfruttando determinate relazioni, per esempio la dimensione angolare apparente di un oggetto è legato alla distanza e all'angolo che esso sottende rispetto all'osservatore (l'angolo tra due linee immaginarie tracciate dall'occhio dell'osservatore al margine dell'oggetto):

$$d = 2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.1)$$

dove d è il diametro reale dell'oggetto, D la distanza dall'osservatore e θ l'angolo sotteso (in radianti). Per angoli molto piccoli, come nel caso dei pianeti, si può usare l'approssimazione $d \approx D \cdot \theta$. Risulta dunque abbastanza semplice calcolare le dimensioni reali di un pianeta conoscendone distanza e dimensioni apparenti. Esistono anche altri metodi per calcolare le dimensioni, come il metodo dell'occultazione. A volte un pianeta, un satellite o un asteroide passano davanti a una stella

e la oscurano per breve tempo; calcolando i tempi del fenomeno si ricava il diametro del corpo osservato. Per quanto riguarda la massa di un pianeta, la legge di gravitazione universale di Newton, come mostrato nell'equazione 1.4 offre la chiave per misurarla. Uguagliando la forza gravitazionale alla forza centripeta necessaria per mantenere il satellite in orbita si ricava la massa del pianeta:

$$G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r} \implies M = \frac{v^2 \cdot r}{G} \quad (2.2)$$

La velocità orbitale v di un satellite dipende quindi dalla forza di attrazione esercitata dal pianeta madre, e questa dipende dalla sua massa: se la distanza tra i due corpi celesti è nota, la velocità di una luna rivela la massa del suo pianeta. Per determinare la distanza di un pianeta dal Sole, si possono usare metodi diversi. La terza legge di Keplero, già vista nell'equazione 1.3, stabilisce una relazione tra il periodo orbitale di un pianeta e la sua distanza media dal Sole. In Unità Astronomiche (UA) e anni terrestri, la formula si semplifica in:

$$T^2 = a^3 \quad (2.3)$$

Tuttavia, per convertire queste distanze relative in chilometri, è necessario conoscere il valore dell'Unità Astronomica. Un metodo per ottenere questa misura in termini assoluti è la parallasse. Nel 1672 Cassini misurò la distanza di Marte dalla Terra sfruttando lo slittamento della sua posizione contro lo sfondo stellare, osservato da due punti diversi sulla Terra. La parallasse si esprime con la relazione:

$$D = \frac{B}{\theta} \quad (2.4)$$

dove D è la distanza dell'oggetto(km), B la base (distanza tra i due punti di osservazione) e θ l'angolo di parallasse (radianti). Conoscendo la distanza Terra-Marte in chilometri, Cassini utilizzò le proporzioni fornite dalla terza legge di Keplero per risalire al valore dell'Unità Astronomica: poiché Marte si trova a 1,52 UA dal Sole e la Terra a 1 UA, la distanza Terra-Marte corrisponde a 0,52 UA: uguagliando questo valore alla distanza misurata in chilometri, Cassini ottenne per la prima volta una stima della distanza Terra-Sole. Conoscere il valore di 1 UA permise poi di determinare le distanze degli altri pianeti dal Sole. Altri metodi per ricavare le distanze sono i transiti di Venere, che sfruttano lo stesso principio dell'occultazione, trovandosi occasionalmente tra Sole e Terra, oppure tramite il calcolo del tempo impiegato dall'eco di un impulso a microonde per tornare sulla Terra.

2.2 Campo magnetico

Il campo magnetico svolge un ruolo fondamentale nella dinamica dell'Universo. In sua assenza, le uniche forze in gioco sarebbero quelle nucleari e gravitazionali, causando un lento raffreddamento di stelle e galassie, interrotto solo da rari eventi esplosivi. La presenza di campi magnetici, invece, genera fenomeni energetici come le aurore terrestri, i brillamenti stellari e l'emissione di raggi X, contribuendo in modo significativo alla complessità e all'evoluzione dell'ambiente cosmico. I campi magnetici planetari sono campi di dipolo. Ogni pianeta che lo possiede è caratterizzato da un polo nord e un polo sud magnetici attraversati da un asse, detto asse

magnetico, che non coincide con quello di rotazione. Nella maggior parte dei casi l'inclinazione del primo rispetto al secondo è di pochi gradi (es. 11.5° per la Terra, 10.8° per Giove, 1° per Saturno) mentre per Urano e Nettuno assume un valore abbastanza elevato rispettivamente di 58.6° e di 47° . Il campo magnetico di un pianeta è la somma di due componenti distinte: un campo magnetico intrinseco, generato da processi fisici interni al pianeta stesso ed uno estrinseco, derivante dall'interazione fra le particelle che costituiscono il vento solare e gli strati più alti dell'atmosfera. Allontanandosi dalla superficie di un pianeta si può notare che il campo magnetico assume una forma molto particolare: l'interazione con il vento solare dà origine alla magnetosfera, una regione molto ampia che circonda il pianeta e che ha la peculiarità di essere schiacciata dalla parte rivolta verso il Sole e di formare invece una lunga coda dalla parte opposta. Generalmente il vento solare non riesce ad entrare all'interno della magnetosfera ma può solo scivolare lungo la sua superficie limite, che prende il nome di magnetopausa. Tuttavia può accadere che alcune particelle energetiche provenienti dalla nostra stella riescano a penetrare la magnetosfera per rimanere poi intrappolate all'interno di fasce di radiazione note come fasce di Van Allen. L'interazione di queste particelle con l'atmosfera porta alla formazione delle aurore. Quasi tutti i pianeti del Sistema Solare possiedono un campo magnetico intrinseco, nella tabella 2.1 ne vengono riassunte le intensità per i vari pianeti, dove il minimo è il valore all'equatore e il massimo ai poli.

Pianeta	Campo magnetico (μT)
Mercurio	$\sim 0,3$
Venere	~ 0
Terra	25–65
Marte	~ 0
Giove	400–1.400
Saturno	20–50
Urano	0,2–0,5
Nettuno	0,1–0,5

Tabella 2.1: Intensità del campo magnetico dei pianeti del Sistema Solare.

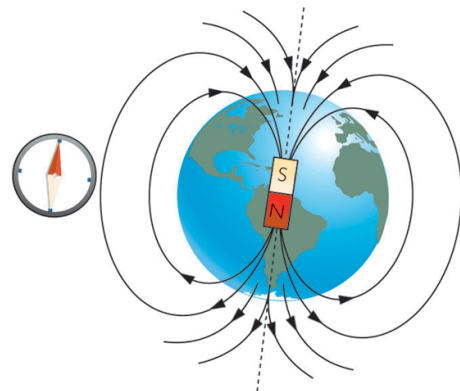


Figura 2.1: Linee di campo magnetico terrestri

Marte e Venere non possiedono un campo magnetico globale generato internamente. Venere presenta solo una debole magnetosfera indotta dal vento solare, mentre Marte conserva una magnetizzazione residua nella crosta meridionale, testimonianza di un antico campo magnetico ormai spento. Per la Terra il campo magnetico assume un valore in intensità oscillante tra $25 \mu\text{T}$ vicino all'equatore e $60 \mu\text{T}$ ai poli. Quello che viene chiamato polo nord magnetico, che si trova nelle regioni settentrionali del Canada, coincide in realtà con il polo sud del dipolo Terra, in quanto qui le linee di forza del campo sono entranti. Di conseguenza il polo sud magnetico coincide con quello nord del dipolo e si trova in Antartide. Si può notare che il campo magnetico più intenso nel Sistema Solare lo possiede Giove, grazie alla rapida rotazione, Saturno ne ha uno abbastanza simile a quello terrestre. Mercurio ne possiede uno stranamente elevato per le sue dimensioni e caratteristiche cinematiche, dato dalla presenza di una zona superiore del nucleo stratificata e stabile. I campi magnetici

planetari hanno origine da un processo chiamato dinamo, che richiede tre ingredienti fondamentali: un nucleo metallico liquido (conduttore elettrico), il suo movimento (convezione) e una rotazione sufficientemente rapida del pianeta (effetto Coriolis). Questi elementi generano correnti elettriche che, a loro volta, producono e mantengono il campo magnetico. Questo spiega le intensità dei campi che sono state rilevate, dove questi ingredienti mancano o sono atipici, il campo è assente (Venere, Marte), anomalo (Urano, Nettuno), la Terra è il caso ideale di dinamo attiva.

2.3 Atmosfera

Tutti i pianeti tranne Mercurio hanno atmosfere di rilievo. Le atmosfere di tipo gioviano consistono nella copertura gassosa originaria acquisita al tempo della loro formazione, mentre quelle di tipo terrestre si sono prodotte dal degassamento, cioè la liberazione di gas dall'interno, per causa ad esempio di attività vulcanica. I pianeti Terrestri non hanno, data la loro piccola massa, la possibilità di trattenere gli elementi più leggeri. Predomineranno quindi gli elementi pesanti nei loro composti più semplici: N_2 (azoto molecolare) e CO_2 (anidride carbonica). Le loro atmosfere, basate su carbonio, azoto ed ossigeno, sono atmosfere secondarie che si sono prodotte in seguito all'azione chimica (evoluzione geologica) e biologica (vita organica sulla Terra). La presenza di H_2O e gas serra come CO_2 , in particolare, gioca un ruolo cruciale nel determinare la temperatura superficiale, come mostrato dall'effetto serra incontrollato di Venere o dall'equilibrio della Terra. I pianeti gioviani, essendo più massicci, hanno trattenuto la maggior parte del loro idrogeno ed elio, che i terrestri invece hanno perso per fotodissociazione, processo in cui la radiazione ultravioletta proveniente dal Sole dissocia le molecole degli strati superiori di un'atmosfera negli atomi che la compongono. In generale, la capacità di un pianeta di trattenere un'atmosfera dipende dal rapporto tra la velocità di fuga: $v_f = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$ (velocità minima che un oggetto deve raggiungere per sottrarsi all'attrazione gravitazionale di un corpo celeste) e l'agitazione termica delle molecole: i pianeti meno massicci e più caldi tendono a perdere più facilmente gli elementi leggeri come l'idrogeno.

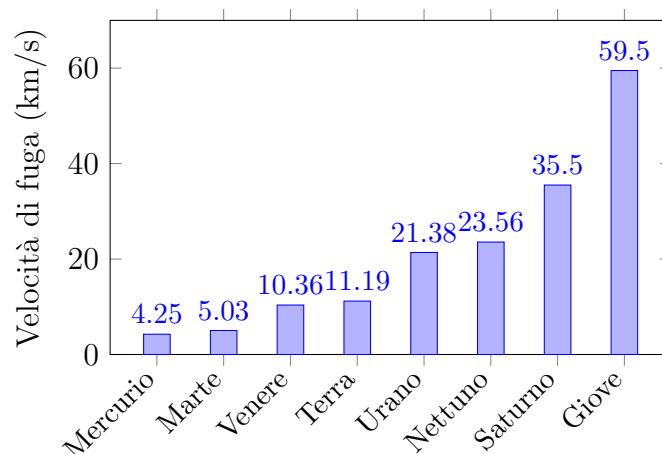


Figura 2.2: Velocità di fuga dei pianeti del Sistema Solare in ordine crescente di massa. I pianeti terrestri hanno velocità di fuga inferiori a 12 km/s, mentre i giganti mostrano valori significativamente più elevati. Dati: NASA/JPL.

Anche la massa di un'atmosfera è importante, più è pesante, maggiore è la pressione esercitata sul suolo, questo, insieme alla temperatura, determina se una sostanza esisterà nello stato liquido, solido o gassoso. Inoltre la massa dell'atmosfera influisce su come essa risponde all'energia solare. Ad esempio su Venere, che ha un'atmosfera molto più pesante della Terra, le variazioni giornaliere di temperatura sono più ridotte, mentre su Marte dove è più leggera, le variazioni sono più ampie.

Tabella 2.2: Composizione atmosferica dei pianeti del Sistema Solare (% in volume).Fonte: NASA Planetary Fact Sheet

Pianeti terrestri					Giganti			
Pianeta	N ₂	O ₂	CO ₂	Altri	Pianeta	H ₂	He	CH ₄
Mercurio	—	—	—	tracciati	Giove	89.8	10.2	—
Venere	3.5	—	96.5	SO ₂ , Ar	Saturno	96.3	3.25	0.2
Terra	78.08	20.95	0.04	Ar, H ₂ O	Urano	82.5	15.2	2.3
Marte	2.7	0.13	95.3	Ar, CO	Nettuno	80.0	19.0	1.5

2.4 Lune e sistemi di anelli

Tutti i pianeti, eccetto Venere e Mercurio, possiedono satelliti naturali (lune), cioè corpi celesti di dimensioni variabili che li orbitano. I satelliti variano nella loro composizione, rocciosa o ghiacciata, e nella superficie, da craterizzata a liscia. I satelliti interagiscono con i pianeti in vari modi, tra i quali la formazione di maree. La maggior parte dei satelliti ha probabilmente avuto origine nella stessa regione del disco protoplanetario nel quale ha avuto luogo la formazione del suo corpo madre. Tuttavia ci sono eccezioni, ad esempio nel Sistema Solare esterno molti consistono in asteroidi catturati dalla gravità oppure frammenti di un impatto. Tre dei quattro pianeti giganti possiedono sistemi di anelli, cioè materiale roccioso orbitante l'equatore. Il sistema di Saturno si distingue particolarmente, visibile anche con telescopi terrestri. Giove e Urano hanno anelli sottili e fievoli, di dimensioni più modeste, rilevabili dalla Terra alle lunghezze d'onda dell'infrarosso.

2.4.1 Terra

La Luna terrestre è la più esplorata. Si originò circa 4,5 miliardi di anni fa, dall'impatto di un protopianeta Theia), delle dimensioni di Marte, con la Prototerra. É un corpo roccioso, coperto di crateri sulla superficie, causati dal bombardamento meteorico e dal vulcanesimo. Sulla Terra la Luna genera maree oceaniche che si alzano e si abbassano due volte al giorno. Le molecole d'acqua sull'emisfero rivolto alla Luna, quindi più vicine a essa, subiscono un'attrazione gravitazionale leggermente più forte, spostandosi verso il satellite, formando un rigonfiamento nell'oceano. Al lato opposto, l'attrazione è più debole rispetto al resto del pianeta, quindi restano "indietro", formando un secondo rigonfiamento. La superficie dell'oceano assume così una forma elissoidale. L'attrazione del Sole invece è più modesta, tuttavia quando si trova allineato con la Luna si hanno le maree più alte. Come la Terra risente dell'attrazione gravitazionale della Luna, avviene anche l'opposto. In passato l'effetto della gravitazione terrestre sui rigonfiamenti da marea provocati dalla Luna ha

causato un rallentamento della rotazione assiale di essa, fino a raggiungere lo stato attuale in cui periodo di rotazione e rivoluzione attorno alla Terra coincidono.

2.4.2 Giove

Giove possiede 115 satelliti, di cui 4 detti "galileiani", in ordine di distanza si ha: Io, Europa, Ganimede e Callisto con dimensioni analoghe o superiori alla Luna terrestre. I restanti hanno dimensioni inferiori ai 200 km. Europa è una delle lune ghiacciate principali di Giove e uno dei luoghi più promettenti nel Sistema Solare per la ricerca di vita extraterrestre. Sotto la sua crosta ghiacciata, le forze mareali del pianeta gigante generano calore sufficiente a mantenere un enorme oceano globale di acqua liquida. Il sistema di anelli di Giove invece, scoperto da Voyager 1, è modesto in confronto ad altri sistemi. Verso il bordo esterno, a circa 6000 km dalla superficie del pianeta, si riscontra una zona ristretta più luminosa, mentre uno strato più tenue di particelle sembra estendersi fino all'atmosfera. Le particelle hanno diametro di pochi micrometri, provenienti probabilmente da un rifornimento costante di materiale eroso di satelliti più interni.

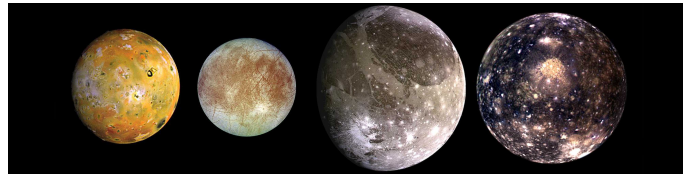


Figura 2.3: Da sinistra a destra: Io, Europa, Ganimede e Callisto. Crediti: NASA/JPL/DLR

2.4.3 Saturno

Saturno possiede 292 satelliti naturali. Mentre Giove possiede quattro grandi lune interne, Saturno è dominato da un'unica luna gigante, Titano, situata però su un'orbita relativamente distante. Una possibile spiegazione delle differenze riguardanti le grandi lune di Giove e Saturno è la seguente: grazie a un campo magnetico primordiale di circa 100 gauss, Giove sarebbe riuscito a scavare una cavità magnetosferica nel proprio disco circumplanetario, bloccando la migrazione interna delle lune e favorendone la sopravvivenza. Saturno, al contrario, con un campo magnetico molto più debole, pari a circa 1 gauss (probabilmente legato a uno strato di idrogeno metallico meno esteso) non avrebbe mai sviluppato una simile cavità. Tutti i grandi protosatelliti saturniani sarebbero progressivamente precipitati sul pianeta, eccetto uno: Titano, sopravvissuto perché formatosi su orbite più ampie, al riparo dalla caduta verso il pianeta. Le lune si dividono in due categorie principali: quelle interne(regolari) e quelle esterne(irregolari, spesso catturate dal campo gravitazionale del pianeta). Titano è la seconda luna più grande del Sistema Solare, con una ricca atmosfera di azoto e un paesaggio con laghi di idrocarburi e reti fluviali secche. Degna di nota è anche Encelado che si distingue per l'emissione di getti di gas e polvere, potrebbe inoltre contenere acqua liquida nel sottosuolo della regione del suo polo sud. Gli anelli di Saturno sono costituiti principalmente da un gran numero di particelle solide di roccia e ghiaccio.

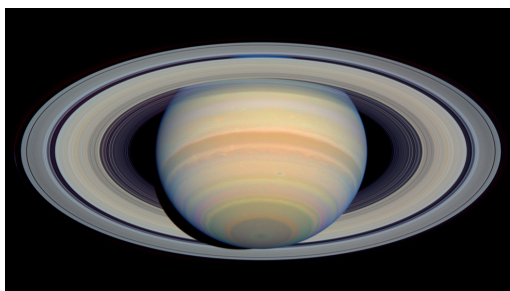


Figura 2.4: Immagine scattata con HST. Credit: NASA, ESA and E. Karkoschka (University of Arizona)

Queste particelle derivano probabilmente dalla disgregazione di piccoli satelliti di Saturno, a causa di impatti meteoritici o da resti del materiale da cui si formò il pianeta.

3. Ricerca di pianeti esterni

I pianeti extrasolari (o esopianeti) sono corpi celesti orbitanti attorno a stelle diverse dal nostro Sole. Come i pianeti del nostro Sistema Solare, gli esopianeti si sono formati all'interno di dischi di gas e polvere circumstellari quando le stelle genitrici avevano "solo" qualche milione di anni. Non è facile identificare i pianeti extrasolari: quando sono neonati, la complessa struttura del materiale del disco in cui si formano li nasconde alle osservazioni dirette; in età più avanzata (quando il disco non c'è più) la presenza della stella centrale, da milioni a miliardi di volte più luminosa di un pianeta, rende difficile rivelare l'esistenza di un esopianeta in modo diretto (cioè attraverso un'immagine). 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. La rivelazione e caratterizzazione fisica degli esopianeti è di fondamentale importanza per capire come il nostro Sistema Solare si pone nel contesto dei complessi processi di formazione ed evoluzione planetaria, e per individuare condizioni necessarie e sufficienti allo sviluppo della biologia complessa, cioè la vita. Attualmente le tecniche più conosciute per individuare esopianeti sono sei e verranno esposte nelle prossime sezioni.

3.1 Velocità radiale

Questa tecnica misura il moto di una stella mentre orbita attorno al centro di massa comune con il pianeta tramite l'aumento (blueshift) o diminuzione (redshift) della frequenza della luce emessa dalla stella, dovuti rispettivamente a un avvicinamento o allontanamento rispetto all'osservatore. Questa anomalia spettrale (quantificata da $\Delta\lambda$) è rilevabile solo per quei pianeti le cui orbite sono allineate alla linea di vista. In questo modo è difficile determinare l'orbita esatta di un esopianeta, così il metodo della velocità radiale permette ai ricercatori di dedurre solo il suo periodo orbitale, la deviazione dell'orbita da quella circolare e la sua massa minima. Questo metodo è molto sensibile ai pianeti massicci con brevi periodi orbitali, perché un pianeta più grande e vicino esercita un'attrazione gravitazionale maggiore e più frequente sulla stella, producendo oscillazioni più ampie e quindi più facili da rilevare. Lo

spostamento $\Delta\lambda$ di una riga spettrale a lunghezza d'onda λ è legato alla velocità radiale v_r dalla formula Doppler:

$$v_r = \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) c \quad (3.1)$$

dove c è la velocità della luce. Ripetendo questa misura si ottiene l'andamento di v_r nel tempo. Si ottiene così (in presenza di un pianeta) una curva che oscilla periodicamente; dalla sua ampiezza massima, chiamata K , si ricava $M_p \sin i$:

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{M_*^{2/3}} \implies M_p \sin i = K \left(\frac{P}{2\pi G} \right)^{1/3} M_*^{2/3} \quad (3.2)$$

Questa relazione mostra che l'ampiezza del segnale dipende dalla massa del pianeta e dal suo periodo orbitale. La quantità $M_p \sin i$ rappresenta un limite inferiore alla massa reale, poiché l'inclinazione orbitale i non è nota con il solo metodo delle velocità radiali.

3.2 Transiti

Quando un pianeta transita davanti alla faccia della sua stella, la luce di questa diminuisce di una quantità piccola ma misurabile. La probabilità che un transito planetario sia visibile dalla Terra è bassa, proporzionale al rapporto tra il raggio della stella e quello dell'orbita del pianeta.

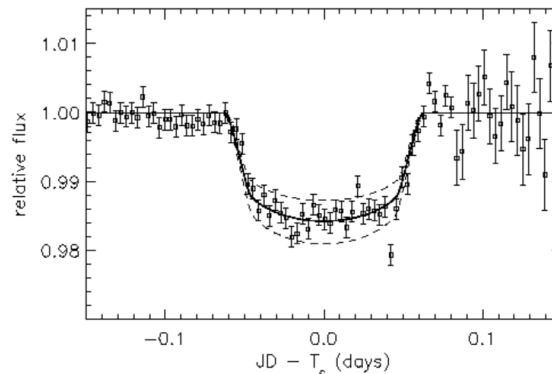


Figura 3.1: La prima curva di luce di un esopianeta in transito (HD 209458b), ottenuta dal progetto STARE nel settembre 1999.

I transiti dei pianeti più grandi con un piccolo periodo orbitale intorno a piccole stelle sono più facili da rilevare e per farlo bisogna osservare molte stelle. I transiti permettono ai ricercatori di dedurre il raggio di un pianeta (dalla profondità) e il suo periodo orbitale (misurando l'intervallo temporale tra due minimi di flusso consecutivi). Eventualmente è possibile studiare composizione e temperatura dell'atmosfera del pianeta studiando la luce che la attraversa o ne viene riflessa. La profondità del transito, ovvero la variazione frazionaria del flusso luminoso $\Delta L/L$, è direttamente proporzionale al quadrato del rapporto tra il raggio del pianeta R_p e quello della stella R_* :

$$\frac{\Delta L_*}{L_*} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \quad (3.3)$$

La durata del transito t può essere usata per determinare il semi-asse maggiore a dell'orbita (assumendo un'orbita con parametro di impatto $b = 0$):

$$t = 2\sqrt{\frac{a^3}{GM_*}} \arcsin\left(\frac{R_* + R_p}{a}\right) \quad (3.4)$$

Per casi più generali, la durata del transito dipende anche dal parametro di impatto:

$$t \approx \frac{P R_*}{\pi a} \sqrt{1 - b^2} \quad (3.5)$$

dove b è definito come $b = (a/R_*) \cos i$. Questa tecnica è responsabile di circa l'80% delle oltre 6.000 conferme attuali.

3.3 Microlensing gravitazionale

Questo effetto avviene quando i campi gravitazionali di un pianeta e della sua stella cooperano per focalizzare la luce di una stella lontana. Per realizzarsi occorre che il pianeta e il suo Sole e la stella lontana si trovino esattamente in linea prospettica con l'osservatore. Poiché un allineamento perfetto capita molto di rado (e l'effetto è molto piccolo da cui il nome micro) occorre osservare un grande numero di stelle. Questo metodo è sensibile a pianeti che orbitano abbastanza vicini alla stella (1-10 UA) quindi permette di scoprire pianeti di massa equiparabile a quella terrestre. La scala caratteristica dell'evento è data dal raggio di Einstein. L'amplificazione della luce osservata (magnificazione) è descritta da:

$$\mu = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \quad (3.6)$$

con $u = \beta/\theta_E$, dove β è la separazione angolare tra lente e sorgente e θ_E il raggio di Einstein, cioè la distanza angolare caratteristica entro cui la luce di una stella sorgente viene amplificata in modo significativo dalla lente gravitazionale. Quando $u \rightarrow 0$ (allineamento perfetto), $\mu \rightarrow \infty$; quando u è grande, $\mu \rightarrow 1$ (nessuna amplificazione). Un pianeta attorno alla stella lente produce un'anomalia nella curva di luce, permettendo di stimare il rapporto di massa M_p/M_* .

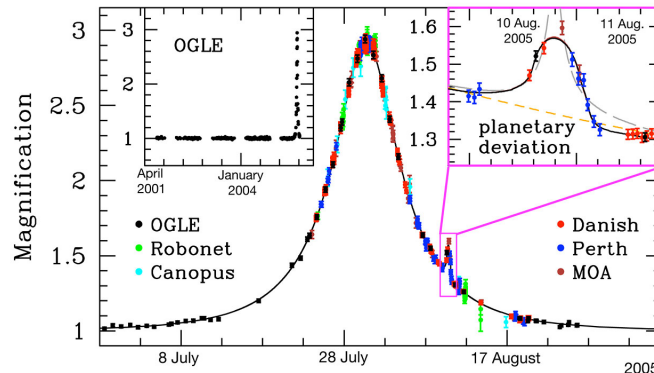


Figura 3.2: Curva di luce dell'evento di microlensing OGLE-2005-BLG-390. L'inserto in alto a destra evidenzia la deviazione planetaria, della durata di circa un giorno, sulla parte discendente della curva. Crediti: ESO

3.4 Astrometria

Il primo metodo storicamente usato è l'astrometrico, i cui primi tentativi risalgono al 1943. Con questo metodo sono stati individuati molti candidati, ma nessuno è mai stato confermato come pianeta, portando la maggior parte degli astronomi ad abbandonarlo. Il limite principale è la necessità di misurare con estrema precisione le oscillazioni angolari della stella sul piano del cielo causata dal suo moto attorno al centro di massa, troppo piccole per essere rilevate con certezza anche dai migliori telescopi. Inoltre, il metodo funziona meglio quando le orbite sono perpendicolari alla linea di vista, condizione che rende impossibile l'uso di altre tecniche per la conferma. Per ricavare la massa del pianeta M_p con l'astrometria sono necessari quattro elementi: l'oscillazione angolare θ (misurata dal telescopio), la distanza della stella d (dalla parallasse), il periodo orbitale P (dalla periodicità dell'oscillazione) e la massa della stella M_* (dalla spettroscopia). Da θ e d si ottiene il semiasse maggiore dell'orbita stellare:

$$a_* = \theta \cdot d = \frac{M_p}{M_*} a \quad (3.7)$$

Dato che $M_p \ll M_*$, a_* sarà molto piccolo. Da P e M_* , mediante la terza legge di Keplero, si ricava il semiasse maggiore dell'orbita del pianeta a :

$$a^3 = \frac{G(M_* + M_p)}{4\pi^2} P^2 \xrightarrow{M_p \ll M_*} a^3 \simeq \frac{GM_*}{4\pi^2} P^2 \quad (3.8)$$

infine si ha $M_p = M_* (a_*/a)$.

3.5 Variazioni dei tempi orbitali

In sistemi planetari numerosi, l'attrazione gravitazionale reciproca dei pianeti fa sì che un pianeta acceleri e un altro pianeta decelerì mentre compie la sua orbita; l'accelerazione fa cambiare il periodo orbitale di ogni pianeta. Il rilevamento di questo effetto misurando il cambiamento è noto come variazione dei tempi di transito. L'analisi della variazione temporale, se esiste, permette quindi di rilevare la presenza di un pianeta non transitante in un sistema dove c'è almeno un pianeta che transita davanti alla propria stella. Con questo metodo per esempio si è scoperto Nettuno; la sua grande massa ha la capacità di influenzare il moto di Urano. Nel 1781, e gli astronomi avevano individuato una serie di irregolarità nel suo percorso che non potevano essere completamente spiegate dalla legge di gravitazione di Newton. Tuttavia erano spiegabili dalla presenza di perturbazioni gravitazionali di un altro pianeta.

3.6 Imaging diretto

La tecnica consiste nel catturare un'immagine dell'esopianeta direttamente, osservando la radiazione infrarossa riflessa dalla sua atmosfera. La ragione per la quale si guarda nell'infrarosso è che a queste frequenze il contrasto è più favorevole rispetto al visibile: in media, nell'infrarosso, una stella è circa 1 milione di volte più luminosa della luce riflessa dal pianeta, mentre ad altre lunghezze d'onda tale rapporto supera

il miliardo. A causa dei limiti di questa tecnica, è possibile soltanto trovare pianeti con raggio molto grande e che orbitano a grandi distanze dalla stella. Sono stati sviluppati vari metodi per aiutare l'osservazione tramite Direct Imaging per ottenere immagini più nitide e libere da disturbi. Il contrasto di luminosità tra pianeta e stella (luce riflessa) è:

$$\frac{L_p}{L_*} = \left(\frac{R_p}{a} \right)^2 \Phi(t) \quad (3.9)$$

dove $\Phi(t)$ è la funzione di fase (descrive quanto del disco illuminato del pianeta è rivolto verso di noi), che dipende dall'angolo di illuminazione. La separazione angolare osservata è:

$$\theta = \frac{a}{d} \quad (3.10)$$

dove d è la distanza del sistema dalla Terra, a il semi-asse maggiore dell'orbita del pianeta. Per pianeti che emettono luce propria (giovani e caldi), il contrasto termico è:

$$\frac{L_p}{L_*} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \left(\frac{T_p}{T_*} \right)^4 \quad (3.11)$$

L'imaging diretto richiede che due condizioni siano soddisfatte: un contrasto di luminosità sufficiente e una separazione angolare risolvibile. Il contrasto è favorito per pianeti grandi e lontani dalla stella, mentre la separazione angolare è favorita per sistemi vicini a noi. Queste due condizioni spiegano perché l'imaging diretto ha avuto successo principalmente per pianeti giganti giovani attorno a stelle vicine.

3.6.1 Wispit2

Un esempio significativo di imaging diretto è il sistema Wispit 2, una stella giovane (5 milioni di anni) situata a circa 437 anni luce nella costellazione dell'Aquila. Grazie agli strumenti Sphere e Gravity+ del Very Large Telescope, sono stati osservati direttamente due pianeti giganti in formazione: Wispit 2b e Wispit 2c, in orbita a 57 UA e 14 UA dalla stella. Questo sistema rappresenta solo il secondo caso, dopo PDS 70, in cui due pianeti vengono osservati direttamente mentre si formano, offrendo una rara finestra sui processi che hanno plasmato il nostro Sistema Solare circa 4,5 miliardi di anni fa.

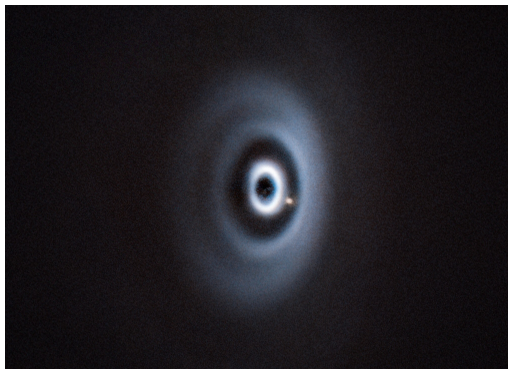
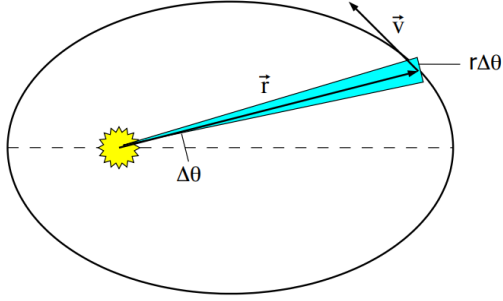


Figura 3.3: Immagine del VLT che mostra Wispit 2b all'interno dell'immensa lacuna tra gli anelli del disco protoplanetario della sua stella madre. Crediti: Eso/Rf van Capelleveen et al.

A. Dimostrazione delle Leggi di Keplero

A.1 Seconda Legge



Considerando un angolo infinitesimo $\Delta\theta$, l'area spazzata dal raggio Sole-pianeta può essere approssimata all'area di un triangolo di base $r\Delta\theta$:

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2}r\Delta\theta \cdot r}{\Delta t} = \frac{1}{2}r^2 \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{1}{2}r^2\omega$$

Figura A.1

Il momento angolare $\vec{L}$ del pianeta è dato dal prodotto vettoriale fra il raggio e la quantità di moto del pianeta:

$$\vec{L} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$$

$$L = rmv \sin \theta = rmv_c = rm(\omega r) = mr^2\omega$$

Pertanto:

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{L}{2m}$$

In un sistema isolato il momento angolare si conserva e il secondo membro è una costante. Quindi la velocità areolare è costante. La velocità areolare è:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}r^2\dot{\theta} = \frac{h}{2} = \text{costante} \quad (\text{A.1})$$

A.2 Prima Legge

Per dimostrare la prima legge di Keplero occorre risolvere l'equazione del moto di un pianeta soggetto alla forza gravitazionale del Sole. In coordinate polari (r, θ) , la componente radiale dell'accelerazione è:

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 \quad (\text{A.2})$$

La forza di gravità agisce solo lungo la direzione radiale, quindi la seconda legge di Newton fornisce:

$$m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = -G\frac{Mm}{r^2} \quad (\text{A.3})$$

Semplificando m e ricordando che $\dot{\theta} = h/r^2$ (dove h è il momento angolare specifico, costante per la seconda legge):

$$\ddot{r} - \frac{h^2}{r^3} = -\frac{GM}{r^2} \quad (\text{A.4})$$

Per risolvere questa equazione, si introduce il cambio di variabile $u = 1/r$. Dalla seconda legge si ha $\dot{\theta} = hu^2$. Le derivate di r rispetto al tempo si esprimono in funzione di u e θ :

$$\dot{r} = -h \frac{du}{d\theta}, \quad \ddot{r} = -h^2 u^2 \frac{d^2 u}{d\theta^2} \quad (\text{A.5})$$

Sostituendo nell'equazione radiale A.4 e semplificando, si ottiene l'equazione di Binet:

$$\frac{d^2 u}{d\theta^2} + u = \frac{GM}{h^2} \quad (\text{A.6})$$

Questa è un'equazione differenziale lineare non omogenea. La soluzione generale è:

$$u(\theta) = \frac{GM}{h^2} [1 + e \cos(\theta - \theta_0)] \quad (\text{A.7})$$

dove e e θ_0 sono due costanti di integrazione determinate dalle condizioni iniziali. Scegliendo l'asse di riferimento in modo che $\theta_0 = 0$, e ricordando che $r = 1/u$, si ottiene:

$$r(\theta) = \frac{p}{1 + e \cos \theta}, \quad p = \frac{h^2}{GM} \quad (\text{A.8})$$

L'equazione A.8 è l'equazione generale di una sezione conica in coordinate polari. L'eccentricità e determina la forma dell'orbita: $e = 0$ circonferenza, $0 < e < 1$ ellisse, $e = 1$ parabola, $e > 1$ iperbole. Nel caso dei pianeti del Sistema Solare, l'energia totale del sistema (somma di energia cinetica e potenziale) è negativa, il che corrisponde a uno stato legato. In questa condizione, l'eccentricità è sempre $0 < e < 1$, quindi l'orbita è un'ellisse con il Sole in uno dei due fuochi.

A.3 Terza Legge

La terza legge di Keplero può essere dimostrata in modo semplice nel caso di orbita circolare, considerando l'equilibrio tra la forza di gravità (F_g) e la forza centripeta: la forza centripeta (F_c):

$$F_g = F_c \quad \Rightarrow \quad G \frac{Mm}{r^2} = m\omega^2 r \quad \Rightarrow \quad \omega^2 r^3 = GM$$

Indicando con M la massa del Sole, con m la massa di un pianeta e con r la distanza Sole-pianeta. Poiché la velocità angolare è $\omega = 2\pi/T$, si ottiene:

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r^3 = GM \quad \Rightarrow \quad \frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} = \text{costante}$$

Per orbite ellittiche, la dimostrazione è più generale e richiede l'uso della geometria dell'ellisse: il risultato è identico, con r sostituito dal semiasse maggiore a :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} = \text{costante}$$

Bibliografia

- [1] Nicolson, Iain, and Patrick Moore. Pianeti, stelle e galassie. Milano: Mondadori, 1987.
- [2] Roberto Orosei. *Introduzione all'astrobiologia*. Dispense del corso, A.A 2025/2026.
- [3] Michele Ennio Maria Moresco. *Astronomia*. Dispense del corso, A.A 2022/2023.
- [4] NASA Science. "Solar System: Facts". In: *NASA Science*. 13 nov. 2017. URL: <https://science.nasa.gov/solar-system/solar-system-facts/>.
- [5] Stefano Covino. "Il Sistema Solare". In: *Osservatorio Astronomico di Brera - INAF*. 16 gen. 2001. URL: <http://www.brera.inaf.it/~covino/DVG/NEW/A2001SIS.HTM>.
- [6] Jack J. Lissauer e Imke de Pater. *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability*. Cambridge University Press, 2019.
- [7] Andrew Fraknoi, David Morrison, e Sidney Wolff. *Astronomy 2e*. OpenStax / Rice University, 2022. ISBN: 978-1-711470-57-3. URL: <https://openstax.org/details/books/astronomy-2e>.
- [8] Università degli Studi di Padova - Dipartimento di Astronomia. "Il cielo come laboratorio: Lezione 4 - Sistemi Planetari". Materiale didattico, 2001. URL: http://www.astro.unipd.it/progettoeducativo/Materiale/U_4_note.pdf
- [9] John S. Lewis. *Physics and Chemistry of the Solar System*. 2^a ed. Academic Press, 2004.
- [10] NASA Jet Propulsion Laboratory - Solar System Dynamics. "Planetary Satellite Discovery Circumstances". 2023. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/sats/discovery.html>.
- [11] Roberto Bedogni. "Atmosfere planetarie". Presentazione, INAF - Osservatorio Astronomico di Bologna, 17 feb. 2017. URL: <http://www.bo.astro.it/~bedogni/primolevi/2017/2017.02.17-atmosfere-pla.pdf>
- [12] Yuri I. Fujii, Masahiro Ogihara, e Yasunori Hori. "Different architecture of Jupiter and Saturn satellite systems from magnetospheric cavity formation". In: *Nature Astronomy* 10 (2026), pp. 800–808. DOI: 10.1038/s41550-026-02820-x.
- [13] Giovanni Vladilo. "Exoplanets: Direct imaging". In: *Planets and Astrobiology 2020-2021*. Materiale didattico, INAF - Osservatorio Astronomico di Trieste, 2021. URL: https://wwwuser.oats.inaf.it/giovanni.vladilo/PianetiAstrobiologia/aa2021/B02_imaging.pdf.
- [14] Jason T. Wright e B. Scott Gaudi. "Exoplanet Detection Methods". In: *arXiv preprint arXiv:1210.2471*. 2012. URL: <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/1210.2471>.

- [15] Loretta Solmi. “Il modello fisico dell’effetto dinamo”. In: *The Hell Dragon Web Site*. 2011. URL: <http://www.helldragon.eu/loretta/cdrom/Documenti/effDinamo.htm>.
- [16] Marco Callegari. *Il lensing gravitazionale: vincoli osservativi al contenuto di materia oscura in sorgenti astrofisiche*. Tesi di laurea Triennale, Università degli Studi di Padova - Dipartimento di Fisica e Astronomia, 21 settembre 2023. URL: https://thesis.unipd.it/retrieve/bfb4b2e7-5a2f-4a88-9e1f-984fb706b656/Callegari_Marco.pdf?__cf_chl_rt_tk=TBawfZAGvtJ5ZzU5fVl6BZFKtFDB9BVg6AhLU.vjpDU-1782460919-1.0.1.1-Uvz0hgJ0hTxK9xXqHxIMdTE0QgCcYQtaS6Uet7xKhHM.
- [17] Jason T. Wright e B. Scott Gaudi. “Exoplanet Detection Methods”. In: *arXiv preprint arXiv:1210.2471*. 2012. URL: <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/1210.2471>.