

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:  
**Fiorenza Ferrante**

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

---

Appello III  
Anno Accademico 2022-2023



## **Abstract**

Nella prima parte di questo elaborato si parte dalla definizione di pianeta per poi analizzare le proprietà e le caratteristiche generali dei pianeti del Sistema Solare. Dapprima si espone e si ricava l'equazione dell'equilibrio idrostatico, dopodiché si descrivono in maniera concisa le fasi della formazione planetaria e le caratteristiche del disco in cui è avvenuta. Si prosegue con la trattazione delle atmosfere e la descrizione del profilo pressione-temperatura. Un'altra caratteristica distintiva dei pianeti che si espone nell'elaborato è la temperatura di equilibrio, con conseguente definizione del parametro di greenhouse. Finita la trattazione generale, si vanno a descrivere più nel dettaglio le caratteristiche di ogni singolo pianeta. Nella seconda parte si esplorano i metodi di rilevazione dei pianeti extrasolari per poi concludere con una descrizione della popolazione esoplanetaria finora scoperta.

# Indice

<b>1</b>	<b>Proprietà generali dei pianeti del Sistema Solare</b>	<b>1</b>
1.1	Definizione di pianeta . . . . .	1
1.2	Equilibrio idrostatico . . . . .	1
1.3	Formazione dei pianeti . . . . .	3
1.4	Atmosfere planetarie e profilo P-T . . . . .	3
1.5	Temperatura di equilibrio e parametro di greenhouse . . . . .	5
1.6	Caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Ricerca di pianeti esterni</b>	<b>11</b>
2.1	Metodi di rilevazione . . . . .	11
2.1.1	Osservazione diretta . . . . .	11
2.1.2	Astrometria . . . . .	12
2.1.3	Velocità radiale . . . . .	12
2.1.4	Transiti . . . . .	12
2.1.5	Microlensing . . . . .	13
2.2	Popolazione esoplanetaria . . . . .	13
<b>A</b>	<b>K2-18b, un possibile mondo Hycean</b>	<b>a</b>

# Capitolo 1

## Proprietà generali dei pianeti del Sistema Solare

Lo studio dei pianeti del Sistema Solare (SS) è di fondamentale importanza, in quanto ci permette di avere accesso diretto a molte informazioni che altrimenti sarebbero difficili o impossibili da ottenere. Inoltre, è importante per meglio comprendere la formazione del SS, l'evoluzione planetaria, la nascita e l'evoluzione di possibili forme di vita e lo studio di pianeti extrasolari.

### 1.1 Definizione di pianeta

Per parlare di pianeti bisogna innanzitutto definire cosa sono. Secondo l'Unione Astronomica Internazionale (IAU), il 24 agosto 2006 si è stabilito che un corpo celeste viene detto **pianeta** quando soddisfa le seguenti condizioni:

- essere in orbita attorno al Sole;
- avere massa sufficiente affinché assuma una forma quasi sferica, dovuta all'equilibrio idrostatico;
- aver ripulito lo spazio intorno alla sua orbita.

Gli oggetti che possiedono le prime due proprietà ma non la terza vengono classificati come pianeti nani. Infatti, proprio a causa di questa definizione, Plutone nel 2006 venne declassato da pianeta a pianeta nano.

### 1.2 Equilibrio idrostatico

Una proprietà che i pianeti devono avere per essere considerati tali, introdotta nel secondo punto della definizione di pianeta della IAU, è quella di essere in **equilibrio idrostatico**. Per analizzare questa condizione si approssima il pianeta come perfettamente sferico e si assumono densità  $\rho$  e pressione  $p$  dipendenti solo dal raggio  $r$ . L'equilibrio si ha quando la **forza gravitazionale** viene controbilanciata dalla **forza di gradiente di pressione** in ogni punto del pianeta. Si considerano, quindi, le forze agenti su un volumetto di materia di spessore  $dr$  e area  $A$  che si trova a distanza  $r$  dal centro. La forza di gravità sarà data da:

$$F_g = -\frac{GM(r)m(r)}{r^2}, \quad (1.1)$$

dove con  $M(r)$  si intende la massa contenuta nel guscio sferico di raggio  $r$  e con  $m(r)$  ci si riferisce alla massa del volumetto, pari a

$$m(r) = \rho(r)dV = \rho(r)Adr. \quad (1.2)$$

La forza dovuta al gradiente di pressione è la somma della forza di pressione esercitata sul volumetto dal materiale sovrastante e di quella dovuta al materiale sottostante. Questa, perché ci sia equilibrio, va eguagliata alla forza gravitazionale. Si avrà, quindi:

$$Ap(r) - Ap(r + dr) = -\frac{GM(r)\rho(r)Adr}{r^2}. \quad (1.3)$$

Segue la formulazione dell'equazione dell'equilibrio idrostatico:

$$\frac{dp(r)}{dr} = \frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}, \quad (1.4)$$

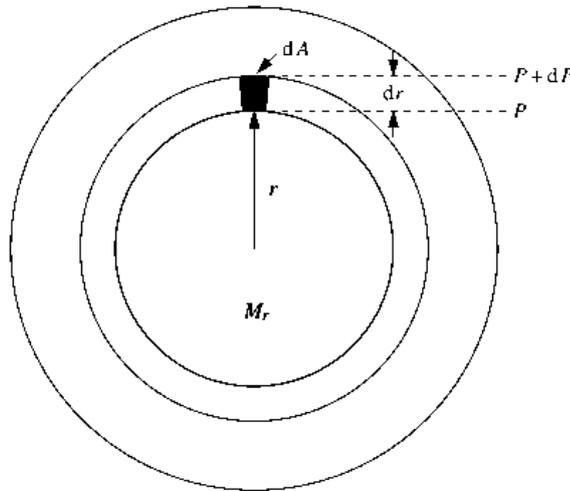
che descrive il variare del gradiente di pressione al variare del raggio.

È stata citata, nella definizione di pianeta, la condizione che i pianeti assumano una forma quasi sferica. Difatti, superata una **pressione critica** dell'ordine di  $10^9 Pa$ , le rocce si comportano come un liquido, ciò implica che un rilievo non può essere più alto di una certa **altezza critica** (tale per cui  $P < P_{critica}$ ), altrimenti la sua base si sfalderebbe a causa della liquefazione delle rocce. Quest'altezza critica è diversa a seconda del pianeta considerato, poiché dipende dalle sue caratteristiche:

$$h_{critico} = \frac{P(h)R_{pianeta}^2}{GM_{pianeta}\rho} + h, \quad (1.5)$$

per la Terra  $h_{critico}$  è dell'ordine della decina di km. A causa della liquefazione delle rocce la forma del pianeta risulta essere quasi sferica, priva di rilievi importanti.

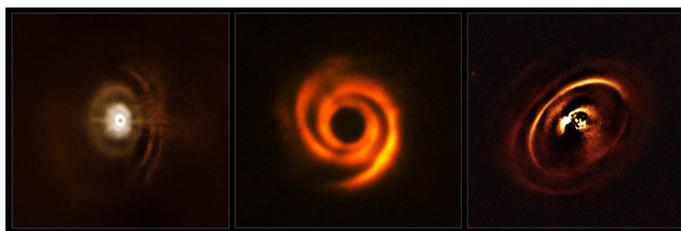
La forma dei pianeti non è perfettamente sferica anche a causa della velocità di rotazione attorno al proprio asse, che provoca un rigonfiamento a livello equatoriale e uno schiacciamento ai poli. Maggiore è la velocità di rotazione, maggiore sarà la deformazione che ne consegue.



**Figura 1.1:** Equilibrio idrostatico [Karttunen-Fundamental Astronomy]

## 1.3 Formazione dei pianeti

La teoria più accreditata per spiegare la formazione dei pianeti è la cosiddetta **ipotesi nebulare**, la quale prevede che i pianeti si formino nel materiale che circonda una stella dopo la sua formazione. La stella si forma a partire da una nube molecolare gigante (GMC) che in alcuni punti collassa a causa di instabilità. Collassando, la nube si addensa e il centro si scalda fino a innescare le reazioni termonucleari che danno origine alla **protostella**. Durante questo processo la velocità di rotazione del materiale che la circonda aumenta, quindi si schiaccia e assume la forma di un disco, detto **disco protoplanetario**. In questo disco sono presenti due componenti: una gassosa, prevalentemente composta da idrogeno  $H$  ed elio  $He$ , e una solida. Quest'ultima è formata da piccoli grani di polvere, già presenti nella nube, che si scontrano tra loro a causa dei moti caotici del disco protoplanetario. I grani iniziano così ad aggregarsi fino a dare origine, dopo alcune centinaia di migliaia di anni, ai **planetesimi**, oggetti le cui dimensioni sono dell'ordine di alcuni chilometri. I planetesimi, a loro volta, si aggregano formando i **protopianeti**, di dimensioni comparabili a quelle della Luna o di Marte. Le collisioni tra protopianeti portano alla formazione di oggetti ancora più grandi in un processo della durata di centinaia di milioni di anni, dando così origine ai pianeti veri e propri. Nella zona più interna del disco protoplanetario le temperature sono tali da non consentire la presenza di elementi volatili, mentre nelle zone più lontane dalla protostella sono presenti sia elementi volatili che ghiacci. Queste due zone vengono separate dalla cosiddetta **snow line** entro la quale si sono formati i pianeti interni, detti rocciosi, e oltre la quale è avvenuta la formazione dei pianeti esterni, detti gassosi. La presenza di maggior quantità di materiale oltre la snow line ha consentito la formazione di pianeti più grandi, chiamati giganti, che hanno attirato il gas rimasto nel disco. Essendo che i pianeti e il Sole si sono originati tutti dallo stesso disco protoplanetario in rotazione, tutti i pianeti orbitano attorno al Sole nella stessa direzione, che coincide anche con la direzione di rotazione del Sole, pressoché con la stessa inclinazione.



**Figura 1.2:** Dischi protoplanetari osservati da SPHERE [ESO]

## 1.4 Atmosfere planetarie e profilo P-T

Le atmosfere dei giganti gassosi vengono dette **primarie** poiché si sono formate coi pianeti stessi e sono, dunque, composte principalmente da  $H$  ed  $He$ . Le atmosfere dei pianeti rocciosi vengono dette **secondarie**, molto probabilmente prodotte da degassing o in larga parte nelle fasi di riassetto dinamico del SS, a seguito di impatti con corpi provenienti da oltre la snow line. Nonostante la composizione iniziale fosse simile, le atmosfere attuali dei pianeti interni hanno caratteristiche molto diverse tra loro. Questo è dovuto a storie evolutive chimico-fisiche differenti

e alla significativa perdita di atmosfera marziana. La **perdita dell'atmosfera** può avvenire per:

- processi termici (Jeans escape): atomi o molecole con velocità maggiore alla velocità di fuga possono riuscire a scappare dall'atmosfera. Questo processo dipende dalle proprietà del pianeta e dell'atmosfera.

$$v_{escape} = \sqrt{\frac{2GM_{pianeta}}{r_{atmosfera}}} \quad v_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m_{particella}}} \quad (1.6)$$

dove  $v_0$  indica la velocità più probabile nella distribuzione Maxwelliana delle velocità delle particelle dell'atmosfera. Per la Terra  $v_0 \simeq 5 \frac{km}{s}$  e  $v_{escape} \simeq 11,2 \frac{km}{s}$ ;

- processi non termici: interazioni con ioni, fotoni o elettroni possono far acquisire una velocità superiore a quella di fuga, è un processo lento;
- fuga idrodinamica: dovuta a vulcanismo e grandi impatti, è un processo di perdita di atmosfera locale.

Il **profilo P-T** (pressione-temperatura) rappresenta l'andamento della temperatura in funzione della pressione e dell'altitudine. Ovvero:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{RT} dz, \quad (1.7)$$

dove  $g$  è l'accelerazione gravitazionale,  $R$  è la costante universale dei gas e  $z$  rappresenta la quota. Ponendo

$$H(z) = \frac{R(z)T(z)}{g(z)} \quad (1.8)$$

detta **altezza di scala di pressione**, cioè la quota alla quale la pressione diminuisce di un fattore  $\frac{1}{e}$ , si ha:

$$d \ln p = -\frac{dz}{H(z)}. \quad (1.9)$$

Il profilo P-T cambia da pianeta a pianeta, a seconda delle caratteristiche della sua atmosfera. Quello che si conosce meglio, naturalmente, è il profilo della Terra (*Figura 1.3*). Esso presenta una termosfera (strato dell'atmosfera che va da circa 80 a 100 km di altitudine) riscaldata dall'assorbimento di radiazione ad altissima energia proveniente dal Sole e un aumento di temperatura in stratosfera (10-50 km circa) causato dall'assorbimento della radiazione UV da parte dell'ozono. L'andamento di temperatura in troposfera (0-10 km circa) è dovuto all'assorbimento di luce visibile e NIR proveniente dal Sole e al riscaldamento alla base dal suolo terrestre, tramite l'assorbimento della radiazione infrarossa emessa dal suolo.

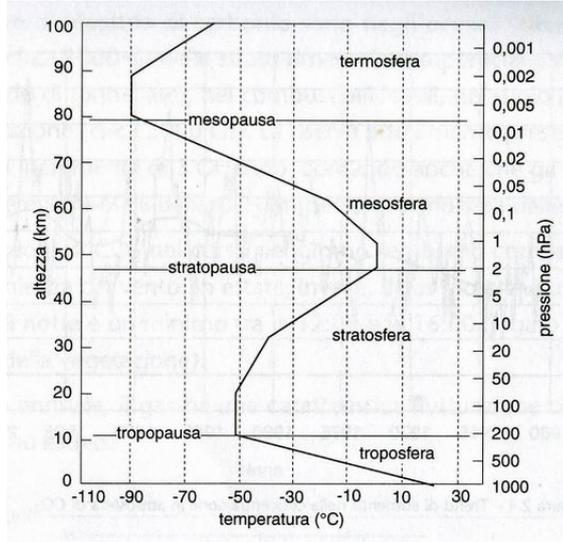


Figura 1.3: Profilo P-T della Terra [Rolando Neri]

## 1.5 Temperatura di equilibrio e parametro di greenhouse

Considerando l'emissione planetaria come approssimabile a corpo nero (vero per considerazioni energetiche globali) e un pianeta senza atmosfera in rapida rotazione, si fa un bilanciamento energetico tra irraggiamento solare e perdite radiative del pianeta e si definisce **temperatura di equilibrio** la temperatura del pianeta negli strati sotto la superficie. Per fare ciò bisogna prima definire l'**albedo** ( $A$ ) di un pianeta come la frazione di radiazione incidente che il corpo riflette e diffonde.

$$A_\nu = \frac{\text{radiazione riflessa} + \text{radiazione scatterata}}{\text{radiazione incidente}}, \quad A = \int_\nu A_\nu d\nu \quad (1.10)$$

Per il calcolo della temperatura di equilibrio si scrivono la potenza in entrata e in uscita dal pianeta:

$$P_{in} = (1 - A)L_\odot \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (1.11)$$

$$P_{out} = 4\pi R_{pianeta}^2 \epsilon \sigma T^4 \quad (1.12)$$

dove  $L_\odot$  è la luminosità del Sole,  $\Omega$  l'angolo solido,  $\epsilon$  l'emissività (pari a  $(1 - A)$  per un corpo all'equilibrio termodinamico) e  $\sigma T^4$  è il flusso. All'equilibrio si ha  $P_{in} = P_{out}$  e dunque:

$$T_{eq} = \left[ \frac{(1 - A)}{4\epsilon\sigma} \left( \frac{L_\odot}{4\pi r_\odot^2} \right) \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (1.13)$$

dove con  $r_\odot$  ci si riferisce alla distanza del pianeta dal Sole. Il calcolo è consistente con le temperature di Terra e Marte, la temperatura di equilibrio Venere è consistente con la temperatura esterna ma non con quella superficiale, a causa dell'effetto serra. I pianeti giganti hanno una temperatura superiore a quella di equilibrio a causa della fonte di calore interna dovuta alla contrazione e al fatto che si stanno ancora raffreddando.

Si vogliono ora comparare temperatura di equilibrio e **temperatura superficiale** ( $T_{superf}$ ) di un pianeta per poter ricavare il **parametro di greenhouse**, che è una misura dell'efficacia dell'**effetto serra**, definito come

$$G = \sigma(T_{superf}^4 - T_{eq}^4), \quad (1.14)$$

che normalizzato al flusso diventa

$$g = \frac{G}{\sigma T_{superf}^4}. \quad (1.15)$$

Si può scrivere l'energia persa dal pianeta a causa dell'effetto serra come

$$E = 4\pi R_{efficace}^2 \sigma T_{superf}^4 (1 - g), \quad (1.16)$$

segue la formula per descrivere la quantità di effetto serra

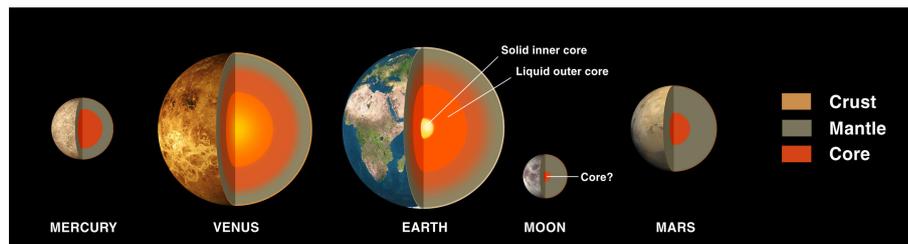
$$\frac{(1 - \bar{\alpha})}{4} S_{\odot} = \sigma T_{superf}^4 (1 - g), \quad (1.17)$$

con  $\bar{\alpha}$  albedo medio e  $S_{\odot}$  radiazione solare. Nel caso dei pianeti giganti bisogna aggiungere il termine dovuto a fonti di energia interne. L'energia netta persa sarà dunque:

$$E = -\frac{(1 - \bar{\alpha})}{4} S_{\odot} + \sigma T_{superf}^4 + \frac{E_{interna}}{4\pi R_{pianeta}^2}. \quad (1.18)$$

## 1.6 Caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare

Si è visto come i pianeti del SS si differenzino in dimensioni, distanza dal Sole, composizione, atmosfere e temperatura. A queste caratteristiche se ne possono aggiungere altre, tra cui l'inclinazione dell'orbita rispetto all'**eclittica**, definita come il percorso apparente del Sole nel cielo della Terra in un anno, cioè l'intersezione della sfera celeste con il piano su cui giace l'orbita terrestre. Prendendo come riferimento l'eclittica gli altri pianeti orbitano attorno al Sole differendo di pochi gradi, con l'eccezione di Mercurio che varia di  $7^\circ$ . Si può notare, inoltre, che i pianeti hanno **orbite ellittiche** e che il Sole è posto in uno dei due fuochi. Le eccentricità di queste orbite sono molto basse ( $\ll 1$ ), con l'eccezione di Mercurio che ha un'eccentricità di 0.2056. Altre caratteristiche quali massa, numero di satelliti, velocità di rotazione, campo magnetico e densità sono raccolte, insieme a quelle precedentemente citate, nelle Tabelle 1.1 e 1.2. I valori riportati sono da considerarsi medi. Raggi e masse sono in unità di raggio e massa terrestri, pari a  $R_{\oplus} = 6.378 \text{ km}$  e  $M_{\oplus} = 5.973 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ .



**Figura 1.4:** Struttura interna dei pianeti rocciosi del SS [NASA]

**Tabella 1.1:** Caratteristiche pianeti interni

	Mercurio	Venere	Terra	Marte
Distanza dal Sole ( $AU$ )	0.39	0.72	1.00	1.52
Inclinazione dell'orbita ( $^{\circ}$ )	7.01	3.39	0.00	1.85
Eccentricità dell'orbita	0.2056	0.0068	0.0167	0.0934
Periodo di rivoluzione ( $y$ )	0.24	0.62	1.00	1.88
Periodo di rotazione ( $d$ )	58.78	-243.69	0.99	1.03
Raggio ( $R_{\oplus}$ )	0.38	0.95	1.00	0.15
Massa ( $M_{\oplus}$ )	0.055	0.815	1.000	0.107
Densità media ( $g/cm^3$ )	5.4	5.2	5.5	3.9
Temperatura superficiale ( $K$ )	440	737	288 – 293	186 – 268
Campo magnetico ( $mT$ )	0.35	< 0.01	30	< 0.01
Satelliti naturali	0	0	1	2

**Tabella 1.2:** Caratteristiche pianeti esterni

	Giove	Saturno	Urano	Nettuno
Distanza dal Sole ( $AU$ )	5.20	9.54	19.18	30.06
Inclinazione dell'orbita ( $^{\circ}$ )	1.31	2.49	0.77	1.77
Eccentricità dell'orbita	0.0484	0.0541	0.0472	0.0086
Periodo di rivoluzione ( $y$ )	11.86	29.46	84.07	164.82
Periodo di rotazione ( $d$ )	0.41	0.44	-0.72	0.67
Raggio ( $R_{\oplus}$ )	1316	755	52	44
Massa ( $M_{\oplus}$ )	317.80	95.16	14.54	17.15
Densità media ( $g/cm^3$ )	1.3	0.7	1.3	1.6
Temperatura superficiale ( $K$ )	152	143	68	53
Campo magnetico ( $mT$ )	430	20	10 – 100	10 – 100
Satelliti naturali	95	146	27	14

## Mercurio

Si tratta del pianeta più piccolo e più vicino al Sole ed è un pianeta arido e pieno di crateri da impatto. È anche il pianeta con l'orbita più eccentrica e più inclinata e l'unico dei pianeti interni su cui non sia mai atterrata una sonda spaziale. Mercurio non ha una vera e propria atmosfera, è però circondato da una tenue componente gassosa, chiamata esosfera. L'assenza di atmosfera fa sì che l'escursione termica tra notte e giorno sia molto elevata, dai  $430^{\circ}C$  ai  $-170^{\circ}C$ . Anche la presenza dei vari crateri è dovuta alla mancanza di un'atmosfera, poiché non ha protezione dagli impatti che, una volta creati, non vengono cancellati non essendoci possibilità di fenomeni di erosione.

La struttura interna di Mercurio consiste in un nucleo, che occupa il 55% del suo volume totale, in parte solido e in parte liquido a causa degli effetti mareali che il Sole esercita sul pianeta. Questo nucleo è in grado di produrre un campo magnetico stabile (vedi *Tabella 1.1*). Infatti, in generale i campi magnetici dei pianeti sono generati dalla rotazione e dai moti convettivi di una regione interna fluida ed elettricamente conduttrice, nel caso di Mercurio la parte liquida del nucleo di ferro.

## Venere

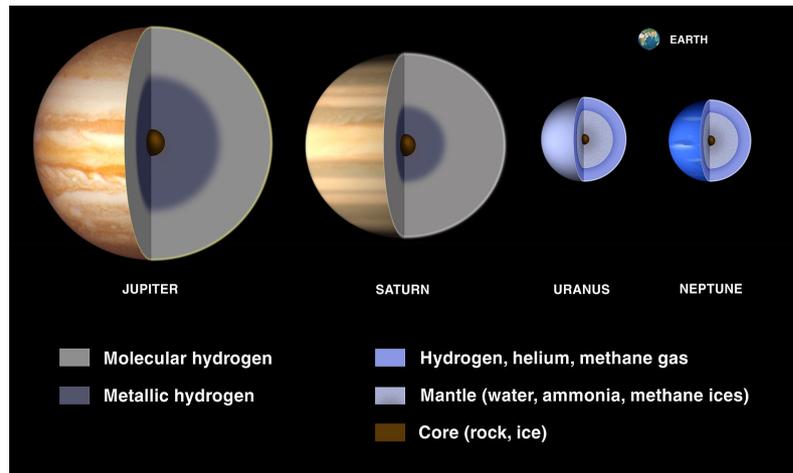
Venere appare come il pianeta più simile alla Terra, infatti sono chiamati pianeti gemelli, anche se questa somiglianza è del tutto illusoria. Il pianeta, infatti, è avvolto da un'atmosfera densissima che genera al suolo una pressione di 92 bar ed è costituita al 96.5% da anidride carbonica ( $CO_2$ ). La sovrabbondanza di questo elemento genera un effetto serra molto intenso, motivo per cui la temperatura superficiale di Venere è così elevata. Nell'alta atmosfera di questo pianeta sono presenti soprattutto nubi costituite da goccioline di acido solforico, che aumentano di molto l'albedo. La densità e l'opacità dell'atmosfera sono tali che sulla superficie del pianeta non giunga molta luce, difatti essa è invisibile dall'esterno agli strumenti convenzionali, bisogna utilizzare i radar. Questi ultimi hanno rilevato una superficie inospitale, modellata da grandi vulcani attivi.

## Terra

La Terra è l'unico pianeta di cui si ha conoscenza in grado di ospitare la vita così come la si conosce, ricoperto per circa il 70% da masse d'acqua e si trova nella cosiddetta **zona abitabile**. Il campo magnetico che circonda la Terra è prodotto dai movimenti che avvengono nel nucleo esterno del pianeta, liquido e ricco di ferro. La presenza del campo magnetico è fondamentale per la presenza della vita, in quanto protegge l'atmosfera dalle particelle del vento solare, dannose per gli organismi. Un'altra caratteristica importante che contraddistingue la Terra è la presenza di una tettonica a placche, cioè si tratta di un pianeta geologicamente attivo. Ciò fa sì che vengano stabilizzate le condizioni climatiche superficiali e, inoltre, il rimescolamento superficiale provocato dalla tettonica a placche si pensa sia essenziale per il rilascio di nutrienti vitali.

## Marte

È l'unico pianeta, oltre alla Terra, ad avere stagioni e calotte polari ghiacciate, anche se, rispetto a essa, è circa la metà in dimensioni ed è molto meno denso e massiccio. La sua atmosfera è estremamente rarefatta, a causa di una significativa perdita passata, e composta per il 95% da anidride carbonica. Circa 4 miliardi di anni fa, forse a causa dell'impatto con grandi asteroidi, Marte perse il suo campo magnetico globale, lasciando direttamente esposta l'atmosfera al vento solare, che l'ha erosa, rendendola sempre più rarefatta. L'acqua allo stato liquido è così evaporata, rimanendo sul pianeta solo sotto forma di ghiacci come permafrost nel suolo e nelle calotte polari. La perdita di atmosfera marziana è stata comprovata grazie all'abbondanza relativa degli isotopi di Argon ( $Ar$ ) su Marte. L'isotopo principale è  $^{40}Ar$ , sono presenti anche due isotopi instabili con stessa abbondanza, minore di quella dell'isotopo principale:  $^{38}Ar$  e  $^{36}Ar$ . La perdita di atmosfera favorisce la fuga dell'isotopo più leggero, cioè  $^{36}Ar$ , pertanto si è rilevata un'abbondanza relativa degli isotopi  $\frac{^{36}Ar}{^{38}Ar}$  molto più bassa su Marte ( $\simeq 4$ ).



**Figura 1.5:** Struttura interna dei pianeti gassosi del SS [NASA]

## Giove

È il più grande e massiccio tra i pianeti, con una massa maggiore del doppio della somma delle masse degli altri pianeti messi assieme. Giove è costituito da materiale fluido in rapida rotazione, che causa uno schiacciamento importante del pianeta: il suo diametro equatoriale supera quello polare di circa il 7%. La sua composizione chimica è simile a quella delle stelle, in quanto costituito prevalentemente da idrogeno per il 70 – 75% ed elio per circa il 25%.

L'atmosfera di Giove è caratterizzata da uno strato gassoso esterno che mostra macchie, vortici, regioni chiare, chiamate "zone", e regioni scure, dette "bande". La dinamica di queste strutture è molto complessa, con venti misurati fino a 500 km/h. In particolare è presente una struttura atmosferica chiamata "Grande Macchia Rossa", un vortice anticiclonico nell'emisfero sud. Lo strato esterno di Giove è costituito da tre piani di nubi spessi circa 70 km. Si pensa che lo strato più alto sia costituito da cristalli di ammoniaca, quello intermedio da cristalli di idrosolfuro di ammonio e quello più basso da cristalli di ghiaccio e vapore d'acqua. A questi ultimi sono dovuti i fulmini osservati sul pianeta, mille volte più intensi di quelli terrestri. Sotto tutti questi strati la pressione è tale che il gas diventa liquido, in una transizione graduale: in profondità il gas condensa in un oceano di idrogeno ed elio. Ancora più in profondità, la pressione sempre maggiore fa sì che l'idrogeno liquido diventi conduttore, chiamato **idrogeno metallico**. Questo è lo strato che genera il forte campo magnetico di Giove. Al centro del pianeta potrebbe essere presente un nucleo roccioso oppure un misto di idrogeno liquido e materiali solidi.

## Saturno

Saturno è il secondo pianeta per massa e dimensioni e, così come Giove, è costituito da materiale fluido in rapida rotazione, ciò gli conferisce una forma schiacciata, con il diametro equatoriale che supera quello polare dell'11%. Saturno ha una struttura che ricorda quella di Giove: è presente uno strato esterno gassoso costituito prevalentemente da *H* ed *He* che sormonta una parte di idrogeno liquido che, al crescere della profondità e della pressione, diventa metallico e al centro si pensa ci sia un nucleo solido. Nell'atmosfera sono stati registrati venti di 1800 km/h, superati in velocità solo da quelli di Nettuno.

Tutti i pianeti giganti possiedono sistemi di anelli, anche se quelli più visibili sono quelli di Saturno. Questi sono costituiti da tanti anelli concentrici, composti da piccoli frammenti di ghiaccio d'acqua, con minime quantità di materiali rocciosi. Queste strutture sottili si estendono da 7000 a 80000 km dalla superficie del pianeta, ma la loro massa complessiva è piccola, pari a 25 milionesimi della massa di Saturno.

## Urano e Nettuno

Sono i pianeti meno conosciuti del SS, più lontani dalla Terra e meno illuminati dal Sole. Hanno dimensioni simili tra loro e hanno un colore azzurro/blu.

Urano ha la temperatura più bassa tra tutti i pianeti, di  $-224^{\circ}$ , ed è più freddo di Nettuno nonostante sia più vicino al Sole, poiché non possiede significative fonti di calore interno. Il pianeta è costituito da uno strato esterno, composto in prevalenza da  $H$  ed  $He$ , con un 2 – 3% di metano. Il metano assorbe la componente rossa della luce solare e riflette quella verde/blu, conferendo al pianeta il suo colore turchese. La densità media del pianeta è superiore a quella di Saturno, infatti al posto dell' $H$  liquido si trova un mantello costituito da fluidi caldi e densi di acqua, ammoniaca e metano. Una peculiarità del pianeta è costituita dal suo asse di rotazione, che si trova circa sul piano dell'orbita.

Nettuno possiede i venti più intensi del SS, anche oltre i 2000 km/h. Il suo colore blu è dovuto sempre alla presenza di metano e si pensa ci siano altri elementi sconosciuti che gli conferiscono una colorazione più scura. Rispetto a Urano, Nettuno è caratterizzato da più strutture atmosferiche quali tempeste e vortici. La struttura interna del pianeta è simile a quella di Urano, entrambi considerati giganti ghiacciati.

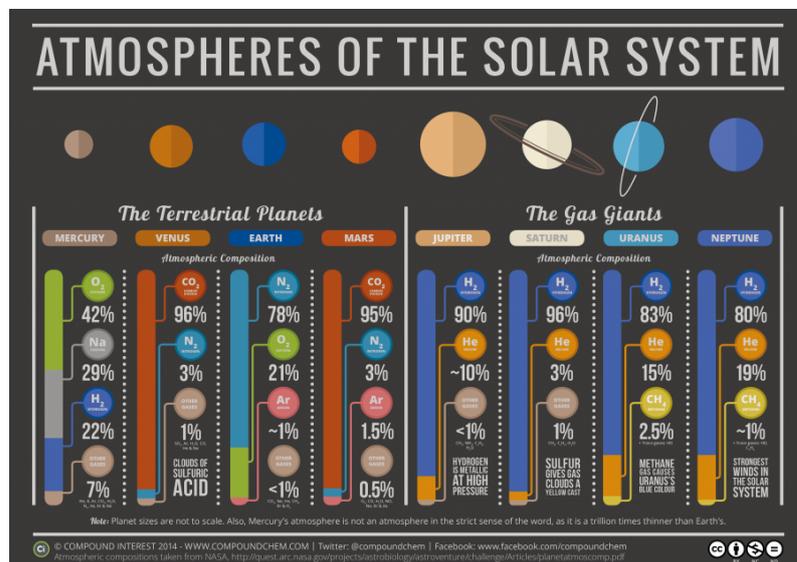


Figura 1.6: Composizione chimica delle atmosfere dei pianeti [MEDIA INAF]

## Capitolo 2

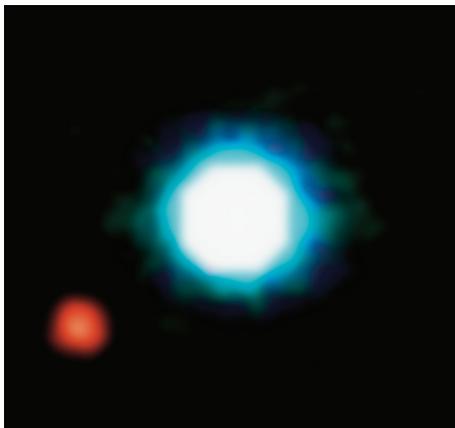
# Ricerca di pianeti esterni

### 2.1 Metodi di rilevazione

I metodi di ricerca degli esopianeti sono diversi e complessi e presentano molte difficoltà, anche legate al fatto che i pianeti rispetto alle stelle sono più piccoli e molto meno luminosi, dato che non brillano di luce propria ma riflettono una piccola quantità di luce della stella. Inoltre, osservato da distanze interstellari, un pianeta extrasolare appare vicinissimo alla propria stella che ne sovrasta la luminosità. Sono questi i motivi per cui i metodi di rilevazione sono prevalentemente indiretti, ovvero si osservano gli effetti che il pianeta provoca sulla sua stella più che il pianeta stesso. Ad oggi sono conosciuti circa 5504 esopianeti, sui mille miliardi di pianeti extrasolari stimati nella Via Lattea.

#### 2.1.1 Osservazione diretta

Questo metodo ha dato pochi risultati per i motivi sopra citati: solo una cinquantina di pianeti sono stati scoperti tramite il **direct imaging**. L'osservazione diretta è più efficace per pianeti lontani dalla propria stella, così che la loro debole luminosità appaia risolta dalla luce della stella. Per una migliore rilevazione, si cerca di cogliere sia la luce visibile emessa dalla stella e riflessa dal pianeta, sia la radiazione infrarossa emessa dal pianeta stesso.



**Figura 2.1:** Esopianeta 2M1207b con la sua stella [ESO]

## 2.1.2 Astrometria

Il metodo astrometrico favorisce la scoperta di pianeti lontani dalla propria stella, la cui orbita è vista di faccia e non di taglio. Si basa sull'idea che una stella che orbita attorno al centro di massa insieme a un pianeta presenti un moto oscillatorio sovrapposto al suo moto nella galassia, distinguibili grazie a misure di posizione molto precise. Il problema è che i pianeti lontani impiegano molto tempo a orbitare attorno alla stella, dunque sono necessarie osservazioni prolungate per studiarne il moto. Ad oggi solo un pianeta è stato scoperto grazie a questo metodo, VB 10b.

## 2.1.3 Velocità radiale

È il metodo indiretto con cui è stato scoperto il primo esopianeta (51 Pegasi b) e che, ancora oggi, è uno dei più efficaci. Questo metodo è basato sull'**effetto Doppler**, grazie al quale, tramite lo studio delle righe in assorbimento del suo spettro, si è in grado di individuare se una stella si sta avvicinando o allontanando dall'osservatore mentre orbita attorno al centro di massa del suo sistema. Se questa stella ha un pianeta, sovrapposto allo spostamento delle righe spettrali dovuto all'effetto Doppler, nel suo spettro si potrà osservare un'oscillazione periodica delle righe, rivelando la presenza del pianeta. Il tempo necessario perché si compia questa oscillazione è il periodo orbitale del pianeta.

## 2.1.4 Transiti

Il metodo dei transiti è il metodo che ha permesso di trovare più esopianeti. Consiste nella misurazione di una diminuzione del flusso della stella al passaggio del pianeta davanti a essa, in una fase detta **eclissi esoplanetaria**. I transiti sono molto sensibili ai pianeti interni, infatti la maggior parte dei sistemi rilevati hanno pianeti entro l'orbita della Terra e di Mercurio, poiché se il piano dell'orbita è leggermente inclinato, un pianeta più esterno non passerà davanti alla stella lungo la linea di vista dell'osservatore. Nel metodo dei transiti è importante il rapporto tra i raggi di stella e pianeta, infatti questo metodo consente di rilevare meglio la presenza di pianeti grandi oltre che vicini alle proprie stelle. Inoltre, un'eclissi secondaria, cioè quando il pianeta è bloccato dalla stella, permette una misurazione diretta della radiazione del pianeta.

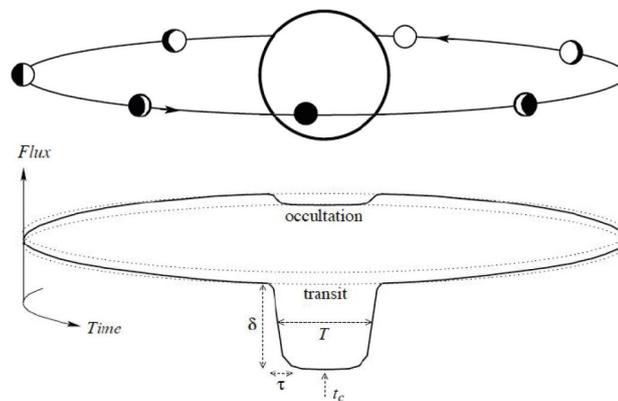


Figura 2.2: Riproduzione di un transito planetario [Winn]

Grazie al metodo del transito si possono caratterizzare le atmosfere degli esopianeti, se ne hanno una. Quando il pianeta transita davanti alla stella la luce della stella passa attraverso lo strato superiore dell'atmosfera del pianeta e, studiandone lo spettro, si possono ricavare gli elementi presenti nell'atmosfera.

## 2.1.5 Microlensing

Il metodo della microlente gravitazionale sfrutta un effetto della relatività generale secondo cui la massa degli oggetti celesti induce una curvatura dello spazio. In questo modo la luce proveniente da un corpo retrostante al primo viene deviata, permettendo di vedere il corpo nascosto e di vederlo più luminoso. In questo caso è una stella ad agire come lente gravitazionale per una stella più lontana: se la prima ha un pianeta, questo contribuirà leggermente con la sua massa al microlensing, rivelandone la presenza. Il vantaggio di questo metodo è che funziona anche per stelle lontane e per pianeti di piccola massa, anche relativamente distanti dalla propria stella. Il grosso svantaggio è che l'effetto dura pochi giorni o settimane, dopodichè le due stelle si disallineano.

## 2.2 Popolazione esoplanetaria

Gli esopianeti sono stati scoperti non appena gli strumenti hanno raggiunto una sensibilità sufficiente e sono state ideate strategie osservative adeguate. Da allora si è scoperta una grande varietà di esopianeti, tra cui terrestri, super-Terre, sub Nettuniani, Nettuniani, giganti gassosi e Gioviniani caldi. Le super-Terre sono pianeti extrasolari di tipo roccioso con una massa maggiore di quella della Terra e minore di quella di Nettuno. Questo tipo di pianeti, il cui nome si riferisce solo alla massa, non è presente nel SS. I sub Nettuniani, invece, sono pianeti con composizione simile a quella di Urano e Nettuno ma con massa inferiore. Le loro spesse atmosfere ricche di  $H$  ed  $He$  ricoprono mantelli di ghiaccio e roccia oppure oceani liquidi di acqua, ammoniaca o entrambe. I Gioviniani caldi sono pianeti di massa confrontabile con quella di Giove che orbitano però molto vicino alla loro stella madre, in genere sotto le  $0.5 AU$ . A causa di ciò la loro temperatura è molto elevata ( $T_{superf} \simeq 1300^{\circ}C$ ), da cui il nome. Nonostante sia necessario considerare i bias di osservazione, una buona parte dei sistemi rilevati ha un'architettura diversa dal SS che, dunque, non può essere considerato rappresentativo.

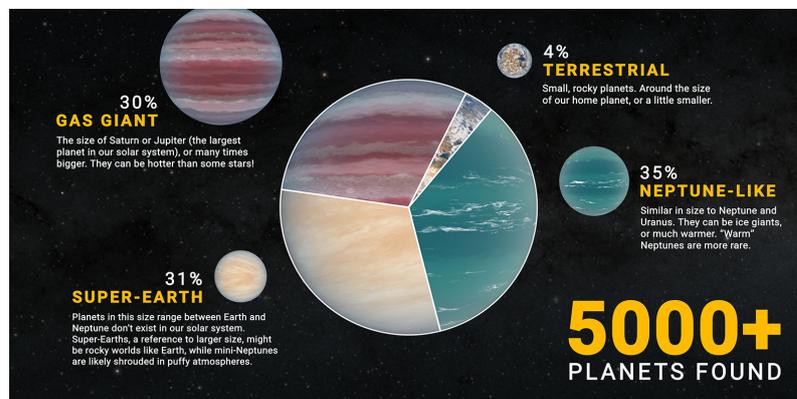


Figura 2.3: Popolazione esoplanetaria [NASA]

## Appendice A

# K2-18b, un possibile mondo Hycean

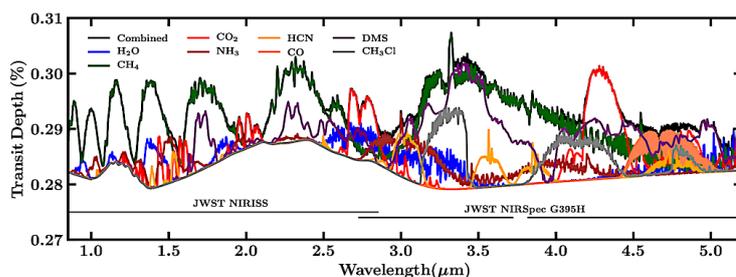
La ricerca di vita nell'Universo ci ha condotto negli ultimi decenni a studiare esopianeti con atmosfere estremamente diversificate. In particolare, K2-18b è un esopianeta che orbita attorno alla nana rossa (M3) moderatamente attiva K2-18 che si trova a circa 124 ly dalla Terra.

K2-18b potrebbe far parte di una classe di esopianeti abitabili recentemente proposta, gli Hycean Worlds. Questi pianeti, il cui nome è composto dalle parole Hydrogen+Ocean, sono dei sub-Nettuniani ricoperti da un oceano di acqua globale che si trova sotto un'atmosfera ricca di  $H_2$ . La predominanza di esopianeti sub-Nettuniani nella popolazione esoplanetaria potrebbe implicare la potenziale abbondanza di esopianeti Hycean. In questo tipo di mondi il grande ammontare di contenuto volatile al loro interno consegue una minore densità e, dunque, un raggio maggiore e una gravità minore rispetto a un pianeta roccioso di massa comparabile. Inoltre, la ridotta gravità e il basso peso molecolare medio dell'atmosfera fanno sì che risulti un'altezza di scala atmosferica maggiore per una data temperatura rispetto a esopianeti rocciosi, che hanno atmosfere con alto peso molecolare medio. Sono questi i fattori che rendono la caratterizzazione atmosferica degli Hycean Worlds facilmente accessibile.

K2-18b ha una massa di  $8.63 \pm 1.35 M_{\oplus}$ , un raggio di  $2.61 \pm 0.09 R_{\oplus}$  e una temperatura di equilibrio di circa 250-300 K per un albedo tra 0 e 0.3.

Lo spettro di questo esopianeta è stato osservato grazie al metodo del transito, con l'utilizzo di NIRISS e NIRSpec, strumenti che si trovano sul JWST che osservano nel range di 0.8-5.2 micrometri (Near Infra Red).

Dallo spettro osservato in trasmissione dal JWST si possono ricavare le proprietà atmosferiche di K2-18b nella regione crepuscolare. Si utilizza per lo studio dell'atmosfera l'approssimazione di atmosfera a piani paralleli in equilibrio idrostatico con una composizione chimica uniforme.



**Figura A.1:** Spettro di K2-18b con le componenti chimiche [NIRSpec]

Quello che risulta sono forti contributi spettrali di molecole CNO, tra cui  $CH_4$  e  $CO_2$  in un'atm ricca di  $H_2$ . Non sono stati rilevati contributi significativi causati da  $H_2O$  o  $NH_3$ , anche se il vapore acqueo può essere molto abbondante a livelli più profondi dell'atmosfera. Inoltre, sono stati rilevati dei promettenti biomarker, tra cui DMS (dimetilsolfuro) e  $CH_3Cl$ .

Dalle osservazioni risultano anche la possibile presenza di nubi ed evidenze di scattering dovuto alle nebbie nella regione crepuscolare dell'atmosfera. Questo rafforza così la tesi che K2-18b sia un Hycean World, sebbene sia comunque necessaria una sottile atmosfera di  $H_2$  per mantenere la temperatura abbastanza bassa per non far evaporare l'oceano liquido a causa dell'effetto serra.

# Bibliografia

Testi L. e Maestri T., appunti e dispense del corso *Atmosfere planetarie*, AA 2022/2023

Cimatti A., appunti e dispense del corso *Astronomia*, AA 2020/2021

Orosei R., appunti e dispense del corso *Introduzione all'astrobiologia Modulo 2*, AA 2022/2023

Madhusudhan N., Sarkar S., Constantinou S., Holmberg M., Piette A. and Moses J.I., *Carbon-bearing Molecules in a Possible Hycean Atmosphere*, <https://arxiv.org/abs/2309.05566>  
Settembre 2023

Cenadelli D., 2. *I pianeti: nel Sistema Solare e oltre, Alle frontiere del cosmo*,  
Ottobre 2020

Balbi A., <https://www.youtube.com/watch?v=XeUxCRowxDE>