

**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:  
**Lugli Federica**

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

---

Appello III  
Anno Accademico 2023-2024



*“Al futuro che  
mi aspetta”*



## Abstract

*The Earth is the only world known so far to harbor life. There is nowhere else, at least in the near future, to which our species could migrate. Visit, yes. Settle, not yet. Like it or not, for the moment the Earth is where we make our stand.*  
(Carl Sagan, 'Pale Blue Dot: A vision of the human future in space', 1994)

In questo elaborato si vuole trattare di un minimo, bensì fondamentale, costituente della totalità di materia ordinaria nell'Universo, ovvero i pianeti del Sistema Solare. Una breve introduzione, volta a contestualizzare il sistema planetario in questione, aprirà lo spazio alla trattazione più dettagliata dei pianeti stessi. Descrivendone le principali caratteristiche fisiche, si metterà in evidenza la distinzione fra i pianeti terrestri, tra cui rientra il nostro "tenue pallino blu", e i pianeti giganti, arrivando ad una panoramica sulle atmosfere planetarie. Si concluderà infine con la discussione di un settore di recente sviluppo, la ricerca di esopianeti. Tramite metodi di osservazione diretti e soprattutto indiretti, i quali verranno accuratamente esposti, è possibile difatti scoprire nuovi sistemi planetari che possano potenzialmente ospitare la vita, e continuare, quindi, a cercare una risposta ad una delle questioni più dibattute di sempre: *Siamo soli nell'universo?*

# Indice

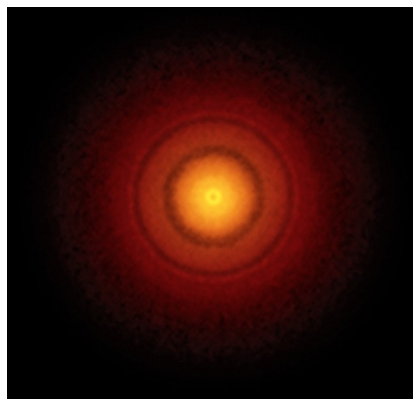
<b>1</b>	<b>Introduzione al Sistema Solare</b>	<b>1</b>
1.1	Formazione . . . . .	1
1.2	I corpi del Sistema Solare . . . . .	2
1.2.1	Equilibrio idrostatico . . . . .	2
<b>2</b>	<b>I pianeti del Sistema Solare</b>	<b>3</b>
2.1	Pianeti terrestri . . . . .	3
2.2	Pianeti giganti . . . . .	5
2.3	Atmosfere planetarie . . . . .	7
2.3.1	Meccanismi di perdita . . . . .	8
2.3.2	Temperatura di equilibrio ed effetto serra . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Ricerca di pianeti esterni</b>	<b>11</b>
3.1	Pulsar timing . . . . .	11
3.2	Velocità radiale . . . . .	11
3.3	Astrometria . . . . .	12
3.4	Transiti . . . . .	12
3.5	Microlensing gravitazionale . . . . .	13
3.6	Imaging diretto . . . . .	13
3.7	Popolazioni di esopianeti . . . . .	14
3.7.1	Zona abitabile e ricerca della vita . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>16</b>

# 1 Introduzione al Sistema Solare

Per poter comprendere al meglio in quali condizioni abbia avuto origine e si sia sviluppata la vita sulla Terra, al fine di portarne avanti la ricerca verso nuovi pianeti esterni, risulta di fondamentale importanza una buona teoria sulla formazione del Sistema Solare. Tale teoria deve tenere in considerazione l'attuale struttura del nostro sistema planetario, fornendo dunque una buona spiegazione alle evidenze osservative.

## 1.1 Formazione

L'origine del Sistema Solare rappresenta una questione ancora aperta ed ampiamente discussa, tuttavia, tra i vari modelli di formazione proposti, il più accreditato risulta essere quello ipotizzato da Kant e Laplace. Secondo tale ipotesi, detta *Nebular Hypothesis*, la formazione del Sistema Solare, avvenuta circa 4.6 miliardi di anni fa, è dovuta al collasso di parte di una nube molecolare gigante (GMC). Le nubi molecolari, ampiamente presenti nella nostra galassia, sono le regioni più fredde e dense del mezzo interstellare e sono generalmente stabili rispetto al collasso, tuttavia è possibile che, nel caso in questione, l'innescò sia stato causato dall'onda d'urto di una supernova esplosa nelle vicinanze. La durata della fase di caduta è comparabile al tempo di caduta libera del nucleo, ovvero circa  $10^5$ - $10^6$  anni, durante i quali avviene la formazione della *nebulosa solare primitiva*, costituita dalla protostella, formata dalla caduta di gas e polvere verso il centro della nube, insieme al suo disco protoplanetario (*Figura 1*), una struttura rotante che si forma attorno alla giovane stella a causa della conservazione del momento angolare.



**Figura 1:** Immagine di ALMA del disco protoplanetario attorno alla giovane stella TW Hydrae. [Credit: S. Andrews (Harvard-Smithsonian CfA); B. Saxton (NRAO/AUI/NSF); ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)]

Nella fase successiva avviene una redistribuzione del momento angolare, che viene trasportato dal Sole verso il disco protoplanetario tramite diversi meccanismi, quali ad esempio l'azione di forze magnetiche e viscosive; questo fenomeno andrebbe quindi a spiegare il motivo per cui più del 98% del momento angolare del Sistema Solare risiede attualmente nelle orbite planetarie (a differenza della massa). In seguito, raggiunte le temperature necessarie per l'innescò delle reazioni termonucleari nel nucleo del Sole (fase T Tauri), un forte vento solare non solo trasporta ancora più momento verso l'esterno, bensì rimuove anche gas e polveri restanti nello spazio interplanetario,

ponendo fine al processo di formazione planetaria. Secondo il *core-accretion model*, teorizzato da Safronov e Hayashi, la formazione dei pianeti è avvenuta tramite il meccanismo dell'accrescimento collisionale di piccoli grani di polvere presenti nel disco in fase di raffreddamento, che ha portato alla nascita di planetesimi, di diametro fino a qualche chilometro. Dall'accrescimento di questi planetesimi, mediante mutue interazioni gravitazionali e collisioni, si arriva quindi alla formazione di embrioni planetari (o protopianeti). La rapida crescita di un embrione planetario, che termina una volta assimilati tutti i planetesimi nel suo campo gravitazionale, porta infine alla formazione di un pianeta. Le due tipologie di pianeti che risultano da tale processo, terrestri e gioviani, presentano composizioni chimiche alquanto differenti date da una formazione avvenuta o meno all'interno della *frostline*; questa linea viene definita come la distanza dal Sole oltre la quale la temperatura è sufficientemente bassa da permettere ai composti dell'idrogeno di condensare.

## 1.2 I corpi del Sistema Solare

Con la scoperta di Eris nel 2005, un oggetto situato nella fascia di Kuiper, all'interno della regione transnettuniana (TNO), e più massivo di Plutone, considerato dalla sua scoperta il nono pianeta, è sorta la necessità di chiarire che cosa fosse un pianeta. Nel 2006, l'Unione Astronomica Internazionale (IAU) ha quindi deciso di adottare la seguente definizione di pianeta. Un **pianeta** è un corpo celeste che:

- è in orbita attorno al Sole;
- ha massa sufficiente affinché la sua gravità prevalga sulle forze di corpo rigido, così da assumere una forma di *equilibrio idrostatico* (quasi sferica);
- ha ripulito lo spazio intorno alla sua orbita.

Secondo questa definizione, i pianeti del Sistema Solare sono quindi otto: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno.

Un corpo che non soddisfa la terza condizione viene considerato un *pianeta nano*, categoria nella quale rientrano attualmente Plutone, Cerere, Eris, Haumea, Makemake. Un corpo che invece non soddisfa la prima condizione è detto *satellite*. Tutti gli oggetti che non rientrano in alcuna definizione precedente, ma si trovano comunque in orbita attorno al Sole, costituiscono i *corpi minori* del Sistema Solare. Tra questi si distinguono asteroidi (la maggior parte dei quali situati nella fascia asteroidale principale), comete, meteore, oggetti della fascia di Kuiper (KBOs), della nube di Oort e del disco diffuso (SDOs).

### 1.2.1 Equilibrio idrostatico

La struttura di un corpo planetario o di una stella è governata su larga scala da un bilanciamento tra due forze, gravità e pressione, espresso dalla condizione di equilibrio idrostatico, necessaria per la definizione stessa di pianeta. Analizzando quindi le forze agenti su una porzione di volume di spessore  $\Delta z$ , si ha:

$$F_{down} = \rho V g = \rho \Delta z A g \quad (1)$$



ovvero la forza gravitazionale esercitata sul volume sottostante, con  $\Delta z$  positivo. Per il gradiente di pressione, diretto verso l'alto, si ha invece:

$$F_{up} = [p(z + dz) - p(z)]A = \Delta p A \quad (2)$$

dove  $\Delta p$  è negativo. Eguagliando le due forze si ottiene:

$$-\Delta p = \rho g \Delta z \quad (3)$$

da cui si ricava l'equazione dell'equilibrio idrostatico in forma differenziale:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho(z)g(z) \quad (4)$$

## 2 I pianeti del Sistema Solare

Un'accurata descrizione del Sistema Solare prevede una trattazione quanto più dettagliata dei suoi costituenti primari, gli otto pianeti. In seguito all'introduzione del concetto di pianeta, si può infatti proseguire con una panoramica sulle proprietà fisiche principali di ciascuno di essi, che dovrà svolgersi a partire dal distinto processo di formazione che ne caratterizza le due categorie, terrestri e giganti.

### 2.1 Pianeti terrestri

La formazione dei pianeti terrestri, come accennato nel capitolo precedente, è avvenuta all'interno della frostline. In questa regione, infatti, le temperature risultavano troppo elevate per permettere ai composti dell'idrogeno, quali acqua e metano, di condensare, i quali restavano quindi in fase gassosa. I materiali più pesanti, rocciosi e metallici, sono invece più adatti a condensare ad alte temperature, motivo per cui questi pianeti interni sono composti quasi interamente da materiali ferrosi e silicati. Da questo processo di condensazione di elementi pesanti e minerali, hanno origine planetesimi rocciosi che, orbitando intorno al Sole alla stessa velocità, collidono fra di loro e accrescono massa, fino a raggiungere la dimensione degli attuali pianeti terrestri.

Si riportano di seguito, in *Tabella 1*, alcuni dati fondamentali sulle caratteristiche dei singoli pianeti, al fine di introdurne una successiva trattazione più dettagliata.

	<b>Mercurio</b>	<b>Venere</b>	<b>Terra</b>	<b>Marte</b>
Distanza dal Sole ( <i>AU</i> )	0.39	0.72	1	1.52
Raggio equatoriale ( <i>km</i> )	2440	6052	6378	3396
Gravità superficiale ( <i>m/s<sup>2</sup></i> )	3.70	8.87	9.81	3.73
Massa ( <i>10<sup>24</sup>kg</i> )	0.33	4.87	5.97	0.64
Densità media ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )	5430	5243	5513	3934
Periodo orbitale ( <i>giorni</i> )	87.97	224.70	365.26	686.98
Periodo di rotazione ( <i>ore</i> )	1407.6	-5832.6	23.93	24.62
Eccentricità	0.2	0.007	0.017	0.093

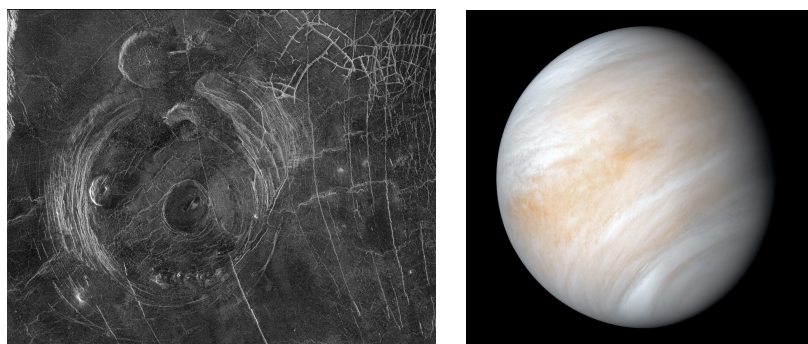
**Tabella 1:** Principali parametri fisici e orbitali dei quattro pianeti terrestri a confronto.

## Mercurio

Mercurio è il pianeta più interno del Sistema Solare. La sua superficie risulta molto simile a quella della Luna, in quanto il principale tratto morfologico su entrambi i corpi sono i *crateri da impatto*, seppur di diversa conformazione. Questa superficie fortemente craterizzata è intervallata da pianure intercrateriche, più antiche delle cosiddette pianure lisce, di probabile origine vulcanica. La caratteristica più estesa osservata su Mercurio è il *bacino Caloris*, di 1550 km di diametro. Il pianeta presenta inoltre delle scarpate lobate sulla sua superficie, segno più prominente di attività tettonica, e le tracce di vulcanismo, seppur presenti, sono risalenti ad un'epoca passata. Data l'elevata densità, il 60% della sua massa consiste di ferro e i modelli indicano che tale nucleo si estenda fino al 75% del raggio del pianeta. In merito all'atmosfera, è composta principalmente da ossigeno, sodio ed elio, ma è estremamente tenue, il che dà origine ad una forte escursione termica tra il giorno e la notte. Il campo magnetico è molto debole.

## Venere

Venere è l'oggetto più luminoso nel cielo, dopo il Sole e la Luna. In percentuale, circa il 70% della superficie consiste di pianure, il 20% di bassopiani e una piccola frazione di quattro altopiani. Questi altopiani hanno dimensioni continentali, sono di origine vulcanica e si elevano rispetto al livello medio superficiale di 3-5 km. Il continente più largo, *Aphrodite Terra*, è situato vicino all'equatore mentre nel continente settentrionale, *Ishtar Terra*, si trovano i principali rilievi montuosi, tra cui la montagna più alta di Venere, Maxwell Montes. Le caratteristiche più importanti sono sicuramente quelle vulcaniche, presenti su tutta la superficie; Venere, infatti, è il pianeta con più vulcani di tutto il Sistema Solare. Le *formazioni vulcaniche* conosciute sono molteplici, tra cui vulcani a scudo, canali scavati dal flusso di lava, cupole a forma di pancake (pancake-like domes) e coronae (strutture circolari o ovali situate all'interno di pianure vulcaniche). La maggior parte dei crateri da impatto, di diametri non inferiori a qualche chilometro, non presenta alcuna deformazione, segno che la superficie venusiana deve essere giovane (e che potrebbe aver sperimentato un evento di *catastrophic resurfacing*). Avendo dimensioni simili alla Terra, si presume che anche le due strutture interne presentino delle somiglianze. L'atmosfera, invece, composta principalmente da anidride carbonica, presenta un forte *effetto serra*; si osserva inoltre che lo spesso strato di nubi nell'atmosfera, composto da acido solforico, è in superrotazione rispetto al pianeta. Il campo magnetico è indotto dal vento solare.



**Figura 2:** La corona Aine e alcuni pancake domes sulla superficie di Venere, come visti dalla sonda Magellano, e un'immagine dell'atmosfera venusiana avvolta nelle nubi catturata da Mariner 10. [Credit: NASA/JPL]

## Terra

La Terra è un pianeta unico, in quanto è il solo, attualmente conosciuto, ad ospitare la vita. La maggior parte della superficie è ricoperta di *acqua*, caratteristica peculiare appartenente solo a questo pianeta. Ciò risulta possibile in quanto la temperatura è al di sopra del punto di congelamento e al di sotto del punto di ebollizione dell'acqua. Altro tratto distintivo della Terra è la presenza di un'attività tettonica su così larga scala, non presente invece negli altri pianeti terrestri. Le montagne sono infatti il risultato dello scontro fra due *placche tettoniche*, i costituenti fondamentali in cui è suddiviso lo strato terrestre più esterno, la litosfera. La litosfera è composta dalla crosta e dalla parte superiore del mantello. Proseguendo verso l'interno del pianeta, si trovano la parte inferiore del mantello e il nucleo, diviso in due strati, esterno ed interno. Il nucleo esterno comprende il 31% della massa della Terra ed è uno strato caldo, elettricamente conduttivo di ferro e nichel liquidi, all'interno del quale avvengono i moti convettivi responsabili del campo magnetico terrestre. L'atmosfera terrestre, composta principalmente da azoto e ossigeno, è l'unica ad essere caratterizzata dalla presenza di uno *strato di ozono*, ad un'altezza di circa 20-25 km, fondamentale per il suo ruolo protettivo contro la radiazione UV. La Terra ha un solo satellite, la Luna.

## Marte

Marte, detto *pianeta rosso* a causa della grande quantità di ossido di ferro presente nel suolo, è il pianeta più esterno tra i pianeti terrestri. La struttura interna è simile agli altri pianeti terrestri, se non per la possibile presenza di zolfo nel nucleo. Un'importante caratterizzazione geologica del pianeta è la *dicotomia* tra l'emisfero settentrionale e quello meridionale, il primo, più giovane, coperto in prevalenza da pianure, e il secondo fortemente craterizzato, nonché maggiormente elevato rispetto alla superficie. Il *bacino Hellas*, nell'emisfero australe, è una delle strutture da impatto più grandi del Sistema Solare. Nella *regione Tharsis*, nell'emisfero boreale, sono invece situati quattro enormi vulcani a scudo, incluso *Olympus Mons*, il vulcano più alto e largo del Sistema Solare, con una base di 600 km e un'elevazione di 26 km. Nei pressi dell'equatore si trova invece *Valles Marineris*, un sistema di canyon di origine tettonica, che si estende per 4000 km. Si identificano anche diverse caratteristiche fluviali, quali canali di flusso, che sono tra gli elementi che hanno portato a ipotizzare la presenza di acqua, in passato, sul suolo di Marte. Tuttavia, date le attuali condizioni climatiche, l'acqua liquida non può esistere su Marte, bensì solo sotto forma di vapore o ghiaccio, come ad esempio all'interno delle calotte polari, composte sia di acqua che di anidride carbonica, componente principale della secca atmosfera marziana. Occasionalmente, forti venti generano grandi tempeste di sabbia. Marte ha due satelliti, Phobos e Deimos.

## 2.2 Pianeti giganti

La teoria di formazione dei pianeti giganti favorita dalla maggior parte dei ricercatori è attualmente la *core nucleated accretion model*, secondo la quale la fase iniziale di crescita del pianeta riprende quella di un pianeta terrestre, ma una volta raggiunta una massa sufficiente (diverse masse terrestri) è capace di accumulare quantità sostanziali di gas dal disco protoplanetario circostante. Ricordando inoltre che tale formazione è avvenuta oltre la frostline, dove le temperature erano abbastanza fredde da permettere ai composti dell'idrogeno di condensare, risulta logica la minor quantità di rocce e

metalli presenti nei suddetti pianeti. La differenziazione tra *giganti gassosi* e *giganti ghiacciati* è probabilmente dovuta alla differenza di massa tra i due gruppi, in quanto pianeti più massivi preservano più elementi volatili grazie alla presenza di campi gravitazionali maggiori.

Come per i pianeti terrestri, si riportano in *Tabella 2* alcuni dati introduttivi sui pianeti in questione, ai quali seguiranno le singole descrizioni.

	<b>Giove</b>	<b>Saturno</b>	<b>Urano</b>	<b>Nettuno</b>
Distanza dal Sole ( <i>AU</i> )	5.20	9.54	19.20	30.06
Raggio equatoriale ( <i>km</i> )	71 492	60 268	25 559	24 764
Gravità superficiale ( <i>m/s<sup>2</sup></i> )	25.92	11.19	9.01	11.27
Massa ( $10^{24}$ <i>kg</i> )	1898.13	568.32	86.81	102.41
Densità media ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )	1326	687	1270	1638
Periodo orbitale ( <i>giorni</i> )	4332.59	10 755.70	30 685.40	60 189.02
Periodo di rotazione ( <i>ore</i> )	9.92	10.66	-17.24	16.11
Eccentricità	0.0487	0.0520	0.0469	0.0097

**Tabella 2:** Principali parametri fisici e orbitali dei quattro pianeti giganti a confronto.

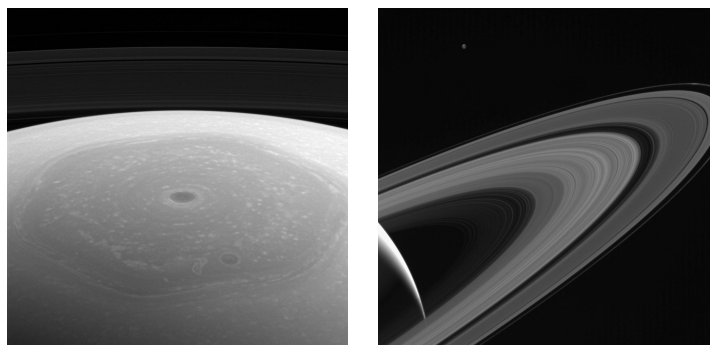
## Giove

Giove è il primo, nonché più grande, pianeta gigante. Le osservazioni rivelano una struttura atmosferica in cui si alternano *bande* scure e *zone* chiare, che costituiscono formazioni stabili di nubi (parallele all'equatore). Il gas all'interno di una banda si muove verso il basso, mentre si sposta verso l'alto nelle zone, dando origine a un semplice modello di convezione, che è alla base del gradiente di temperatura fra le due regioni (le zone sono più fredde delle bande). Il dettaglio più famoso di Giove è sicuramente il *Great Red Spot (GRS)*, largo circa 16 000 km. Immediatamente a sud si possono individuare anche tre larghi *ovali* bianchi, e, nella Banda Sud Equatoriale, se ne individua un'altra serie di dimensioni inferiori. Tutte queste caratteristiche nell'atmosfera di Giove rappresentano enormi sistemi di tempeste; la circolazione in quasi tutti questi vortici avviene in senso orario nell'emisfero settentrionale e antiorario in quello meridionale (dove si trova il GRS), indicativo di sistemi ad alta pressione. Mentre l'atmosfera è composta principalmente da idrogeno molecolare ed elio, i modelli indicano che in profondità all'interno di Giove esista uno strato di idrogeno metallico che circonda il nucleo, da cui ha probabilmente origine l'enorme campo magnetico gioviano. Gli unici grandi impatti a cui l'umanità ha assistito direttamente sono quelli tra Giove e i frammenti della cometa Shoemaker-Levy 9. Il pianeta possiede inoltre un sistema di anelli, seppur estremamente tenue, e ha 95 satelliti, i maggiori quattro denominati satelliti galileiani (*Io, Ganimede, Europa, Callisto*).

## Saturno

Saturno è il secondo pianeta più grande, nonché il meno denso di tutti. La struttura interna è molto simile a quella di Giove, ma a causa delle sue dimensioni inferiori lo strato di idrogeno metallico è meno spesso, probabile motivo per cui il campo magnetico è più debole. Diverse similitudini si riscontrano anche tra le due atmosfere, sia nella composizione, dove prevalgono idrogeno ed elio, che nella conformazione. Si possono infatti individuare strati di nubi (di composizione simile a quelle su Giove), come pure strutture a bande turbolente, dove si verificano occasionalmente violente tempeste e

soffiano venti fortissimi, con velocità di 500 m/s, vicino all'equatore. Un aspetto interessante del pianeta riguarda i suoi poli, entrambi caratterizzati da un vortice gigante; in particolare, quello attorno al polo nord ha una forma esagonale, mentre quello al polo sud somiglia a un uragano. La caratteristica più affascinante sono indubbiamente gli *anelli di Saturno*. Questo sistema di anelli, composto prevalentemente di ghiaccio, è infatti il più massivo, luminoso, nonché esteso del Sistema Solare. È suddiviso in tre parti principali, denominate *A, B, C*; questi tre sono conosciuti come gli anelli principali di Saturno. Esistono inoltre anelli più tenui, denominati *D, F, G, E*. Saturno ha 146 satelliti, Titano il più grande di questi.



**Figura 3:** Immagini ottenute dalla sonda Cassini del polo nord (in prossimità del solstizio d'estate settentrionale) e del sistema di anelli, insieme alla luna Tethys, di Saturno. [Credit: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute]

## Urano e Nettuno

Urano e Nettuno sono i pianeti più esterni, nonché più freddi, del Sistema Solare. Nessuno dei due possiede una vera propria superficie e le composizioni atmosferiche sono simili, con prevalenza di idrogeno, elio e metano, quest'ultimo responsabile del loro caratteristico colore blu. Sono inoltre presenti nubi di metano ghiacciato su Nettuno, sospinte dai venti più forti in tutto il Sistema Solare, e acido solfidrico su Urano. La maggior parte della massa di questi pianeti è formata da un fluido caldo e denso di materiali ghiacciati (acqua, metano e ammoniaca), che racchiude un nucleo solido roccioso. Caratteristica peculiare di entrambi è l'inclinazione del campo magnetico rispetto all'asse di rotazione del pianeta, per Urano, di quasi  $60^\circ$  e per Nettuno di circa  $47^\circ$ . Come gli altri pianeti giganti, anch'essi possiedono dei sistemi di anelli. In particolare, le particelle che compongono gli anelli di Urano sono estremamente scure. Hanno rispettivamente 28 e 16 satelliti naturali, Titania e Tritone i più grandi.

## 2.3 Atmosfere planetarie

Nella sezione precedente è stato brevemente affrontato il tema della formazione di pianeti terrestri e giganti, senza tuttavia entrare nel merito della formazione delle rispettive atmosfere. È infatti importante fare una distinzione tra atmosfere *primarie* e *secondarie*, a seconda che il processo sia avvenuto contemporaneamente alla formazione del pianeta stesso o che tale atmosfera sia il risultato di una successiva evoluzione planetaria. Le cosiddette atmosfere primordiali appartengono ai pianeti giganti, i quali presentano una composizione indubbiamente simile a quella della nebulosa primordiale, grazie alla loro capacità di accrescere elementi volatili quali elio e idrogeno. Le atmosfere dei pianeti terrestri, tuttavia, non possono essere resti di una originaria atmosfera

primaria, bensì devono essere secondarie, data la forte mancanza di gas nobili al loro interno. Un'atmosfera secondaria può essere il prodotto di diversi meccanismi di perdita atmosferica, i quali verranno descritti più in dettaglio nella sezione successiva. Lo studio delle atmosfere planetarie, e dei processi che ne hanno determinato la conformazione attuale, è infatti fondamentale, in quanto può fornire una maggiore conoscenza sulle condizioni necessarie allo sviluppo della vita su un pianeta.

### 2.3.1 Meccanismi di perdita

Una particella può sfuggire all'atmosfera di un corpo se la sua energia cinetica eccede l'energia di legame gravitazionale e si muove, verso l'alto, lungo una traiettoria che non interseca il cammino di un altro atomo o molecola. La regione in cui ha luogo questo processo è detta *esosfera* e il suo limite inferiore è chiamato *esobase*. Nell'atmosfera terrestre, le molecole mostrano traiettorie balistiche ad altitudini superiori ai 500 km, dove la densità è più bassa e le temperature sono generalmente intorno ai 500-1000 K. La *velocità di fuga*  $v_e$  deriva dall'uguaglianza della variazione di energia cinetica e potenziale gravitazionale della molecola:

$$\frac{1}{2}mv_e^2 - \frac{GM_p m}{r} = 0 \quad (5)$$

da cui si ottiene:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM_p}{r}} \quad (6)$$

Per la Terra tale valore è  $\approx 11 \text{ km/s}$ , mentre per un pianeta quale Giove è  $\approx 60 \text{ km/s}$ . Per un gas all'equilibrio termico, le velocità molecolari seguono la statistica di Maxwell-Boltzmann:

$$f(v)dv = N\left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{m}{kT}\right)^{\frac{3}{2}}v^2e^{-\frac{mv^2}{2kT}}dv \quad (7)$$

dove  $k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg deg}^{-1}$  è la costante di Boltzmann.

Sopra l'esobase, le collisioni sono sostanzialmente assenti, e le particelle nella coda della distribuzione Maxwelliana che hanno una velocità  $v > v_e$  possono fuggire nello spazio. Una distribuzione di questo tipo si estende generalmente fino a velocità infinite, tuttavia non ci sono praticamente particelle con velocità superiori a circa quattro volte la *velocità più probabile*:

$$v_o = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (8)$$

Il rapporto tra l'energia potenziale e quella cinetica è detto *parametro di fuga*:

$$\lambda_{esc} = \frac{GMm}{kTr} = \left(\frac{v_e}{v_o}\right)^2 \quad (9)$$

Integrando il flusso verso l'alto in una distribuzione di velocità Maxwelliana sopra l'esobase, si ottiene la *formula di Jeans* per il rate di fuga (atoms  $m^{-2} s^{-1}$ ) tramite evaporazione termica:

$$\phi_J = \frac{N_{ex}v_o}{2\sqrt{\pi}}(1 + \lambda_{esc})e^{-\lambda_{esc}} \quad (10)$$

Il meccanismo di **fuga di Jeans** spiega quindi le abbondanze relative di alcuni elementi nell'atmosfera terrestre. Infatti, per l'idrogeno atomico, la frazione di molecole con

velocità superiori a quella di fuga è sensibile, portando quindi a una perdita consistente di atomi di idrogeno in tempi brevi, motivo per cui l'atmosfera ne è così povera.

Per l'ossigeno atomico, la probabilità di fuga è invece estremamente bassa.

Tale meccanismo non è tuttavia in grado di spiegare la perdita di gas pesanti, quali ad esempio l'Argon, motivo per cui è necessario prendere in considerazione un altro modello di perdita atmosferica, ovvero la **fuga idrodinamica**; questa fuga avviene quando il flusso di atomi leggeri è elevato e, di conseguenza, anche atomi più pesanti possono essere trascinati via dall'atmosfera. È importante sottolineare che questo processo richiede un grande input energetico nella parte più alta dell'atmosfera. I due processi di fuga appena descritti sono di tipo termico, ma spesso sono i processi non termici a dominare il rate di fuga atmosferica. Si elencano perciò di seguito alcuni esempi di meccanismi di questo tipo:

- **erosione da impatto**, in quanto se le dimensioni dell'oggetto impattante sono considerevoli, è possibile che una parte di atmosfera venga spazzata via (è possibile inoltre che aggiunga volatili al pianeta);
- fenomeno di **outgassing**, di cui un chiaro esempio è dato dalla sublimazione ed evaporazione delle calotte polari marziane, processi che sottraggono e rilasciano  $CO_2$  in atmosfera;
- reazioni **fotochimiche**, innescate dalla radiazione solare, e di scambio di carica;
- processo di **sputtering**, dove un atomo in atmosfera può guadagnare sufficiente energia per sfuggire all'attrazione gravitazionale del corpo se colpito da un atomo o ione veloce;

### 2.3.2 Temperatura di equilibrio ed effetto serra

Un fattore fondamentale per determinare l'abitabilità di un pianeta è sicuramente la temperatura. In particolare, è necessario distinguere tra *temperatura effettiva*  $T_e$  e *temperatura di equilibrio*  $T_{eq}$ . Quest'ultima, infatti, viene ricavata assumendo che il sistema pianeta-atmosfera sia in equilibrio termico, ovvero tramite un bilanciamento tra assorbimento della radiazione solare (shortwave, SW) e riemissione verso lo spazio di radiazione infrarossa (longwave, LW).

Il flusso netto assorbito dal sistema è dato da:

$$E^{in} = (1 - A_b)\pi R^2 \frac{L_{\odot}}{4\pi a^2} \quad (11)$$

Viene dunque introdotta la quantità  $A_b$ , ovvero l'*albedo sferico*, che rappresenta la frazione di radiazione riflessa o diffusa dall'oggetto rispetto alla luce totale incidente;  $\pi R^2$  è l'area superficiale proiettata per intercettare i fotoni solari e  $S_r = \frac{L_{\odot}}{4\pi a^2}$  corrisponde invece all'irradianza solare ad una distanza  $a$  dal Sole.

L'emissione nello spazio della radiazione del pianeta è descritta dalla legge di Stefan-Boltzmann. Assumendo che il pianeta si comporti come un corpo nero con temperatura  $T_{eq}$ , il flusso totale emesso è dato da:

$$E^{out} = 4\pi R^2 \epsilon \sigma T_{eq}^4 \quad (12)$$

dove  $\sigma = 5.67 \times 10^{-5} \text{erg cm}^{-2} \text{deg}^{-4} \text{s}^{-1}$  è la costante di Stefan-Boltzmann. Si utilizza in questo caso la quantità  $4\pi R^2$ , in quanto un pianeta che ruota velocemente irradia da tutta la sua superficie. Imponendo infine la condizione di equilibrio radiativo si ottiene la temperatura di equilibrio:

$$T_{eq} = \sqrt[4]{\frac{L_{\odot} (1 - A_b)}{a^2 4\epsilon\sigma}} \quad (13)$$

Si precisa inoltre che, essendo l'emissione termica dei pianeti principalmente nell'infrarosso, l'emissività  $\epsilon$  ha solitamente un valore prossimo all'unità.

Se la temperatura del corpo è determinata completamente dal flusso di radiazione solare incidente, la temperatura di equilibrio corrisponde a quella effettiva. Tuttavia, come si può notare di seguito in *Tabella 3*, sono presenti delle discrepanze tra alcuni valori. Queste discrepanze forniscono importanti informazioni sull'oggetto in questione.

	$A_b$	$T_{eq}(K)$	$T_e(K)$
<b>Mercurio</b>	0.07	440	440
<b>Venere</b>	0.77	227	737
<b>Terra</b>	0.29	254	288
<b>Marte</b>	0.25	210	210
<b>Giove</b>	0.34	110	163
<b>Saturno</b>	0.34	81	133
<b>Urano</b>	0.30	58	78
<b>Nettuno</b>	0.29	47	73
<b>Titano</b>	0.22	85	94

**Tabella 3:** Albedo sferico, temperatura di equilibrio, e temperatura effettiva dei pianeti del Sistema Solare e di un satellite di Saturno. I valori utilizzati per  $T_e$  sono riferiti alla temperatura media del pianeta.

In particolare, per pianeti quali Giove e Saturno, la temperatura effettiva più elevata rispetto a quella di equilibrio è attribuita ad una fonte interna di calore, in quanto entrambi emettono più energia di quella che ricevono dal Sole. Per ciò che riguarda invece la Terra, e soprattutto Venere, la differenza tra le due temperature è dovuta all'**effetto serra**. L'effetto serra è prodotto dal diverso modo in cui l'atmosfera processa i due tipi di radiazione,  $LW$  e  $SW$ , essendo quasi trasparente alla prima, bensì opaca alla seconda. Per questo motivo, la radiazione  $SW$  passa liberamente verso la superficie, dove può essere assorbita, mentre quella  $LW$  viene catturata dall'aria soprastante. L'energia assorbita in uno strato atmosferico viene poi riemessa, metà verso l'alto e metà verso il basso, e il processo si ripete, fino a quando la radiazione  $LW$  supera tutte le componenti atmosferiche assorbenti e viene irradiata nello spazio. Questo continuo assorbimento ed emissione nell'atmosfera intrappola la radiazione  $LW$  ed aumenta la temperatura superficiale, dando origine all'effetto serra naturale, la cui magnitudine è quantificabile grazie al seguente parametro:

$$G = \sigma(T_e^4 - T_{eq}^4) \quad (14)$$

detto *Parametro di Greenhouse*, che esprime il forzante radiativo atmosferico in  $W/m^2$ . Interessante è il caso di Titano, l'unico satellite del Sistema Solare con un'atmosfera densa e ricca di azoto, il cui riscaldamento per effetto serra (di 21 K) viene parzialmente compensato da un *anti effetto serra*, che invece lo raffredda (di 9 K).



# 3 Ricerca di pianeti esterni

Con l'inizio di questo ultimo capitolo si conclude ufficialmente la trattazione del Sistema Solare e dei suoi pianeti, in quanto l'attenzione vuole essere spostata verso nuovi sistemi planetari, molto più distanti e quindi molto più difficili da osservare, ma soprattutto potenziali candidati per la ricerca di vita extraterrestre. Per poter rilevare questi nuovi pianeti si ricorre prevalentemente a *metodi indiretti*, che consentono di trovare il pianeta osservandone l'influenza sulla luce proveniente dalla stella attorno alla quale orbita, tuttavia è possibile compiere anche *osservazioni dirette*.

## 3.1 Pulsar timing

I primi pianeti extrasolari sono stati scoperti in orbita attorno alla pulsar PSR B1257+12, grazie a questo metodo. Le pulsar (*pulsating star*) sono stelle di neutroni in rapida rotazione che emettono impulsi di radiazione (raggi X, onde radio) a intervalli regolari. In particolare, oggetti come le *pulsar millisecondo*, sono estremamente stabili, il che le rende comparabili ai migliori orologi atomici. Nonostante questa precisione nella periodicità degli impulsi, i moti di rotazione e rivoluzione terrestre sono causa di variazioni periodiche, che possono essere però calcolate e sottratte dai dati. Se nei dati ripuliti permane la presenza di queste variazioni, è possibile allora che la pulsar abbia dei compagni in orbita attorno ad essa. Questo metodo è così sensibile che permette di rilevare pianeti di dimensioni fino a un decimo della massa terrestre, tuttavia le pulsar restano oggetti celesti abbastanza rari e l'intensità della radiazione nelle loro prossimità rende tali pianeti (detti *pulsar planets*) indubbiamente non abitabili.

## 3.2 Velocità radiale

Il metodo della velocità radiali è stato uno dei metodi più di successo per rilevare pianeti in orbita attorno a stelle di sequenza principale (come il Sole). Se una stella ha un pianeta, o più, intorno ad essa, non è strettamente corretto dire che il pianeta orbita la suddetta stella, bensì entrambi orbitano un centro di massa comune. Tuttavia, data la differenza considerevole di dimensioni fra i due oggetti, questo centro di massa si trova all'interno della stella, ed è per questo che il pianeta viene maggiormente influenzato dalla sua gravità, motivo per cui è in orbita attorno ad essa e non viceversa. Il pianeta, nonostante ciò, possiede comunque una forza gravitazionale, la quale ha un effetto, seppur meno pronunciato rispetto a quello di cui risente, sulla stella. Tale effetto può essere rilevato grazie alla spettroscopia, ovvero tramite il *Doppler shift*; se la stella si muove verso l'osservatore, la sua luce apparirà spostata verso il blu (blueshift), mentre se si allontana, verso il rosso (redshift).

L'ampiezza delle variazioni nella velocità radiale di una stella di massa  $M_*$ , indotte da un pianeta orbitante di massa  $M_p$ , è data da:

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P_{orb}}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_p \sin(i)}{(M_* + M_p)^{\frac{2}{3}}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}} = \left(\frac{G}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{M_p \sin(i)}{(M_* + M_p)^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (15)$$

dove  $P_{orb}$  è il periodo orbitale,  $i$  è l'angolo tra la normale al piano orbitale e la linea di vista,  $e$  è l'eccentricità dell'orbita e  $a$  il semiasse maggiore.

Chiaramente questo metodo risulta più sensibile a pianeti massivi, in quanto più grande è il pianeta, maggiore sarà l'effetto sulla stella compagna, e con periodi orbitali corti (quindi molto vicini alla loro stella).

### 3.3 Astrometria

Nella descrizione del metodo della velocità radiale, si è trattato della reciproca influenza gravitazionale di cui risentono sia il pianeta che la sua stella compagna, seppur in misura diversa. Quella piccola oscillazione di cui risente la stella a causa della gravità del pianeta, è stata prima individuata grazie al Doppler shift, ma è possibile farlo anche tramite una tecnica astrometrica. Questo metodo prevede di realizzare misure precise della posizione della stella nel tempo. Per seguire i movimenti della stella, vengono utilizzate una serie di immagini di una stella e di alcune altre vicine ad essa nel cielo; in ogni immagine, si comparano le distanze tra queste stelle di riferimento e quella di interesse. Se la stella in questione si è mossa rispetto alle altre, quel movimento può essere analizzato per la possibile presenza di esopianeti.

L'ampiezza dell'oscillazione è data dalla seguente formula:

$$\Delta\theta \leq \frac{M_p a}{M_* r_\odot} \quad (16)$$

dove  $r_\odot$  è la distanza della stella dal Sistema Solare e  $a$  il semiasse maggiore dell'orbita. Questo metodo è particolarmente adatto per rilevare pianeti massivi con orbite ampie (più distanti), ma richiede comunque un'ottica molto precisa e la presenza dell'atmosfera rende più complesse le osservazioni dalla Terra.

### 3.4 Transiti

Un transito avviene quando un pianeta passa direttamente tra la stella attorno alla quale orbita e l'osservatore sulla Terra. Per poter osservare un transito, la normale dell'orbita deve essere quasi  $90^\circ$  dalla linea di vista:

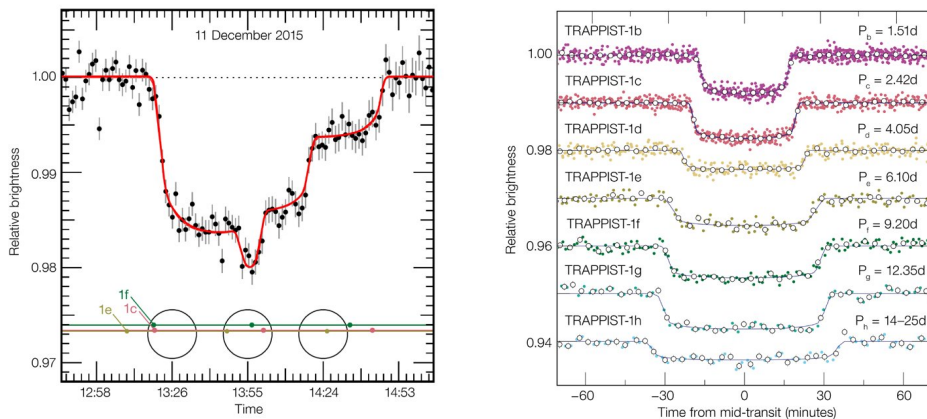
$$\cos(i) < \frac{R_* + R_p}{r} \quad (17)$$

dove  $r$  è la distanza tra la stella e il pianeta quando quest'ultimo è il più vicino possibile all'osservatore.

Durante un transito, il pianeta blocca parte della luce proveniente dalla stella, che, per un breve periodo di tempo, appare meno luminosa. Questa occultazione può essere osservata nelle *curve di luce*, grafici che mostrano l'andamento della luminosità della stella in funzione del tempo; trascurando variazioni di luminosità nel disco stellare, la profondità di un transito, ovvero la diminuzione frazionaria nel flusso osservato della luce della stella è dato da:

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (18)$$

La dimensione e la lunghezza di un transito possono fornire diverse informazioni sul pianeta. In particolare, più il pianeta è massivo, maggiore sarà la profondità del transito, in quanto può bloccare più luce; inoltre, più lunga è la durata di un evento di transito, maggiore sarà la distanza dalla sua stella (il periodo orbitale aumenta).



**Figura 4:** Osservazioni con, rispettivamente, i telescopi VLT e Spitzer, della curva di luce della nana rossa ultrafredda TRAPPIST-1. Il primo grafico riporta l'andamento della luminosità della stella in presenza di un triplo transito, mentre nel secondo se ne vuole mostrare la progressiva diminuzione al passaggio di ciascuno dei sette pianeti appartenenti a questo sistema. [Credit: ESO/M. Gillon et al.]

Il metodo del transito è in grado di fornire informazioni anche relative alla composizione atmosferica dell'esopianeta o alla sua temperatura, elementi di grande importanza per determinarne o meno l'abitabilità.

### 3.5 Microlensing gravitazionale

Il metodo del microlensing gravitazionale si basa sulla teoria della relatività generale di Einstein, secondo la quale oggetti massivi possono deformare il tessuto spazio-temporale. Questo effetto è il motivo per cui la luce viene distorta e cambia direzione se influenzata dalla gravità di una stella o di un pianeta. Il fenomeno del microlensing avviene quando la luce di una stella distante (sorgente), prima di giungere all'osservatore, viene distorta e amplificata dalla presenza di un oggetto posto fra i due. Questo oggetto, generalmente un'altra stella, funge da *lente* e, nel caso ospitasse uno o più esopianeti, questi si manifesterebbero come brevi impulsi nella curva di luce osservata della stella sorgente. Questi eventi di microlensing possono essere osservati solo in presenza di un buon allineamento tra sorgente, lente e osservatore, che è il motivo per cui la luce della sorgente, curvata dalla presenza della lente, crea una struttura ad anello intorno ad essa detta *anello di Einstein*. In condizioni favorevoli, questo metodo consente di rilevare pianeti piccoli come quelli terrestri, di identificare anche sistemi multiplanetari (o con più di una stella) e soprattutto di studiare oggetti a grandi distanze. Questi eventi rimangono tuttavia abbastanza unici e richiedono un monitoraggio costante di milioni di stelle per essere individuati.

### 3.6 Imaging diretto

I pianeti extrasolari sono oggetti molto distanti, nonché molto meno luminosi della stella (o più) attorno alla quale orbitano, il che li rende complessi da osservare. Un'ulteriore complicazione è introdotta dalle osservazioni con telescopi ground-based, che devono tenere conto dei vari fattori atmosferici che ostacolano la rilevazione diretta di esopianeti. Esistono due tecniche principali per bloccare la luce delle stelle che potrebbero avere pianeti in orbita attorno ad esse; il primo prevede l'utilizzo di un

*coronografo*, da inserire all'interno del telescopio, e il secondo di un ombrellone stellare (*starshade*), pensato per un telescopio space-based affinché la luce venga bloccata prima di raggiungerlo. Le osservazioni sono attualmente limitate a lunghezze d'onda nell'infrarosso e a sistemi planetari giovani e vicini, i cui pianeti sono particolarmente brillanti (e massivi).

## 3.7 Popolazioni di esopianeti

Gli esopianeti possono essere suddivisi in quattro categorie principali, in base a dimensioni e composizione. Su una totalità di 5788 esopianeti confermati, quasi il 75% sono stati rilevati tramite il metodo del transito, molti dei quali grazie al telescopio spaziale *Kepler/K2* (la prima missione di ricerca esoplanetaria della NASA).

I **giganti gassosi** sono pianeti delle dimensioni di Giove e Saturno, o anche di dimensioni maggiori, composti principalmente da idrogeno ed elio e dotati di un nucleo solido. Questi pianeti si trovano spesso molto vicini alla loro stella, motivo per cui la loro temperatura è estremamente elevata. Data questa vicinanza, hanno anche periodi orbitali corti e orbite quasi circolari. Giganti gassosi con queste caratteristiche vengono definiti *hot Jupiters*. Le dimensioni notevoli e le orbite strette di questi oggetti li hanno resi perfetti candidati per essere rilevati tramite il metodo delle velocità radiali, dato l'effetto pronunciato prodotto sulla stella compagna. La loro formazione, seppur ancora incerta, avviene velocemente, nei primi 10 milioni di anni di vita di una stella simile al Sole. 51 Peg b è stato il primo pianeta di questo tipo ad essere scoperto.

I **pianeti nettuniani** hanno dimensioni simili a Urano e Nettuno, atmosfere dominate da idrogeno ed elio, spesso coperte da nubi, e nuclei solidi (roccia e metalli pesanti). Sono stati scoperti anche pianeti più piccoli di Nettuno ma più grandi della Terra, detti *mini-Neptunes*. Grazie al metodo del microlensing, che si è rivelato estremamente utile per trovare esopianeti giganti freddi lontani dalla propria stella, è stato identificato un esopianeta ghiacciato simile ad Urano, ma in orbita attorno ad una stella in un sistema binario. Nonostante mondi delle dimensioni di Nettuno siano i pianeti più comuni a formarsi nelle regioni remote e ghiacciate dei sistemi planetari, esiste una categoria rara di pianeti nettuniani detti *hot Neptunes*, i quali sono situati nel cosiddetto *hot Neptune desert*, chiamato in questo modo a causa della quasi assenza di oggetti di questo tipo. È stato provato che GJ 436b, uno dei pianeti nettuniani più caldi conosciuti, stia perdendo la sua atmosfera, possibile indice del fatto che pianeti ancora più caldi come gli *hot Neptunes* potrebbero rappresentare una fase planetaria di transizione.

Le **super Terre** sono una classe di pianeti più massivi della Terra, ma più leggeri dei giganti ghiacciati come Urano e Nettuno. Possono essere composti da gas, roccia o una combinazione di entrambi. Il nome è un riferimento alla dimensione di questi esopianeti, tuttavia non implica necessariamente una similitudine con la Terra. Presentano una grande varietà in termini di composizione, da K2-131b, una super Terra talmente calda da vaporizzare il metallo, a Kepler-22b, un possibile mondo oceanico, fino a TOI-207b, un pianeta potenzialmente roccioso. Tutti i pianeti menzionati sono stati scoperti grazie al metodo dei transiti.

I **planeti terrestri**, di dimensioni della Terra o inferiori, sono planeti rocciosi, composti da roccia, silicati, acqua e/o carbonio. Hanno generalmente un nucleo dominato da roccia o ferro, una superficie solida o liquida e, probabilmente, un'atmosfera gassosa. Tutte queste caratteristiche, in ogni caso, non garantiscono l'abitabilità di questi planeti. Uno dei sistemi planetari più studiati è quello appartenente alla stella TRAPPIST-1, a 38 a.l. di distanza, attorno alla quale orbitano sette planeti rocciosi di dimensioni terrestri, tre dei quali situati nella zona abitabile (e,f,g). Su tutti e sette, seppur in forme diverse, potrebbe essere presente acqua.

### 3.7.1 Zona abitabile e ricerca della vita

La vita sulla Terra ha avuto la possibilità di evolversi grazie a miliardi di anni di clima benigno, favorevole. Tra i requisiti di base per lo sviluppo della vita, la presenza di acqua liquida è sicuramente tra i più essenziali. Assumendo che la vita extra terrestre condivide tale requisito, la *zona abitabile* di una stella è stata convenzionalmente definita come la regione orbitale in cui un pianeta simile alla Terra può avere acqua liquida stabile sulla propria superficie. La distanza orbitale della zona abitabile dipende dalla luminosità della stella, che, per stelle di sequenza principale, dipende principalmente dalla massa stellare. Chiaramente questa definizione è abbastanza conservativa, poiché la temperatura superficiale di un pianeta dipende anche da fenomeni quali l'effetto serra, possibile grazie alla presenza di anidride carbonica. Un altro fattore da tenere in considerazione ai fini di definire una zona abitabile è il processo evolutivo di una stella; un pianeta che si trovi nella zona abitabile quando la stella è giovane potrebbe diventare troppo caldo oppure, potrebbe essere inizialmente troppo freddo per poi riscaldarsi a sufficienza per avere acqua liquida con l'aumentare della luminosità della stella. Si definisce quindi la *zona abitabile continuativa*, dove l'acqua liquida può essere stata presente per un periodo specifico di tempo, generalmente dai primi stadi evolutivi della stella fino all'epoca corrente, come la regione più promettente per la vita come la conosciamo. Queste definizioni non sono comunque sufficienti a garantire l'abitabilità di un pianeta, in quanto essere situato nella zona abitabile non equivale ad essere adatto alla vita. La Terra offre un ambiente ottimale in questo senso, il che porta a interrogarsi su quali siano le condizioni che un pianeta deve soddisfare per poter ospitare la vita. Data la complessità della vita sulla Terra, è tuttavia difficile comprendere a pieno e quantificare la varietà di criteri necessari, sottolineando inoltre che il suddetto discorso si basa sull'assunto secondo il quale un'eventuale forma di vita extra terrestre debba rispettare questi stessi requisiti. Tale assunto implica, infatti, l'esclusione di una possibilità di vita a noi sconosciuta, la quale, ad esempio, potrebbe non richiedere la presenza di acqua liquida per svilupparsi. Si tratta naturalmente di speculazioni, considerata la mancanza di prove scientifiche a sostegno, ma la ricerca di vita extra terrestre rimane comunque un settore di interesse, in continuo sviluppo grazie al progresso tecnologico. Le prime osservazioni, a tale scopo, tramite radiotelescopio, sono avvenute nel 1960 grazie a Frank Drake, pioniere di SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*). Nonostante non siano stati ottenuti risultati promettenti ad oggi, e questa ricerca possa risultare quasi al limite della fantascienza, forse l'idea di un tenue pallino blu solo nella vastità cosmica, unico nel suo genere, resta ancora un concetto troppo angosciante per l'umanità da accettare.

## 4 Bibliografia

Jack J. Lissauer & Imke de Pater, 2019, *Fundamental Planetary Science*.

Hannu Karttunen & Pekka Kröger & Heikki Oja & Markku Poutanen & Karl Johan Donner, 2016, *Fundamental Astronomy*.

Tiziano Maestri & Leonardo Testi, 2024, *Dispense del corso di Atmosfere planetarie*.

Pluto and the Developing Landscape of Our Solar System.  
<https://www.iau.org/public/themes/pluto/>.

Planetary Fact Sheets.  
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planetfact.html>.

<https://www.nasa.gov/>.