

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:  
*Marco Monti*

Relatore:  
*Chiar.mo Prof.  
Daniele Dallacasa*

---

Anno accademico 2020-2021



## Abstract

*Questo elaborato tratterà innanzitutto la formazione del Sistema Solare, al fine di una comprensione più profonda del perchè i pianeti interni e quelli esterni abbiano determinate caratteristiche. Si introdurrà la teoria più accreditata del collasso della Giant Molecular Cloud per la nascita del proto-Sistema Solare fino alla formazione dei singoli pianeti, differenziando tra rocciosi e gioviani. Tramite la definizione di pianeta, verrà introdotto il concetto di equilibrio idrostatico e ne sarà spiegato il significato. Prima di parlare delle caratteristiche, verranno presentate alcune proprietà fisiche condivise da tutti e 8 i pianeti quali l'albedo e la temperatura superficiale, la presenza di atmosfere ed eventuali magnetosfere. Attraverso delle tabelle saranno riportate delle grandezze importanti dei pianeti come le masse, i raggi equatoriali, le eccentricità e via dicendo. Finalmente, si esporranno le caratteristiche morfologiche e chimiche più peculiari di ciascun pianeta, con uno sguardo alle strutture interne. Comincerà in seguito il secondo capitolo, concernente la ricerca di pianeti extrasolari nell'universo. Dopo una breve introduzione all'argomento con un semplice accenno storico si introdurrà la differenza tra individuazione diretta ed indiretta di un pianeta extrasolare. Verranno presentate poi le tecniche di rilevazione più rappresentative: il metodo della velocità radiale, astro-metrico, dei transiti, del microlensing gravitazionale e dell'imaging diretto. Saranno introdotti anche i limiti di questi metodi sottolineando l'utilità della loro combinazione per l'individuazione e studio di un esopianeta. Verranno trattate infine le tipologie di esopianeti riscontrati e si esporrà l'indice ESI come risultati delle ricerche sui pianeti extrasolari. L'elaborato è stato completato con l'aggiunta di un'appendice riguardante il satellite gioviano Europa, con lo scopo di personalizzarlo senza esulare dall'argomento fondamentale.*

# Indice

<b>Abstract</b>	<b><i>i</i></b>
<b>1 Proprietà dei pianeti del Sistema Solare</b>	<b>1</b>
1.1 Formazione del Sistema Solare . . . . .	1
1.2 Definizione di pianeta . . . . .	2
1.2.1 Definizione e formazione dei pianeti interni . . . . .	2
1.2.2 Definizione e formazione dei pianeti esterni . . . . .	3
1.3 Equilibrio idrostatico . . . . .	4
1.4 Proprietà fisiche dei pianeti . . . . .	5
1.4.1 Atmosfere e magnetosfere . . . . .	5
1.4.2 Albedo e temperatura superficiale . . . . .	6
1.5 Caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare . . . . .	7
<b>2 Ricerca di pianeti esterni</b>	<b>11</b>
2.1 Metodo delle velocità radiali . . . . .	12
2.2 Metodo astrometrico . . . . .	12
2.3 Metodo dei transiti . . . . .	13
2.4 Metodo del microlensing gravitazionale . . . . .	13
2.5 Metodo del direct imaging . . . . .	14
2.6 Classificazione degli esopianeti . . . . .	15
2.6.1 Earth Similarity Index . . . . .	15
<b>A Europa, la luna ghiacciata</b>	<b><i>a</i></b>



# Capitolo 1

## Proprietà dei pianeti del Sistema Solare

Agglomerati di materia a distanze diverse dal Sole hanno avuto sviluppi differenti a causa della loro composizione chimica, andandosi a differenziare tra pianeti interni terrestri (o rocciosi), pianeti esterni gioviani e corpi minori. Per poter presentare le caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare è quindi necessario innanzitutto introdurre come lo stesso Sistema Solare si è formato.

### 1.1 Formazione del Sistema Solare

Il Sistema Solare si formò all'incirca 4.568 miliardi di anni fa dal collasso di una parte di una *Nube Molecolare Gigante (GMC)*. Venne a formarsi la cosiddetta *nebulosa pre-solare* al cui centro, a causa delle alte temperature e pressioni provocate da un ulteriore collasso gravitazionale locale, si innescarono reazioni di fusione nucleare, formando una *protostella T-auri*. Man mano che la nebulosa collassava aumentava la sua velocità rotazionale a causa della conservazione del momento angolare. Questo fece condensare la materia principalmente al centro, portandolo ad alte temperature e pressioni causate dai frequenti urti tra atomi. Così venne appunto a crearsi ciò che ora è il Sole nella parte centrale, mentre attorno alla giovane stella ruotava il *disco protoplanetario*, un disco composto da gas e polveri (Fig 1.1).

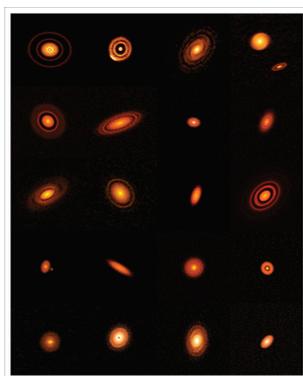


Figura 1.1: 20 dischi protoplanetari catturati da ALMA, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), S. Andrews et al.; NRAO/AUI/NSF, S. Dagnello

Qui, grani di polvere si addensarono in piccoli agglomerati e, secondo la teoria dell'accrescimento di massa, attrassero sempre più materia aumentando ulteriormente la loro attrazione gravitazionale, andando a formare così dei *planetesimi*, ovvero dei *protopianeti* poco massivi e di massimo 10 km di dimensione. Ulteriori urti successivi formarono gli attuali pianeti interni conosciuti nel corso di qualche centinaio di milione di anni, mentre quelli esterni si svilupparono molto prima ( $t < 10 Myr$ ) inglobando parte del gas del disco. La distanza dal Sole assume qui un ruolo cruciale nelle caratteristiche di ciascun pianeta. La differenziazione dei vari composti chimici rispetto alla vicinanza dal Sole ( e quindi alla temperatura) è infatti alla base della composizione dei pianeti del Sistema Solare. È quindi importante specificare la differenza tra pianeti interni ed esterni e trattare della loro formazione. In primo luogo, fondamentalmente, che cos'è però un pianeta?

## 1.2 Definizione di pianeta

La definizione di pianeta da parte della Unione Astronomica Internazionale **IAU** è datata 24 agosto 2006 e recita:

Un pianeta è un *corpo celeste* che

1. è in orbita attorno al Sole
2. ha una massa sufficiente affinché la sua gravità possa vincere le forze di corpo rigido in modo che esso assuma una forma di **equilibrio idrostatico** (quasi sferica)
3. ha ripulito lo spazio attorno alla sua orbita

Venne così declassato *Plutone* a **pianeta nano** poiché non rispettava il terzo requisito. Secondo questa definizione il Sistema Solare si compone di 8 pianeti (**Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno**), 5 pianeti nani (*Cerere, Plutone, Makemake, Haumea, Eris*) e un numero non precisato di *corpi minori* quali asteroidi e comete.

### 1.2.1 Definizione e formazione dei pianeti interni

Si definisce appartenente al Sistema Solare interno un pianeta che orbiti entro la fascia degli asteroidi, distante quindi al massimo 2.2 AU dal Sole (Marte  $\sim 1.52 AU$ ). È inoltre importante definire la **frost line**, ovvero la linea di demarcazione oltre alla quale la temperatura permette ai composti dell'idrogeno, come acqua o ammoniaca, di solidificarsi. Per il Sistema Solare questa linea si trova all'incirca a 2.7 AU, il che significa che alla formazione del Sistema Solare i pianeti interni non potevano possedere molecole volatili come  $H_2O$ ,  $NH_3$  o  $CH_4$ , come si può notare in Fig 1.2. Di conseguenza, questi pianeti sono detti *terrestri* o *rocciosi*, poiché potevano essere composti solo da metalli e silicati rocciosi. Essendo questi elementi meno comuni nell'universo rispetto all'idrogeno, questi corpi celesti hanno una massa ed un volume molto minori se confrontati con i giganti gioviani.

La formazione dei pianeti interni fu molto dinamica e violenta, caratterizzata da frequenti urti con altri corpi. Dopo 10 milioni di anni dalla nascita del Sole, il Sistema Solare interno comprendeva tra i 50 e i 100 planetesimi di dimensione fra quelle della

Luna e Marte. Circa 4.1 miliardi di anni fa, si verificò una fase di intensi impatti astronomici dovuti a riaggiustamenti orbitali dei pianeti esterni. Queste alterazioni gravitazionali causarono perturbazioni ai corpi celesti interni, espellendone molti verso parti esterne del Sistema Solare. Ebbe così inizio la fase nota come **Late Heavy Bombardment (LHB)**<sup>1</sup> che si protrasse per 300 milioni di anni. Questo periodo fu caratterizzato da violenti urti tra i planetesimi interni, i quali collidendo si fusero insieme e formarono gli attuali pianeti rocciosi, che mostrano ancora oggi i segni di una fase di intenso bombardamento meteorico.

## 1.2.2 Definizione e formazione dei pianeti esterni

Un pianeta appartenente al Sistema Solare esterno orbita a più di 3.5 AU dal Sole (Giove  $\sim 5.2AU$ ). Questa distanza ha permesso la solidificazione di grandi quantità di ghiacci, permettendo un accrescimento ulteriore attraverso la cattura dell'abbondante idrogeno e dell'elio. Questo fa sì che i pianeti esterni vengano denominati *giganti gioviani* e contengano circa il 99% della massa totale orbitante il Sole. Giove e Saturno sono detti giganti gassosi, mentre i due pianeti più esterni vengono definiti ghiacciati, dato che sono composti prevalentemente da ghiacci e poco gas. Per poter accrescere alla loro massa attuale alle distanze dal Sole a cui orbitano ora, tuttavia, avrebbero impiegato centinaia di milioni di anni. La teoria più accreditata per la loro formazione è quindi quella della migrazione: essi formarono il nucleo in prossimità di Giove e Saturno e, a causa della loro risonanza 2:1<sup>2</sup>, Urano e Nettuno subirono una spinta gravitazionale verso l'esterno. Questo li fece allontanare e non permise loro di accumulare altro gas, spazzato via dall'intenso vento stellare della giovane stella T-Tauri che fermò la loro formazione planetaria (entro 10 milioni di anni dalla nascita della stella).

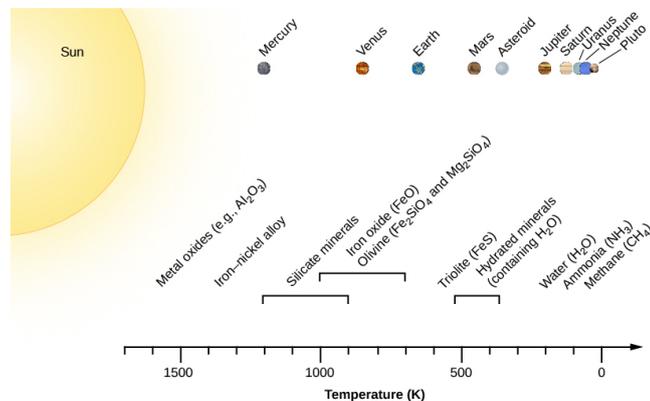


Figura 1.2: Condensazione di composti chimici differenti al variare della temperatura e distanza dal Sole [Lumen].

<sup>1</sup>La teoria del Late Heavy Bombardment è necessaria anche per spiegare la presenza di acqua e altri composti di idrogeno nei pianeti terrestri, probabilmente trasportati e liberati negli urti da corpi provenienti dal Sistema Solare esterno.

<sup>2</sup>Ogni due orbite di Giove intorno al Sole, Saturno ne compiva una. La risonanza orbitale è un fenomeno comune nel Sistema Solare, di spicco è quella tra le lune medicee Io, Europa e Ganimede (4:2:1). La risonanza dei due giganti gassosi fu uno dei fattori che probabilmente causarono il Bombardamento Intenso Tardivo LHB.

### 1.3 Equilibrio idrostatico

Una delle tre condizioni fondamentali per poter essere definito pianeta è che un corpo celeste abbia forma approssimativamente sferica dovuta all'equilibrio idrostatico. La condizione di equilibrio si ha quando, in ogni punto del pianeta, l'attrazione gravitazionale sia equilibrata dalle forze di pressione.

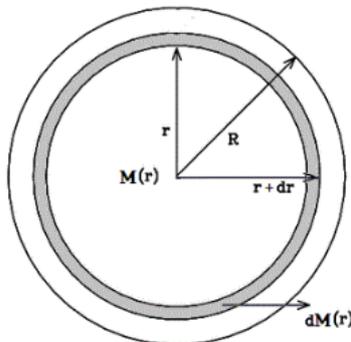


Figura 1.3: Rappresentazione grafica di un pianeta di raggio  $R$  in equilibrio idrostatico.

Si assuma un pianeta come in Fig 1.3 la quale densità dipenda solo dalla coordinata radiale  $r$ , ovvero  $\rho = \rho(r)$  e che quindi la materia sia distribuita sfericamente. Lo si supponga quindi composto da vari gusci sferici. Si consideri il guscio di massa  $dM(r)$  e superficie  $dS$  compreso tra  $r$  e  $r+dr$  in equilibrio idrostatico ovvero nella condizione in cui la forza gravitazionale che attrae il guscio verso il centro del pianeta  $F_g$  sia eguagliata dalle forze di pressione  $F_p$ , dirette sia verso l'esterno  $P(r)dS$  che verso l'interno  $P(r+dr)dS$  (si considera al prim'ordine che  $4\pi(r+dr)^2 \sim 4\pi r^2 = dS$ ). La forza gravitazionale agente sul guscio sferico di massa  $dM(r)$  sarà

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

Dove  $G$  è la *costante di gravitazione universale*. La somma delle forze di pressione  $F_p$  sul guscio è invece data da

$$F_p = P(r+dr)4\pi r^2 - P(r)4\pi r^2 = dP(r)4\pi r^2 \quad (1.2)$$

Il contributo netto risulta quindi essere, eguagliando  $F_g$  ad  $F_p$ ,

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2} = -g(r)\rho(r) \quad (1.3)$$

Questa è l'**equazione dell'equilibrio idrostatico** che descrive come varia il gradiente di pressione al variare del raggio, dove  $g(r)$  è l'accelerazione di gravità ad una distanza  $r$  dal centro.

Punti in posizioni diverse sulla superficie di un pianeta vengono attratti diversamente a causa della rotazione del pianeta stesso. I punti del cerchio massimo equatoriale sono infatti i più distanti dall'asse di rotazione e quindi soggetti ad una forza centrifuga maggiore. Il risultato è uno schiacciamento dei poli e un rigonfiamento nella zona dell'equatore, fenomeno accentuato nei giganti gassosi date le alte velocità rotazionali. La forma che assumono i pianeti è quindi in realtà solo approssimativamente sferica,

più simile ad un *ellissoide oblato*. Nel caso dei pianeti terrestri si ha una correzione ulteriore, data dalla presenza di rigonfiamenti e avvallamenti non simmetrici che restituiscono una forma a solido irregolare detto *geoide*. Si andranno ora ad analizzare altre proprietà fisiche dei pianeti per poi discutere delle loro caratteristiche intrinseche.

## 1.4 Proprietà fisiche dei pianeti

Prendendo come riferimento il polo nord solare, tutti i pianeti orbitano (e il Sole stesso ruota) in senso antiorario. Essendosi tutti formati dallo stesso disco protoplanetario, si trovano a giacere all'incirca sullo stesso piano. Se si considera l'*eclittica*, ovvero il piano di giacenza descritto dalla Terra orbitando il Sole, l'inclinazione media  $i$  degli altri pianeti è di circa  $1.75^\circ$  con un'eccezione particolare per Mercurio ( $7^\circ$ ) e per i vari pianeti nani, molto discostati. Le orbite dei pianeti sono ellittiche con il Sole posto in uno dei fuochi tuttavia, nella maggior parte dei casi, si possono approssimare a circonferenze centrate nel Sole, considerando un'eccentricità  $e$  media di 0.04. Nuovamente, Mercurio risulta essere un outlier, presentando una eccentricità elevata pari a 0.21.

### 1.4.1 Atmosfere e magnetosfere

L'atmosfera di un pianeta, così come la composizione chimica interna, dipende dalla zona di formazione nel Sistema Solare. I pianeti rocciosi, a differenza dei gioviani con atmosfere *primarie* poichè inalterate, hanno modificato la loro atmosfera in un secondo momento dopo la formazione planetaria, per questo detta *secondaria*. I cambiamenti atmosferici possono avvenire ad esempio in seguito a collisioni meteoriche o con comete (come anticipato in precedenza, è necessaria la teoria dei corpi minori che trasportavano composti di idrogeno ghiacciati che, collidendo col pianeta, ne liberassero i gas per spiegare la presenza per esempio di acqua sulla Terra), attraverso il vulcanismo o tramite il **meccanismo di fuga di Jeans**. Prendiamo una particella di massa  $m$  che si trovi nella parte alta della atmosfera terrestre, l'*Esosfera*. Qui, le temperature possono raggiungere anche i 2000 K con intensa attività solare a causa dell'assorbimento della radiazione UV e dei raggi cosmici. La variazione dell'energia cinetica e della energia potenziale gravitazionale data dall'attrazione terrestre della particella sarà

$$E_{tot} = \frac{mv^2}{2} - \frac{GM_{\oplus}m}{r} = 0 \quad (1.4)$$

Da cui si ottiene una quantità importante, la **velocità di fuga**  $v_e$ , ovvero la velocità che la particella deve avere per sfuggire all'attrazione gravitazionale del pianeta.

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{r}} \quad (1.5)$$

La distribuzione di velocità delle particelle segue la statistica di Maxwell-Boltzmann, il cui valore più probabile è

$$v_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (1.6)$$

Dove  $k$  è la costante di Boltzmann e  $T$  la temperatura associata a quel dato strato atmosferico. È da specificare che  $v_0$  è un valore medio, potrebbero esserci particelle con velocità superiori o inferiori. Se  $v_0 < v_e$  le particelle restano chiaramente intrappolate

nell'atmosfera. Dalla Eq 1.6 si nota che particelle meno massive, a parità di  $T$ , hanno velocità superiori e quindi hanno più probabilità di sfuggire all'attrazione del pianeta. Questo è ciò che ha caratterizzato le atmosfere dei pianeti interni, decisamente meno ricche di idrogeno ed elio rispetto ai gioviani. È inoltre ciò che si suppone abbia ridotto drasticamente l'atmosfera a Marte. Essa è infatti estremamente rarefatta: a causa probabilmente dell'assenza di un forte campo magnetico, il vento solare ha trascinato con sé la maggior parte dei componenti atmosferici marziani.

La maggior parte dei pianeti presenta una *magnetosfera* generata da un campo magnetico intrinseco, probabilmente prodotto dai movimenti degli elettroni presenti nel nucleo metallico liquido in un fenomeno chiamato *effetto dinamo*. In alcuni casi, come per i giganti gassosi, può essere generato un intenso campo magnetico come conseguenza delle alte pressioni ( $10^6 P_{atm,\oplus}$ ) che forniscono all'idrogeno proprietà metalliche, rendendolo liquido e un conduttore a tutti gli effetti (in Fig 1.5 è visibile lo strato di idrogeno metallico in Giove e Saturno). Le alte pressioni dispongono gli atomi di idrogeno come in una griglia ordinata, con il risultato che gli elettroni sono tutti condivisi e conducono corrente molto efficacemente. L'effetto dinamo in questo caso non avviene nel nucleo poichè l'idrogeno in questione si trova in atmosfera, prossima quindi alla superficie del pianeta. La magnetosfera scherma i pianeti dalla radiazione più energetica, come le particelle cariche del vento solare. Per la Terra questa è stata fondamentale per lo sviluppo della vita. Essa si compone di un *bowshock*, ovvero una zona rivolta verso il Sole che riceve la pressione del vento solare e ne viene compressa; una *magnetopause* che separa la zona di plasma shockata da quella non; una *magnetotail*, che si estende per un gran numero di raggi planetari nella direzione opposta al Sole.

## 1.4.2 Albedo e temperatura superficiale

La radiazione termica prodotta dai vari corpi del Sistema Solare dipende dalla loro distanza dal Sole e dal **Bond albedo**  $A^3$ , o albedo sferico. Questa grandezza è definita come la tendenza di un corpo a riflettere la luce, ovvero il rapporto tra la radiazione elettromagnetica riflessa e quella incidente (in termini di isotropia)  $A = L_r/L_i$ . Avrà un range di valori tra 0 (massimo assorbimento) ed 1 (riflessione totale). Di conseguenza la quantità  $(1 - A)$  sarà la percentuale di radiazione assorbita. La radiazione totale assorbita sarà pari a

$$L_{abs} = \frac{L_{\odot}\pi R^2}{4\pi r^2}(1 - A) \quad (1.7)$$

Dove  $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2\sigma T_{\odot}^4$  è la luminosità solare ottenuta tramite la legge di *Stefan-Boltzmann*<sup>4</sup> e  $R$  il raggio del pianeta. In condizioni di equilibrio termico, la radiazione assorbita deve essere pari a quella emessa, che per un pianeta in rapida rotazione è pari a  $L_{em} = 4\pi R^2\sigma T^4$ , da cui

$$L_{abs} = L_{em} \implies T = T_{\odot} \left(\frac{1 - A}{4}\right)^{1/4} \left(\frac{R_{\odot}}{r}\right)^{1/2} \quad (1.8)$$

È possibile in questo modo avere una prima stima della temperatura superficiale di un pianeta. Confrontando i dati sperimentali con i valori teorici si hanno però discor-

---

<sup>3</sup>È in realtà più corretto considerare anche il calore interno generato dai pianeti tuttavia questo diventa non trascurabile solo nel caso di Giove e Saturno.

<sup>4</sup>I termini con pedice  $\odot$  si riferiscono a grandezze solari.

danze non associabili a pure fluttuazioni statistiche. Si ha una sottostima dei valori reali a causa di un fenomeno di grande rilevanza soprattutto in pianeti con atmosfera: l'**effetto serra**. La radiazione assorbita rimane intrappolata all'interno dell'atmosfera del pianeta, aumentandone la temperatura nel tempo. È ciò che accadde su Venere qualche miliardo di anni fa e che potrebbe essere il destino anche della Terra: si raggiungono ora per questo motivo su Venere le più alte temperature superficiali al di fuori del Sole nel Sistema Solare, con un picco di 750 K ( $\sim 470^\circ\text{C}$ ).

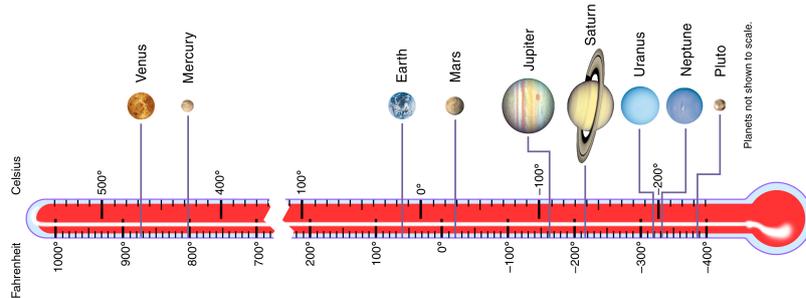


Figura 1.4: Confronto tra le temperature superficiali dei pianeti del Sistema Solare e Plutone in gradi Celsius e Kelvin [NASA].

## 1.5 Caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare

In questa sezione verranno introdotte le principali caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare. Nelle seguenti tabelle le grandezze che li differenziano. Il raggio equatoriale, la massa, la densità media e l'inclinazione sono normalizzati alle quantità terrestri  $R_{e,\oplus} = 6.4 \cdot 10^9\text{cm}$ ,  $M_{\oplus} = 5.9 \cdot 10^{27}\text{g}$ ,  $\rho_{\oplus} = 5,5\text{g/cm}^3$ . Le distanze dal Sole, i periodi orbitali e rotazionali e le temperature superficiali sono da considerarsi medie. In Fig 1.5 è possibile avere un primo approccio intuitivo alle strutture interne dei pianeti e notarne differenze e similitudini.

PIANETI TERRESTRI				
	Mercurio	Venere	Terra	Marte
$R_e(R_{\oplus})$	0.37	0.95	1	0.53
Massa ( $M_{\oplus}$ )	0.055	0.82	1	0.11
Distanza dal Sole (AU)	0.39	0.72	1	1.52
Periodo orbitale (d)	87.97	224.7	365.24	686
Giorno (h)	1400	5832	23.93	24.62
Satelliti naturali	0	0	1	2
Densità media ( $\rho_{\oplus}$ )	0.984	0.951	1	0.713
Eccentricità	0.21	0.06	0.01	0.09
Inclinazione orbitale	$7.1^\circ$	$3.4^\circ$	$0^\circ$	$1.9^\circ$
$T_{sup}$ (K)	700/100	750	293	268/186

Tabella 1.1: Confronto tra alcune caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare interno

PIANETI GIOVIANI				
	Giove	Saturno	Urano	Nettuno
$R_e(R_{\oplus})$	11.21	9.45	4	3.83
Massa ( $M_{\oplus}$ )	317.83	95.16	14.54	17.14
Distanza dal Sole (AU)	5.2	9.54	19.19	30.07
Periodo orbitale (y)	11.86	29.45	84.02	164.79
Giorno (h)	9.93	10.66	17.24	16.11
Satelliti naturali	79	82	27	14
Densità media ( $\rho_{\oplus}$ )	0.241	0.125	0.23	0.297
Eccentricità	0.05	0.05	0.05	0.01
Inclinazione orbitale	1.3°	2.5°	0.8°	1.8°
$T_{sup}$ (K)	152	143	68	43

Tabella 1.2: Confronto tra alcune caratteristiche dei pianeti del Sistema Solare esterno

## Mercurio

È il pianeta più vicino al Sole e, a causa della vicinanza, è in *rotazione sincrona* con esso. Mercurio ha quindi una rotazione attorno al proprio asse molto lenta, con il risultato di una forte escursione termica tra l'emisfero rivolto verso il Sole e quello opposto, come risaltato nella Tab 1.1. Presenta inoltre delle forti irregolarità nell'eccentricità e nell'inclinazione rispetto all'eclittica, oltre che un alto contenuto di ferro. La teoria più accreditata per spiegare il fenomeno suggerisce che in passato Mercurio presentasse una massa 2.25 volte quella attuale ma un urto violento con un planetesimo ne strappò gran parte del mantello modificandone l'orbita. Rimase così un pianeta ricco di metalli con un grande nucleo (80% del totale). Non presenta atmosfera ed ha un debole campo magnetico grazie al grande volume del nucleo metallico.

## Venere

Venere, detto anche il gemello della Terra per volume, massa e composizione del nucleo estremamente simili, ha una spessa atmosfera composta per il 96% di  $CO_2$  che lo rende il pianeta più caldo degli 8. L'effetto serra fa sì che la radiazione incidente assorbita e poi riemessa dal pianeta venga riflessa dal sottile strato di acido solforico nelle nubi, scaldando ulteriormente il pianeta. In passato si suppone Venere ospitasse degli oceani ma a causa della vicinanza solare evaporò tutta l'acqua presente, liberando grandi quantità di anidride carbonica. Ha un'inclinazione assiale di  $177^\circ$ , conferendogli un moto *retrogrado* di rotazione attorno al proprio asse più lento del moto orbitale. Venere non presenta un campo magnetico generato per effetto dinamo ma una debole magnetosfera indotta dall'interazione tra radiazione solare e atmosfera venusiana. È caratterizzato da un vulcanismo e da un'attività geologica molto intensi ma diversi da quelli terrestri: si parla di *lid tectonics*. La litosfera venusiana è più sottile, antica e non formata da placche tettoniche. Anch'essa subisce un rinnovamento periodico ma più lento rispetto alla crosta terrestre.

## Terra

Il nostro pianeta ha la magnetosfera più intensa del Sistema Solare interno, è ricco di acqua liquida (70%) ed è l'unico ad oggi che sappiamo ospitare la vita. La Luna, in proporzione alla grandezza terrestre, è il satellite più grande del Sistema Solare dopo Caronte. Si pensa che venne a formarsi dai detriti liberati nella collisione tra la Terra e un protopianeta delle dimensioni di Marte, *Theia*. Questo spiegherebbe la somiglianza del suolo lunare con la composizione della crosta terrestre e la mancanza di composti volatili, vaporizzati dalle alte temperature della collisione.

## Marte

L'ultimo dei pianeti rocciosi è anche l'unico che possiede due satelliti naturali, probabilmente catturati dalla fascia degli asteroidi date le loro forme irregolari: *Phobos* e *Deimos*. Marte è detto anche il *pianeta rosso*, a causa della forte presenza di ossido ferrico in superficie. La polvere è una importante caratteristica del pianeta: essa rimane sospesa nella tenue atmosfera riducendo il flusso solare. Sono infatti frequenti le tempeste di sabbia marziane, che hanno causato non pochi danni al rover *Opportunity*. È ormai assodato che Marte presentasse fiumi e mari di acqua liquida in superficie e il motivo della sua scomparsa è ancora oggetto di grande studio. Ad oggi l'acqua è presente sotto forma di ghiacci ai poli e di acqua liquida nel sottosuolo (in prossimità del Polo Sud), necessariamente con sali disciolti che ne abbassino la temperatura di glaciazione e la mantengano allo stato liquido, due condizioni favorevoli allo sviluppo della vita. Marte non mostra segni di attività vulcanica attualmente tuttavia è certa quella passata: ospita diverse strutture vulcaniche, tra cui la cima più alta del Sistema Solare, il vulcano *Monte Olimpo* di 25 km di altezza. Marte non presenta un campo magnetico intrinseco ma è caratterizzato da magnetizzazione residua.

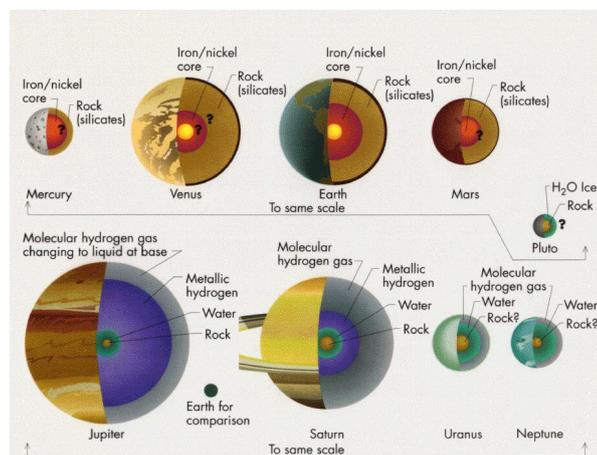


Figura 1.5: Struttura interna dei pianeti gioviani e terrestri (con Plutone) in scala tra loro.

## Giove

La massa di Giove è pari a più del doppio della massa degli altri pianeti messi insieme. Fu probabilmente fondamentale per lo sviluppo della vita sulla Terra poichè funge da deviatore dei grandi corpi celesti diretti verso l'interno del Sistema Solare. Alcuni di questi possono rimanere ad orbitare attorno a Giove, aggiungendosi alla grande

popolazione di satelliti, i quali più rilevanti sono i medicei Io, Europa, Ganimede e Callisto<sup>5</sup>. Un altro record per il gigante gassoso è la velocità di rotazione attorno al proprio asse, la più elevata tra tutti i pianeti, che rende la forma di Giove molto schiacciata ai poli. È tipica di Giove la struttura a bande e zone dell'atmosfera, visibile anche con un telescopio amatoriale, e la intensa tempesta che imperversa da almeno 300 anni, la *Grande Macchia Rossa*. Le tempeste hanno portate colossali, con venti che possono soffiare dai 150 ai 500 metri al secondo nelle nubi più basse. Giove inoltre riemette il doppio della radiazione ricevuta dal Sole poiché ha una fonte interna di calore dovuta ai residui energetici della contrazione gravitazionale alla formazione del pianeta.

## Saturno

Saturno è il secondo gigante gassoso e anch'esso, grazie alla sua grande massa, ha contribuito a deviare asteroidi potenzialmente pericolosi. La caratteristica di spicco è però quella dell'affascinante sistema ad anelli che giace sul suo piano equatoriale: spesso qualche decina di metri, si estende per oltre 230 mila chilometri dalla superficie del pianeta. È composto da detriti e ghiacci che spaziano dai micron ai metri di dimensione, appartenenti probabilmente a corpi che hanno superato la distanza *limite di Roche* e sono stati frammentati. Tra gli anelli si osservano fasce vuote in cui orbitano i cosiddetti *satelliti pastori* che mantengono l'ordine del sistema anulare. Nel suo ricco sistema di satelliti spicca *Titano*, l'unica luna ad oggi conosciuta a possedere un'atmosfera (simile inoltre a quella della Terra dei primordi). Anche Saturno presenta una fonte intrinseca di calore che proviene però non solo dalla contrazione del pianeta ma anche dalla presenza di elio che condensa in superficie e precipita verso il centro. In questo modo guadagna energia cinetica che verrà assorbita dagli strati più interni, per poi essere riemessa sotto forma di calore.

## Urano e Nettuno

Gli ultimi due pianeti del Sistema Solare sono i giganti ghiacciati. A differenza degli altri due gioviani, non presentano strati di idrogeno metallico ma una grande quantità di ghiacci di acqua, ammoniaca, metano e altri idrocarburi. Come già accennato, la loro formazione avvenne molto probabilmente in prossimità di Giove e Saturno, per poi essere spinti a distanze maggiori. L'asse di rotazione di Urano è inclinato di 98°, dando la parenza di "rotolare" attorno al Sole. Anche il campo magnetico ha una forte inclinazione, 60°, ed è generato dalla mistura  $H_2O-NH_3-CH_4$  che rende l'interno di Urano un "mare" elettricamente conduttivo. Nettuno, il più distante dei pianeti, è estremamente simile all'altro gigante ghiacciato come composizione e campo magnetico, seppur di intensità minore. Come tutti i gioviani, presenta un sistema di anelli, molto tenue. Interessante è il caso della sua luna maggiore, Tritone, che compie un moto retrogrado attorno al proprio asse. Fu probabilmente catturata milioni di anni fa dalla *Fascia di Kuiper*, dato che condivide molte caratteristiche con Plutone.

---

<sup>5</sup>Le lune dei pianeti gioviani sono mondi particolarissimi e molto studiati, la quale trattazione completa tuttavia esula dall'obiettivo di questo elaborato. È presente nell'appendice A un approfondimento su Europa.

## Capitolo 2

# Ricerca di pianeti esterni

La ricerca dei pianeti extrasolari è una branca estremamente giovane dell'astrofisica, con meno di 30 anni di esperienza. Per molto tempo gli uomini hanno potuto discutere di altri mondi solo filosofando o fantasticando. Nel 1995, dopo non poche verifiche da parte di gran parte della comunità astronomica, venne finalmente confermato un esopianeta orbitante la stella **51 Pegasi**, nella costellazione di Pegaso. La loro ricerca è materia di studio recente poichè è estremamente complicata e necessita di tecniche e strumenti molto affinati. Il motivo è che, a differenza dei pianeti del Sistema Solare, quelli extrasolari sono estremamente lontani, e quindi irraggiungibili, e anche sovrastati dalla luce della stella attorno a cui orbitano. I pianeti emettono nell'infrarosso o nel lontano infrarosso, non nella parte ottica dello spettro, e producono un flusso estremamente più debole della stella associata. Questo rende quasi impossibile la loro individuazione **diretta**, attraverso il metodo di **imaging diretto**. Con gli anni sono stati sviluppati altri metodi, detti **indiretti**, che sfruttano proprietà legate alla stella, i cui dati devono essere quindi ottenuti con grande precisione in modo da confermare la presenza di esopianeti. Metodi differenti individuano caratteristiche diverse quali la massa, il semiasse dell'orbita, il raggio eccetera. La combinazione di più metodi per lo stesso pianeta è quindi fondamentale per una comprensione più profonda e precisa. Verranno di seguito presentate le tecniche più rappresentative. Alla scrittura di questo elaborato, giugno 2021, sono stati confermati 4422 esopianeti e 4190 sono in attesa di ulteriori dati di conferma.

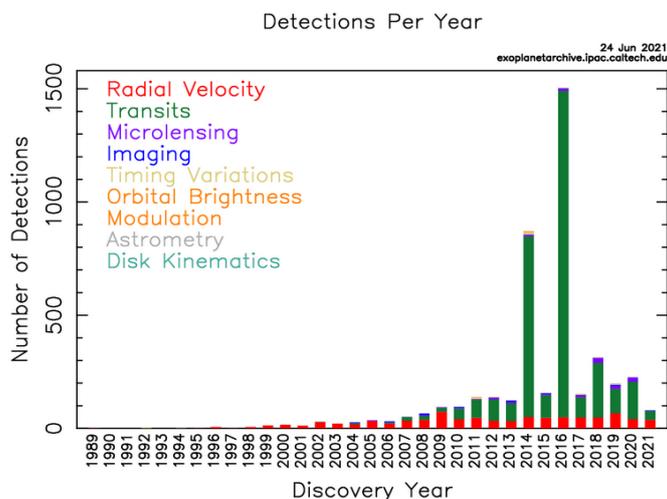


Figura 2.1: Numero di pianeti scoperti per anno per tipologia di metodo [NExSci].

## 2.1 Metodo delle velocità radiali

Per poter discutere del metodo delle velocità radiali è necessario introdurre l'**effetto Doppler**. Questo è un fenomeno che subisce un'onda emessa da un corpo in movimento: l'osservatore coglie una lunghezza d'onda, o una frequenza, diversa da quella originale. Nel caso delle onde elettromagnetiche questo effetto si traduce in uno spostamento delle righe spettrali. Se verso il rosso si parla di *redshift*, ovvero di allontanamento della sorgente dall'osservatore, se verso il blu è invece *blueshift*, e il corpo si sta avvicinando. Questi shift sono dati dalla legge

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}} = \frac{v_r}{c} \implies \begin{cases} \Delta\lambda < 0 \rightarrow \text{blueshift} \\ \Delta\lambda > 0 \rightarrow \text{redshift} \end{cases} \quad (2.1)$$

Dove  $\Delta\lambda = \lambda_{oss} - \lambda_{lab}$  è lo spostamento della riga rispetto al caso statico,  $c$  è la velocità della luce e  $v_r$  è la velocità radiale della stella osservata, ovvero la componente della velocità lungo la linea di vista. Un pianeta che orbita una stella è in grado di farla "vibrare" attorno al centro di massa, poichè l'attrazione gravitazionale è reciproca. Tanto più un pianeta è massivo e vicino alla stella, tanto più grande sarà la variazione Doppler e quindi la variazione della velocità radiale, seguendo

$$\Delta v_r = \left( \frac{2\pi G}{PM_\star^2} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (2.2)$$

In cui  $P$  è il periodo orbitale,  $M_\star$  è la massa della stella,  $e$  è l'eccentricità,  $G$  la costante di gravitazione universale,  $M_p$  la massa della stella e  $i$  l'angolo di inclinazione tra la linea di vista e la normale al piano dell'orbita. Per rilevare pianeti come la Terra servirebbe un'alta risoluzione, motivo per cui non è efficace per esopianeti poco massivi. Attraverso questo metodo venne scoperto il primo esopianeta, prima dell'avvento della tecnica dei transiti era il più utilizzato (Fig 2.1).

## 2.2 Metodo astrometrico

Il metodo astrometrico è probabilmente quello che necessita della migliore risoluzione possibile. Sfrutta lo stesso concetto del metodo delle velocità radiali: un pianeta attrae a sè la stella attorno cui sta orbitando, facendole compiere dei piccoli spostamenti attorno al centro di massa. A differenza delle velocità, l'astrometria misura proprio le variazioni spaziali nel cielo che compie la stella. Le oscillazioni del moto proprio di una stella hanno ampiezza angolare

$$\alpha = \frac{M_p a}{M_\star d} \quad (2.3)$$

dove  $a$  è la lunghezza del semiasse orbitale maggiore e  $d$  la distanza dalla Terra. Ad occhio nudo sono chiaramente impercettibili ma con l'adeguata sensibilità e tempo d'esposizione è possibile ottenere dei risultati esaustivi. Sono più propensi a far compiere spostamenti misurabili i pianeti con grande massa e orbita, che spostano il centro di massa del sistema fuori dalla stella stessa. Finora è stato confermato un solo pianeta attraverso l'astrometria. Nel 2013 venne lanciato in un *punto lagrangiano* terrestre il satellite **Gaia**, con l'obiettivo di mappare una grande porzione del cielo studiando i moti propri stellari con una sensibilità dell'ordine delle decine di microarcosecondi tuttavia non ha ancora fornito risultati in quest'ambito.

## 2.3 Metodo dei transiti

Questo metodo sfrutta l'occultazione parziale di una stella da parte di un pianeta che le orbita attorno. Il passaggio dell'esopianeta davanti al suo disco ne limita il flusso in uscita e, se la linea di vista dell'osservatore fosse allineata con il fenomeno, si otterrebbe una piccola e breve diminuzione nella curva di luce stellare. Questa è detta *eclissi primaria*. Ciò avviene perchè i pianeti sono essenzialmente opachi e assorbono la radiazione incidente. Si ha poi una *eclissi secondaria* nel momento in cui il pianeta sta orbitando dietro la stella: fino a pochi istanti prima del passaggio esso riflette parte della radiazione ma, quando viene coperto dalla stella, la curva di luce subisce una lieve attenuazione, più debole dell'eclissi primaria.

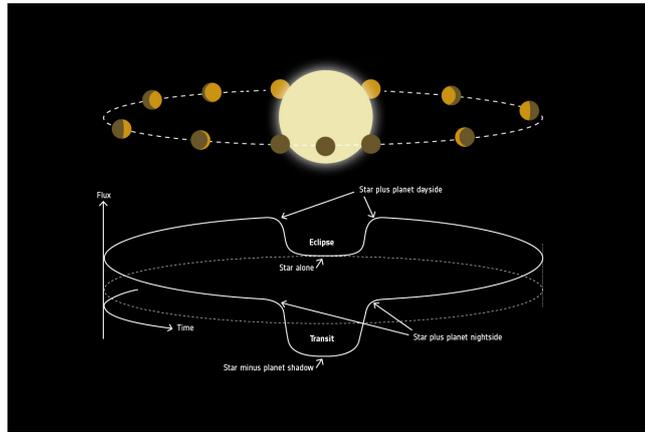


Figura 2.2: Rappresentazione del fenomeno del transito di un esopianeta davanti (eclissi primaria) e dietro (eclissi secondaria) alla sua stella [ESA].

È un metodo molto interessante anche perchè, al passaggio del pianeta, la luce attraversa la sua eventuale atmosfera permettendo una *analisi spettroscopica* della composizione. Non è tuttavia così banale rilevare pianeti con questo metodo difatti si stima che solo 1 pianeta su 100 abbia l'orbita allineata a dovere. Inoltre è richiesto un tempo di osservazione prolungato alle volte per poter confermare la periodicità dell'evento e quindi l'esistenza di un esopianeta. Sfruttando questa tecnica è possibile stimare il raggio del pianeta in questione attraverso

$$\frac{\Delta L}{L_{\star}} = \frac{R_p^2}{R_{\star}^2} \quad (2.4)$$

dove  $\Delta L$  è la variazione in luminosità della curva di luce al passaggio dell'esopianeta. Combinando il metodo dei transiti con quello delle velocità radiali si possono quindi ottenere molte informazioni non solo per confermare ma anche per caratterizzare l'esopianeta scoperto. È in assoluto la tecnica più utilizzata che ha permesso di rilevare più di tre quarti dei pianeti conosciuti (Fig. 2.1), grazie soprattutto alle osservazioni del telescopio **Kepler**, dismesso a fine 2018.

## 2.4 Metodo del microlensing gravitazionale

Secondo la *relatività generale*, quando un oggetto massivo si interpone tra l'osservatore e una sorgente di luce, la radiazione emessa dall'oggetto sorgente viene spostata ed

amplificata attraverso il fenomeno di **microlensing gravitazionale**. L'aumento di luminosità può durare anche dei mesi ed è caratterizzato da un picco quando la sorgente è esattamente allineata alla stella che funge da microlente. Nel caso in cui si interponga anche il pianeta orbitante la lente allineandosi con entrambe le stelle si ha un ulteriore aumento di luminosità, un lieve fenomeno di microlensing, con una durata dell'ordine delle ore. Nella curva di luce questo produce un picco locale attraverso il quale è possibile rilevare esopianeti delle dimensioni terrestri.

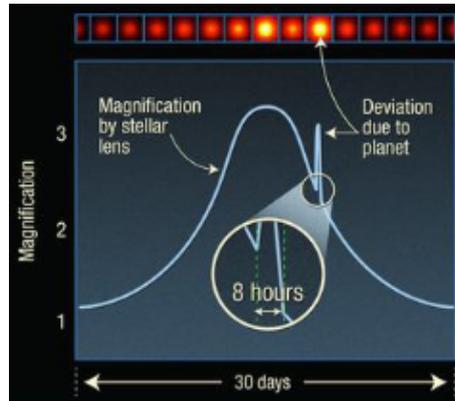


Figura 2.3: Curva di luce di una sorgente che ha subito microlensing gravitazionale da parte di una stella con il passaggio di un pianeta [NASA / ESA / K. Sahu / STScI].

È una tecnica che produce pochi risultati dato che è necessario avere un allineamento poco probabile sorgente-stella-pianeta-osservatore. È tuttavia meno limitato dalla distanza rispetto ai metodi di transito e velocità radiale. Attraverso questo metodo possono inoltre essere rilevati oggetti massivi ma poco luminosi, come le *nane brune* o i *planemi*, corpi che vanno oltre alla definizione della IAU che comprendono anche quegli oggetti definibili pianeti ma che non orbitano una stella e vagano nel cosmo.

## 2.5 Metodo del direct imaging

L'unica tecnica che prova inconfutabilmente la presenza di un esopianeta attorno ad una stella è quello di una immagine diretta di esso. La stella presenta tuttavia ovviamente una luminosità molto maggiore del pianeta (la Terra rispetto al Sole è  $\sim 10^8$  volte più tenue nell'ottico) con il risultato di rendere l'esopianeta praticamente invisibile. Fortunatamente il rapporto tra la luminosità del pianeta e della stella non è costante in tutto lo spettro: i pianeti non emettono nel visibile ma hanno il picco spettrale nell'infrarosso. Pianeti abbastanza massivi come Giove hanno emissioni non trascurabili a quelle lunghezze d'onda e tramite tecniche sofisticate diventano individuabili. Sono ad esempio sfruttate **tecniche interferometriche**: vengono fatti interferire distruttivamente per la stessa stella due flussi provenienti dai due specchi dell'interferometro per "spegnerla", senza influenzare la radiazione proveniente dal pianeta. Si adoperano altrimenti i **coronografi**, attraverso i quali si eclissa artificialmente la stella e si fa spiccare il pianeta. Per entrambi i metodi è necessario avere un flusso stellare ad alta risoluzione per il quale si sfruttano le *ottiche adattive*, campo di ricerca recentissimo che ha migliorato esponenzialmente le osservazioni da terra. Per riuscire a distinguere adeguatamente l'esopianeta è però inoltre necessario che esso si trovi a grandi distanze dalla stella per cui questo metodo è efficace solo per orbite con grandi semiassi maggiori.

## 2.6 Classificazione degli esopianeti

Sfruttando i dati ottenuti dalle osservazioni, sono stati riscontrati pianeti che non esistono nel Sistema Solare. Una categoria molto comune è quella dei **Gioviani Caldi**, pianeti con massa simile a quella di Giove ma che orbitano a distanze estremamente prossime alla loro stella (in certi casi  $d \sim 0.02AU$ ), caratterizzati da periodi molto corti in rotazione sincrona. Probabilmente anche Giove e Saturno erano vicini al Sole (entro la frost line) ai primordi, spostandosi successivamente ad orbite maggiori. In seguito si ha la categoria delle **Super-Terre** o **Mini-Nettuno**, esopianeti più massivi e grandi della Terra ma meno di Nettuno. La maggior parte dei pianeti extrasolari cade in questa categoria in quanto a dimensioni come mostrato in Fig 2.4. Una sottoclasse è quella dei **Pianeti Oceano**, Super-Terre probabilmente formatesi fuori dalla frost line e migrate ad orbite minori. La superficie sarebbe composta da acqua liquida mantenuta tale dalla pressione idrostatica che ne limiterebbe l'evaporazione mentre l'atmosfera comprenderebbe elio, idrogeno e vari suoi composti. Si suppone infine l'esistenza di un **Pianeta di elio**, la cui atmosfera sarebbe appunto formata principalmente da questo gas nobile. Questa è solo la diversità riscontrata studiando il cielo limitatamente ai dintorni del Sole (entro i 3 kpc) e praticamente senza considerare masse e dimensioni minori di quelle terrestri!

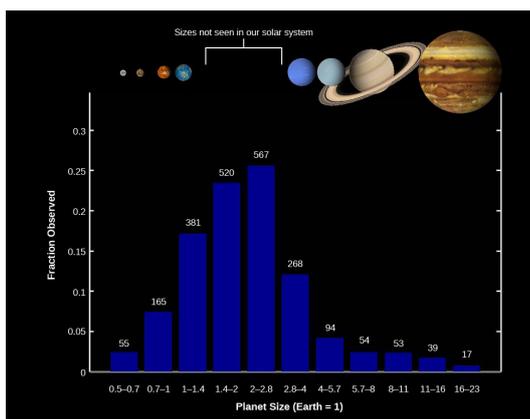


Figura 2.4: Istogramma rappresentativo del numero e della tipologia di esopianeti riscontrati dal telescopio Kepler. Da notare che la frazione di esopianeti più importante è di una tipologia non presente nel Sistema Solare [NASA/Kepler mission].

### 2.6.1 Earth Similarity Index

La ricerca di pianeti esterni si basa anche sulla ricerca della vita nel cosmo. L'unico pianeta che per ora ne mostra traccia è la Terra, la ricerca partirà quindi dalle sue caratteristiche. I pianeti solari ed extrasolari vengono così ulteriormente classificati in base all'**Earth Similarity Index ESI**, un indice di similarità rispetto alla Terra che tiene conto di diversi parametri, tra cui la temperatura superficiale, la composizione del nucleo, la vicinanza alla stella e la sua classificazione spettrale eccetera. È un numero che sta tra 0 (nessuna somiglianza) ed 1 (massima similarità). Marte ha, per esempio,  $ESI \approx 0.7$  mentre l'esopianeta a noi più vicino, *Proxima Centauri b*, presenta un  $ESI \approx 0.87$ , considerabile quindi abbastanza simile alla Terra. Si tratta di un numero non rappresentante realmente la complessità dell'abitabilità di un pianeta ma un esopianeta con ESI basso indica molto probabilmente un ambiente inospitale.

# Appendice A

## Europa, la luna ghiacciata

Europa è la sesta luna per distanza da Giove, dopo la vulcanicamente attiva Io. Dista da esso circa 413 mila chilometri ed ha un raggio equatoriale di 1550 chilometri, leggermente più piccola della Luna. È in blocco mareale con Giove: ci orbita attorno in circa 3.5 giorni mostrandogli sempre la stessa faccia. Se ci dovesse essere vita nel Sistema Solare, il luogo più promettente è proprio Europa, il che la rende estremamente interessante. La sua caratteristica di risalto è sicuramente la presenza di un oceano sotterraneo, secondo le stime più recenti contenente il doppio di acqua della Terra, salato e profondo tra i 60 e i 150 km. La sua superficie è invece ghiacciata, molto riflettente ( $A=0.64$ ) e molto spessa, rendendo quasi impossibile la penetrazione della luce solare al di sotto di essa e quindi l'impossibilità di fotosintesi per un'eventuale forma di vita. La prova più convincente della presenza di un oceano di acqua liquida è il campo magnetico prodotto da Europa: esso è indotto da quello di Giove ed è causato molto probabilmente da correnti elettriche interne al satellite, spiegabili solo attraverso la presenza di acqua liquida con sali disciolti sotto la superficie.

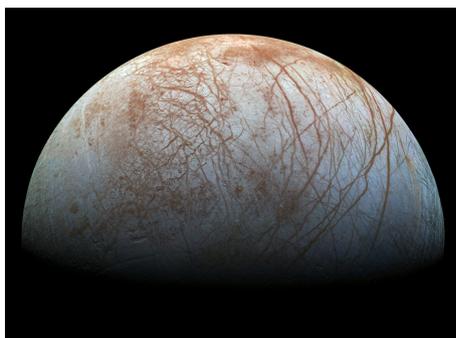


Figura A.1: L'affascinante superficie della luna ghiacciata di Giove Europa, una composizione di immagini prese dalla sonda Galileo a fine anni '90 [NASA/JPL-Caltech/SETI Institute].

Come si può notare nella Fig A.1, la sua superficie è caratterizzata da linee e fratture, causate dalle estreme forze mareali da parte di Giove (Europa ha una eccentricità di 0.009, piccola ma non trascurabile). La faccia rivolta verso il gigante gassoso risente maggiormente della sua attrazione e, dato che l'orbita di Europa non è perfettamente circolare, la distanza orbitale varia. Nel tempo si traduce in un continuo allungamento e rilassamento del satellite. Questo fenomeno genera calore, detto **calore mareale**, ed è essenziale per poter spiegare le grandi quantità di acqua liquida. Un altro requisito

essenziale per lo sviluppo della vita, oltre all'acqua liquida e ad una fonte di energia (calore), è quella della presenza degli appropriati elementi chimici per l'evoluzione biologica. Questi composti prebiotici potrebbero essere forniti dalle fumarole (sorgenti idrotermali) presenti sul fondale. Oltre a fornire composti organici, genererebbero anche una fonte di calore attraverso il **riscaldamento radiogenico**. Si suppone infatti che il nucleo di Europa sia effettivamente roccioso, presentando molti radioisotopi che, decadendo, rilasciano calore. È stato confermato che su Europa è attivo il **criovulcanismo**, ovvero la fuoriuscita di acqua e sostanze al di fuori della superficie tramite geysers. Se si potessero studiare questi getti sarebbe possibile verificare tracce dei minerali o direttamente biosignature. Sono programmate ad oggi due missioni spaziali che coinvolgono Europa: la missione NASA *Europa Clipper* ed ESA *JUICE* (JUperiter ICy moons Explorer). La risonanza che Europa ha con Io e Ganimede attorno a Giove mantiene la sua eccentricità tale. Questo fenomeno perdura probabilmente dalla loro formazione, permettendo ad eventuali forme di vita di nascere e proliferare. Il ritrovamento della vita su Europa e la dimostrazione che si è sviluppata indipendentemente da quella sulla Terra avrebbe un risvolto significativo per l'astrobiologia e per tutto il pensiero contemporaneo, portando l'attenzione sulla ricerca della vita (intelligente) nel resto del cosmo.

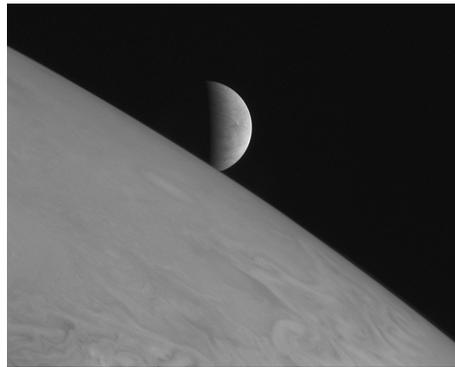


Figura A.2: Sorgere di Europa da dietro le nubi gioviane [NASA, New Horizons]

# Bibliografia

- [1] Cimatti A., *Dispense del corso Astronomia*, AA 2018/2019
- [2] Karttunen H., Kroger P., Oja H., Poutanen M., Donner K. J. (Eds.), *Fundamental Astronomy*, quinta edizione, Springer 2007
- [3] Orosei R., *Dispense del corso Astrobiologia Modulo 2*, AA 2020/2021
- [4] Maestri T., *Dispense del corso Atmosfere Planetarie Modulo 1*, AA 2020/2021
- [5] Asi Agenzia Spaziale Italiana, *Grande Guida all'Astronomia*, Libreria Geografica 2018
- [6] Mackowiak B., *La Ricerca degli Esopianeti*, Libreria Geografica 2018
- [7] Sito Internet Nasa Science, <https://science.nasa.gov/>
- [8] Sito Internet Nasa Exoplanet Science Institute NExSci, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>