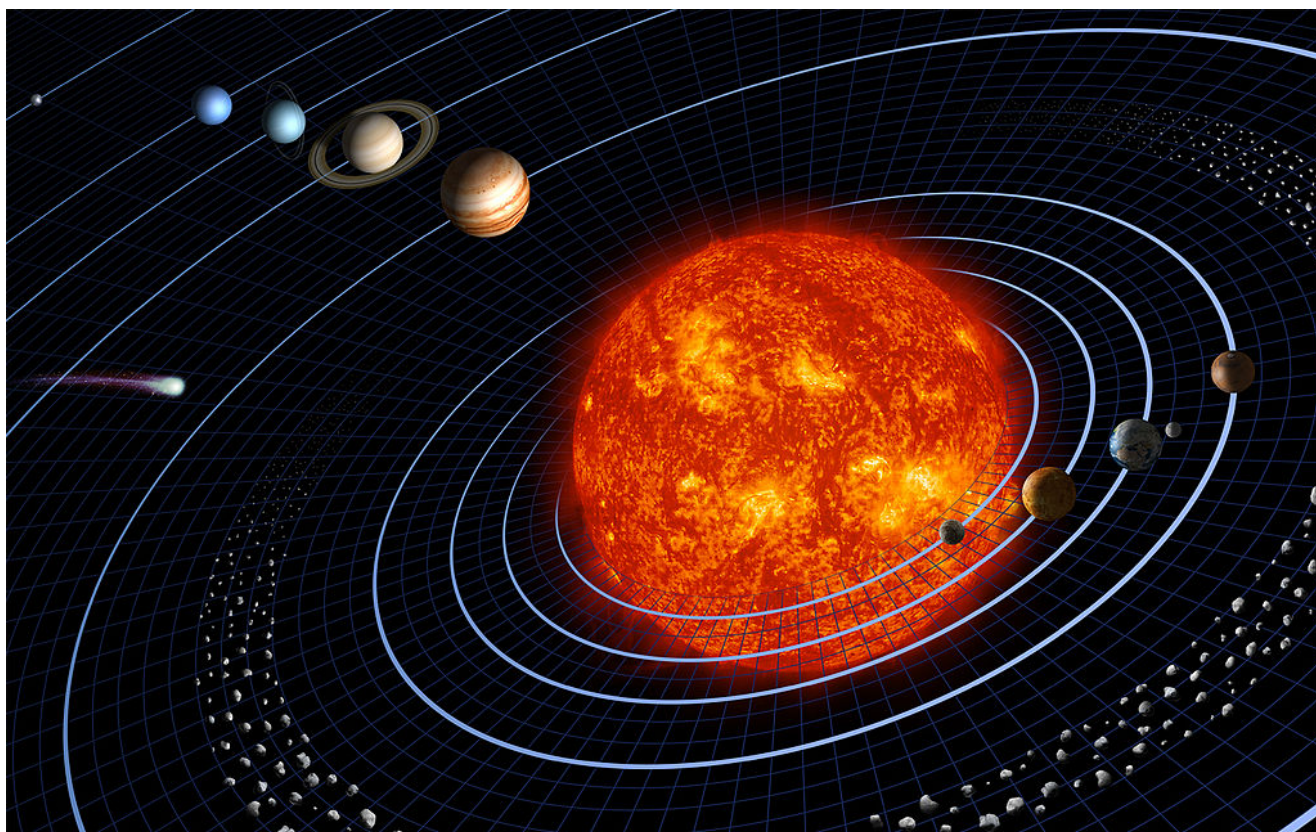


## ***Il Sistema Solare***

Il sistema solare è un sistema planetario costituito da una varietà di corpi celesti mantenuti in orbita dalla forza gravitazionale del Sole, cui appartiene anche la Terra: con un diametro di circa 120-130 UA, se inteso come la zona dello spazio che è sottoposta al vento solare, tralasciando l'immensa zona sottoposta alla sola gravità solare, è situato nel braccio di Orione della Via Lattea, orbitando attorno al centro galattico ad una distanza di 30.000 al ed una velocità di 230 km/s; si stima che il sistema solare impieghi circa 230 milioni di anni per completare un giro attorno al centro galattico. È costituito dal Sole, che da solo possiede il 99,86% della poderosità di tutto il sistema, da otto pianeti, quattro pianeti rocciosi interni e quattro giganti gassosi esterni, e cinque pianeti nani, dai rispettivi satelliti naturali, e da moltissimi altri corpi minori; quest'ultima categoria comprende gli asteroidi, in gran parte ripartiti fra due cinture asteroidali, la fascia principale e la fascia di Kuiper, le comete prevalentemente situate nell'ipotetica nube di Oort, i meteoroidi e la polvere interplanetaria. In ordine di distanza dal Sole, gli otto pianeti sono: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno; i cinque pianeti nani sono: Cerere, situato nella fascia principale degli asteroidi, Plutone, Haumea, Makemake, e Eris. Il vento solare, un flusso di plasma generato dall'espansione continua della corona solare, permea l'intero sistema solare, creando una bolla nel mezzo interstellare conosciuta come eliosfera, che si estende fino oltre alla metà del disco diffuso.



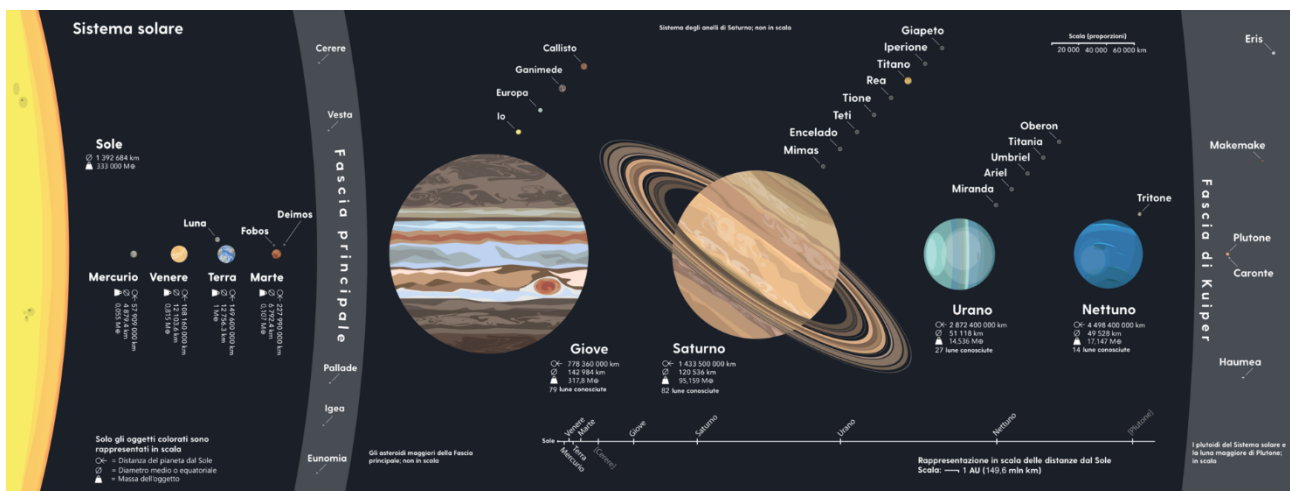
**Raffigurazione artistica del sistema solare; le dimensioni dei pianeti e le distanze non sono in scala.**

## Storia delle Osservazioni

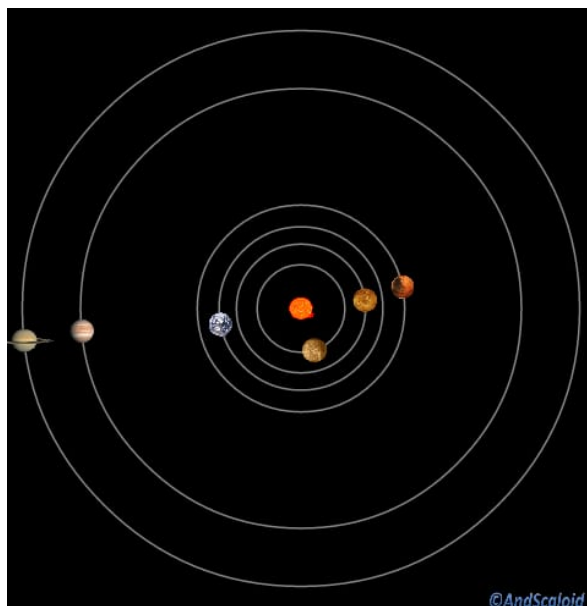
Sebbene molti dei maggiori corpi celesti del sistema solare fossero già conosciuti sin dai tempi dell'antichità, il concetto stesso era ignorato in quanto vigeva per lo più un'idea di sistema geocentrico con la Terra al centro dell'universo. Uno dei primi a immaginare un sistema eliocentrico fu Aristarco di Samo, ma le sue idee non presero piede nella comunità dei filosofi e pensatori di allora. Fu solo nel XVI secolo che Niccolò Copernico propose la visione moderna del sistema solare, con al centro il Sole e i pianeti conosciuti allora a orbitare intorno. Gli unici corpi del sistema solare conosciuti erano però solamente i quattro pianeti terrestri, Mercurio, Venere e Marte e due giganti Giove e Saturno, il Sole e la Luna. Nel secolo successivo, con l'invenzione del telescopio di Galileo Galilei, vennero scoperti altri corpi minori, come i satelliti medicei, gli anelli di Saturno e alcune comete e per circa 200 anni non si pensava che potessero esserci altri oggetti nel sistema solare, in particolare era ferma la convinzione che i pianeti fossero solo quelli allora conosciuti. Nel 1781, la scoperta di Urano da parte di William Herschel mise in discussione i preconcetti che la comunità scientifica aveva, generando dubbi relativamente alla possibilità che esistessero pianeti transuranici. Pochi anni dopo, nel 1801, Giuseppe Piazzi dichiarò di aver scoperto un nuovo pianeta, tra le orbite di Marte e Giove; si trattava in realtà di Cerere. La conclusione avvenne escludendo che potesse trattarsi di una cometa e non conoscendo altri oggetti diversi da pianeti e comete, del tutto ignaro che avesse scoperto un nuovo tipo di oggetto, l'asteroide. Da allora le scoperte di nuovi oggetti si moltiplicarono, in particolare vennero scoperti tanti nuovi asteroidi. Nel 1846 venne scoperto un pianeta in modo del tutto rivoluzionario: prima dell'osservazione diretta, si calcolarono le perturbazioni dell'orbita di Urano e se ne dedusse che doveva esistere un pianeta in un punto preciso dello spazio per giustificare le discrepanze osservate. Pochi giorni dopo, Johann Gottfried Galle e Heinrich Louis d'Arrest confermarono la presenza di Nettuno a meno di un grado di distanza dal punto calcolato. Nel 1930, la scoperta di Plutone aumentò il numero di pianeti conosciuti a nove, ritenuto allora un oggetto di massa molto maggiore di quanto effettivamente sia. Negli anni '50 Jan Oort ipotizzò l'esistenza di un vivaio di comete ben al di là delle orbite dei pianeti conosciuti, situato a decine di migliaia di UA dal Sole, la nube di Oort, che quando venivano perturbate modificavano consistentemente la propria orbita fino ad arrivare nella zona interna del sistema. Nel 1992, la scoperta di Albion riavviò la ricerca di oggetti transnettuniani. L'avvento di sistemi automatici di ricerca permise la scoperta di migliaia di oggetti dal diametro tra i 50 e 2500 km. La scoperta di Eris, di dimensioni simili a Plutone, nel 2005 mise in discussione la stessa definizione di pianeta, che fu cambiata e formalizzata nel 2006 dall'Unione Astronomica Internazionale, declassando Plutone a pianeta nano e riportando a otto il numero totale di pianeti.

## Struttura

Il principale corpo celeste del sistema solare è il Sole, una stella della sequenza principale di classe spettrale G2 V nana gialla, contenente il 99,86% di tutta la massa conosciuta nel sistema solare. Giove e Saturno, i due pianeti più massicci che orbitano attorno al Sole, costituiscono più del 90% della massa restante. La maggior parte dei grandi oggetti in orbita intorno al Sole sono in un piano simile a quello dell'orbita terrestre, chiamata eclittica. Tipicamente, il piano di orbita dei pianeti è molto vicino a quello dell'eclittica mentre le comete e gli oggetti della cintura di Kuiper hanno un angolo significativamente maggiore rispetto al nostro. Tutti i pianeti e la maggior parte degli altri oggetti orbitano nello stesso senso della rotazione del Sole, in senso antiorario dal punto di vista di un osservatore situato al di sopra del polo nord solare. Certi oggetti orbitano in un senso orario, come la cometa di Halley. Le traiettorie degli oggetti che gravitano intorno al sole seguono le leggi di Keplero. Sono approssimativamente delle ellissi di cui uno dei fuochi è il Sole. Le orbite dei pianeti sono quasi circolari mentre quelle dei corpi più piccoli presentano una maggiore eccentricità e possono risultare molto ellittiche. La distanza di un corpo dal Sole varia durante la sua rivoluzione. Il punto più vicino al sole dell'orbita di un corpo si chiama perielio, mentre il più lontano è l'afelio. Il sistema solare è convenzionalmente diviso in due zone. Il sistema solare interno include i quattro pianeti rocciosi e la cintura di asteroidi. Il resto del sistema viene considerato sistema solare esterno. La maggioranza dei pianeti del sistema solare possiede dei corpi in rotazione intorno ad essi, chiamati satelliti naturali o lune. I quattro pianeti più grandi hanno anche degli anelli planetari.



**Il sistema solare; i pianeti sono raffigurati in scala per grandezza, mentre la scala delle distanze è fornita in basso a destra. Sono indicati inoltre i 5 asteroidi più massicci, i plutoidi e le lune maggiori.**



**Rappresentazione dei pianeti visibili ad occhio nudo il 1° aprile 1981: a parte Mercurio gli altri erano allineati**

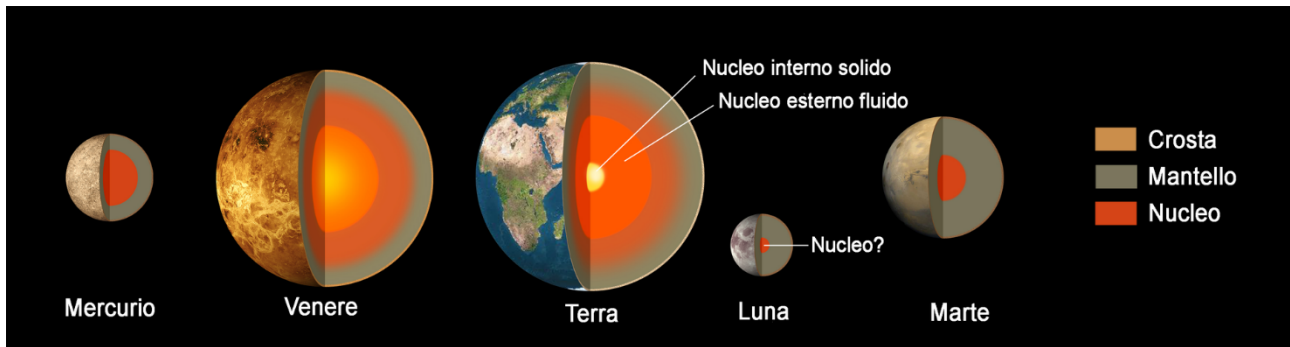
## Composizioni

Gli elementi chimici che predominano nel sistema solare sono idrogeno ed elio primordiali, concentrati per lo più nel Sole, dove la loro massa costituisce circa il 98%, e nei due pianeti più grandi, Giove e Saturno. In minori percentuali, sono presenti tutti gli elementi della tavola periodica nelle loro forme stabili e nei principali isotopi. Fisicamente, quasi tutti i corpi si trovano in rotazione attorno al centro di massa del sistema nella stessa direzione, contribuendo in modo differente al momento angolare del sistema solare; stranamente, il Sole, nonostante la sua notevole massa, contribuisce solo allo 0,5% del momento angolare totale, essendo molto vicino al baricentro.

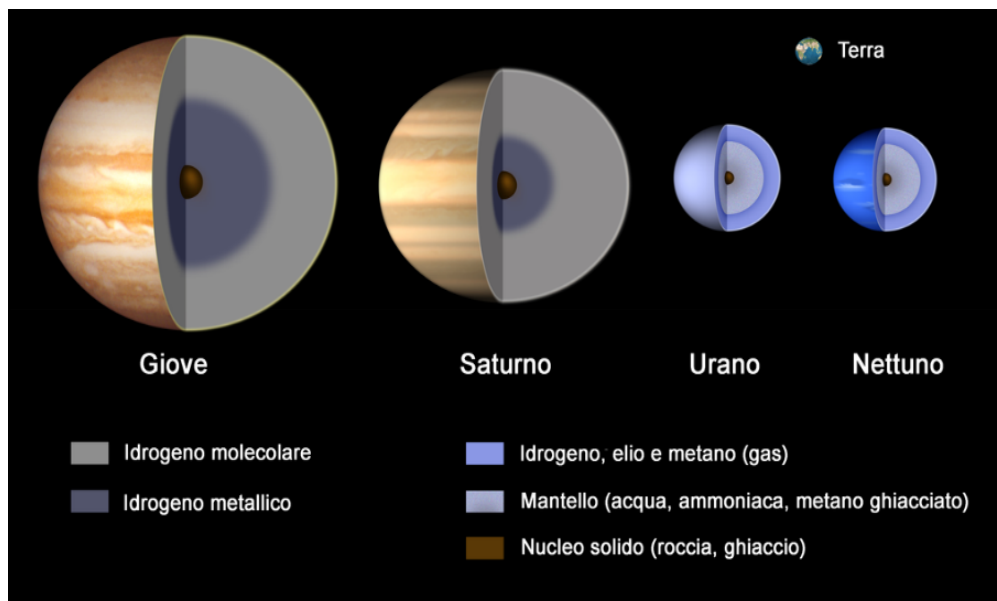
## Pianeti Terrestri e Gioviani

I pianeti sono molto diversi l'uno dall'altro per composizione chimica, dimensioni, temperatura e altre caratteristiche. In base alle caratteristiche chimico fisiche i pianeti possono essere distinti in due gruppi: i pianeti di tipo terrestre Mercurio, Venere, Terra e Marte, cioè simili alla Terra, e i giganti gassosi o pianeti di tipo gioviano Giove, Saturno, Urano, Nettuno, cioè simili a Giove. Le differenze tra i due tipi di pianeti sono numerose: innanzitutto i pianeti terrestri hanno tutti una massa piccola, nessuno o pochi satelliti e bassa velocità di rotazione, mentre i pianeti gioviani hanno grande massa, diversi satelliti ed elevata velocità di rotazione. Per questo motivo i pianeti gioviani hanno un rigonfiamento equatoriale maggiore, e quindi una forma più schiacciata ai poli rispetto a quelli terrestri. Inoltre, i pianeti terrestri hanno una densità che è in media da 3,9 a 5,5 volte quella dell'acqua, mentre la densità dei pianeti gioviani è solo da 0,7 a 1,7 volte quella dell'acqua. Esaminando la loro composizione, si è notato che i pianeti di tipo terrestre sono essenzialmente costituiti da materiali roccia e metallo; i pianeti di tipo gioviano, invece, sono costituiti per lo più da elio, idrogeno e piccole quantità di ghiaccio. L'atmosfera dei pianeti terrestri è rarefatta, al contrario di quelli gioviani in cui l'atmosfera è molto densa, ed è costituita da idrogeno, elio, ammoniaca e metano. La temperatura e le sue variazioni annue e giornaliere sono più elevate nei pianeti terrestri, e dipendono da numerosi fattori: distanza dal Sole, densità e composizione dell'atmosfera e inclinazione dell'asse di rotazione.





La struttura interna dei pianeti rocciosi.



La struttura interna dei pianeti gioviani

## Pianeti nani o corpi minori

Tra Marte e Giove si trova la cosiddetta fascia principale degli asteroidi, composta da milioni di oggetti rocciosi caratterizzati da orbite più o meno variabili. Fra di essi, Cerere è attualmente ritenuto l'unico a presentare un equilibrio idrostatico ovvero una forma sferoidale e a meritarsi la qualifica di pianeta nano. Oltre Nettuno si stende un'altra fascia di asteroidi, la fascia di Kuiper, la cui densità effettiva è sconosciuta. Tra questi si trovano Plutone ed Eris, che dal 2006 sono riconosciuti come pianeti nani dall'Unione Astronomica Internazionale. In precedenza, Plutone era considerato il nono pianeta. Sono stati successivamente riconosciuti pianeti nani più distanti di Plutone, come Makemake e Haumea. Ancora più esternamente, tra 20.000 UA e 100.000 UA di distanza dal Sole, si ipotizza si trovi la nube di Oort, ritenuta il luogo d'origine delle comete. Il Sistema Solare comprende altri corpi come i satelliti, che orbitano attorno ai pianeti, e le comete, che ruotano attorno al Sole e hanno un'orbita molto eccentrica e piani orbitali di solito molto inclinati rispetto all'eclittica. Sono presenti anche polveri e gas molto rarefatti concentrati attorno all'eclittica, che diffondono la radiazione solare dando origine alla luce zodiacale.



I 12 corpi indicati come potenziali pianeti secondo la prima bozza di proposta dell'UAI. Da notare che i primi due, Haumea e Makemake, sono stati in seguito identificati come pianeti nani.

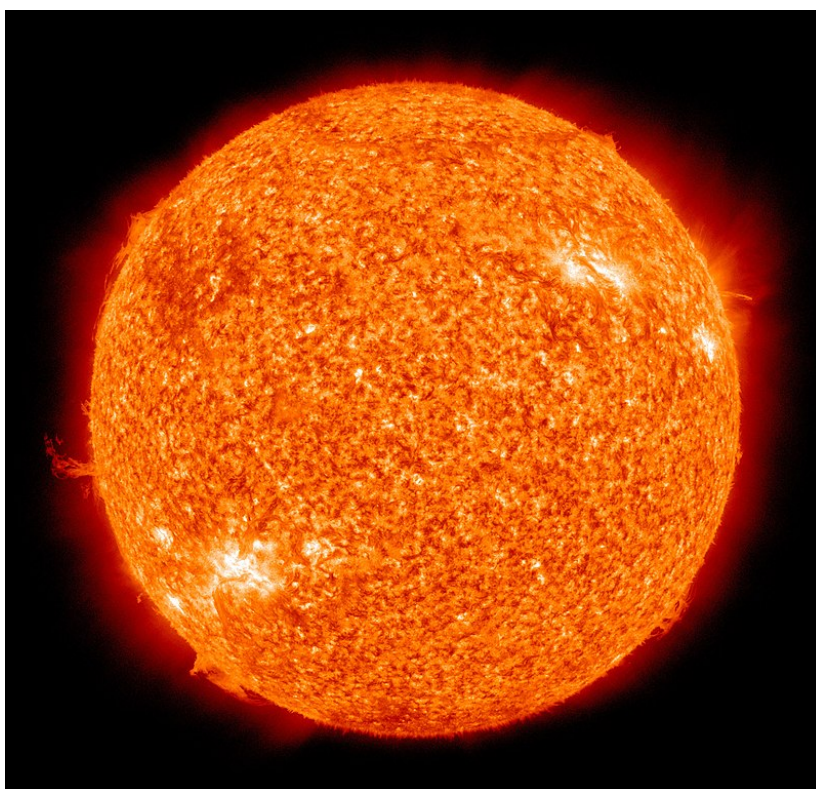


I 5 Pianeti nani

## Il Sole

Il Sole è la stella madre del sistema solare, attorno alla quale orbitano gli otto pianeti principali tra cui la Terra, i pianeti nani, i loro satelliti, innumerevoli altri corpi minori e la polvere diffusa per lo spazio, che forma il mezzo interplanetario. La massa del Sole, che ammonta a circa  $2 \times 10^{30}$  kg, rappresenta da sola il 99,86% della massa complessiva del Sistema Solare. Il Sole è una stella di dimensioni medio-piccole costituita principalmente da idrogeno, circa il 74% della sua massa, il 92,1% del suo volume, ed elio, circa il 24-25% della massa, il 7,8% del volume, cui si aggiungono altri elementi più pesanti presenti in tracce. È classificato come una nana gialla di tipo spettrale G2 V: G2 indica che la stella ha una temperatura superficiale di 5777 K **5504 °C**, caratteristica che le conferisce un colore bianco estremamente intenso e cromaticamente freddo che però spesso può apparire giallognolo a causa della diffusione luminosa nell'atmosfera terrestre, in ragione dell'elevazione dell'astro sull'orizzonte e non dimeno della limpidezza atmosferica. La V = 5 in numeri romani, indica che il Sole, come la maggior parte delle stelle, è nella sequenza principale, ovvero in una lunga fase di equilibrio stabile

in cui l'astro fonde, nel proprio nucleo, l'idrogeno in elio. Tale processo genera ogni secondo una grande quantità di energia equivalente a una potenza di  $3,9 \times 10^{26}$  W emessa nello spazio sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, radiazioni solari, flusso di particelle, vento solare, e neutrini. La radiazione solare, emessa fondamentalmente come luce visibile ed infrarossi, consente la vita sulla Terra fornendo l'energia necessaria ad attivare i principali meccanismi che ne stanno alla base; inoltre l'insolazione della superficie terrestre regola il clima e la maggior parte dei fenomeni meteorologici. Collocato all'interno del Braccio di Orione, un braccio secondario della spirale galattica, il Sole orbita attorno al centro della Via Lattea ad una distanza media di circa 26.000 anni luce e completa la propria rivoluzione in 225-250 milioni di anni. Tra le stelle più vicine, poste entro un raggio di 17 anni luce, il Sole è la quinta più luminosa in termini intrinseci: la sua magnitudine assoluta, infatti, è pari a +4,83. Se fosse possibile osservare la nostra stella da  $\alpha$  Centauri, il sistema stellare più vicino, essa apparirebbe nella costellazione di Cassiopea con una magnitudine apparente di 0,5.

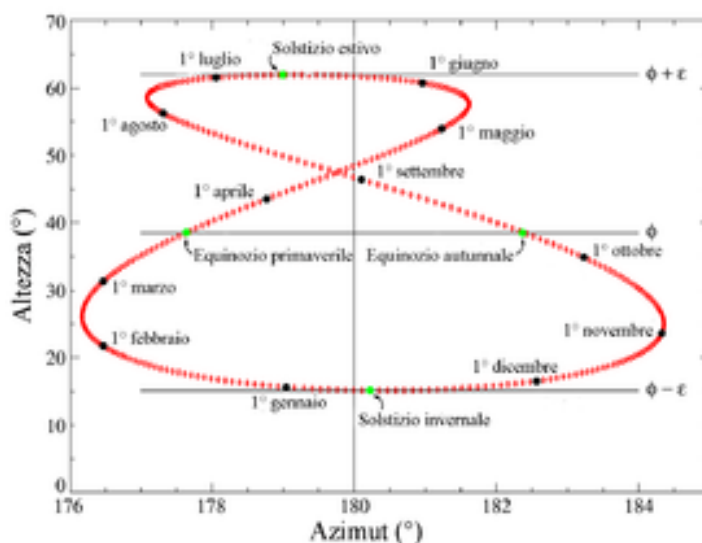


**Il Sole ripreso in falsi colori dal Solar Dynamics Observatory della NASA nella banda dell'ultravioletto.**

## **Osservazioni**

Il Sole è l'unica stella la cui forma possa essere apprezzata semplicemente alla vista, grazie al suo diametro angolare apparente medio di  $32' 03''$  d'arco, che varia però a seconda del punto in cui la Terra si trova nel corso della sua orbita: raggiunge infatti il valore massimo  $32' 35''$  quando il nostro pianeta si trova al perielio, mentre il valore minimo  $31' 31''$  all'afelio. Simili dimensioni apparenti consentono, previo l'utilizzo di particolare strumentazione ed adeguate protezioni, di osservare i dettagli della superficie della nostra stella allo scopo di rivelare e studiare i fenomeni che la caratterizzano. A occhio nudo è possibile distinguere il disco solare al tramonto o in presenza di nebbia e nubi, quando l'intensità luminosa è sensibilmente minore. Tali osservazioni permettono, seppure in rare circostanze, di osservare delle macchie solari particolarmente estese. Utilizzando poi un modesto telescopio, dotato di un adeguato filtro o utilizzato in modo da proiettare l'immagine della stella su uno schermo bianco, è possibile osservare agevolmente le macchie solari e i brillamenti. Tuttavia, a causa dei rischi a cui è soggetta la retina dell'occhio, l'osservazione del Sole senza le giuste protezioni è dannosa alla vista: infatti, la forte radiazione può provocare la morte di parte delle cellule della retina, deputate alla visione, oppure la degenerazione di alcune strutture oculari, come il cristallino. La combinazione delle dimensioni e della distanza dalla Terra del Sole e della Luna è tale

che i due astri si presentano nel cielo pressappoco col medesimo diametro apparente; tale situazione è all'origine di periodiche occultazioni della stella da parte del nostro unico satellite naturale, che prendono il nome di eclissi solari; le eclissi totali, in particolare, consentono di visualizzare la corona solare e le protuberanze. Un'altra osservazione riguarda il suo moto apparente nella volta celeste. Tale moto nell'arco della giornata è sfruttato nella scansione delle ore, con l'aiuto di strumenti preposti come le meridiane. Inoltre, la stella sembra compiere in un anno un tragitto lungo la fascia zodiacale che varia di giorno in giorno. La traiettoria descritta dal Sole, rilevata determinando la sua posizione alla stessa ora ogni giorno durante l'anno, prende il nome di analemma ed ha una forma somigliante al numero 8, allineato secondo un asse nord-sud. La variazione della declinazione solare annua in senso nord-sud è di circa  $47^\circ$  per via dell'inclinazione dell'asse terrestre rispetto all'eclittica di  $66^\circ 33'$ , causa fondamentale dell'alternarsi delle stagioni; vi è anche una piccola variazione in senso est-ovest causata dalla differente velocità orbitale della Terra, che, nel rispetto delle leggi di Keplero, è massima al perielio e minima all'afelio.

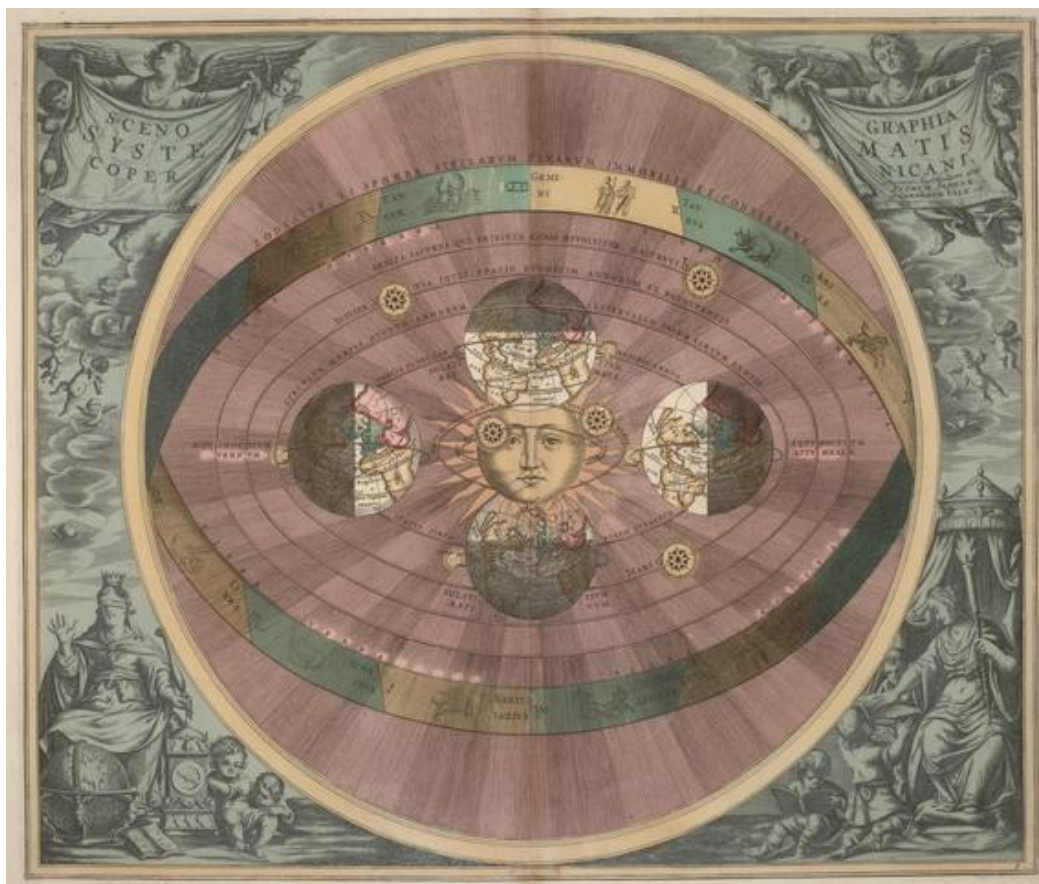


## Sviluppo di una conoscenza scientifica moderna

Una delle prime spiegazioni scientifiche sul Sole venne fornita dal filosofo greco Anassagora. Questi lo immaginava come una grande sfera di metallo infiammato più grande del Peloponneso e riteneva impossibile che potesse esser trascinato dal carro del dio Elio. Per aver insegnato questa dottrina, considerata eretica, venne accusato dalle autorità di empietà, imprigionato e condannato a morte, venne però in seguito rilasciato per intervento di Pericle. Eratostene di Cirene, probabilmente, fu il primo a calcolare accuratamente la distanza della Terra dal Sole, nel III secolo a.C.; secondo quanto tramandoci da Eusebio di Cesarea, egli calcolò la distanza dalla nostra stella in *stadiōn myriadas tetrakosias kài oktōkismyrias*, ovvero 804 milioni di stadi, equivalenti a 149 milioni di chilometri: un risultato sorprendentemente molto simile a quello attualmente accettato, da cui differisce di appena l'1%. Un altro scienziato che sfidò le credenze del suo tempo fu Niccolò Copernico, che nel XVI secolo riprese e sviluppò la teoria eliocentrica, che considerava il Sole al centro dell'Universo, già postulata nel II secolo a.C. dallo scienziato greco Aristarco di Samo. È grazie anche all'opera di importanti scienziati del XVII secolo, come Galileo



Galilei, Cartesio e Newton, che il sistema eliocentrico arrivò, infine, a prevalere su quello geocentrico. Galileo fu inoltre il pioniere dell'osservazione solare, grazie al cannocchiale; lo scienziato pisano scoprì nel 1610 le macchie solari, e confutò una presunta dimostrazione dello Scheiner che esse fossero oggetti transitanti tra la Terra ed il Sole piuttosto che presenti sulla superficie solare. Isaac Newton, il padre della legge di gravitazione universale, osservò la luce bianca solare attraverso un prisma, dimostrando che essa era composta da un gran numero di gradazioni di colore, mentre verso la fine del XVIII secolo William Herschel scoprì la radiazione infrarossa, presente oltre la parte rossa dello spettro solare.

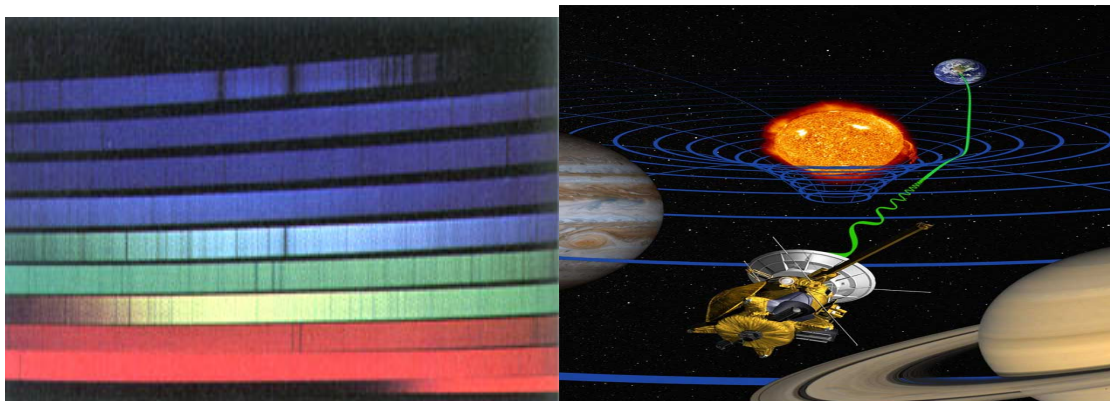


Il cosmo secondo la concezione eliocentrica di Copernico.

## Nell'ottocento e novecento

Nel XIX secolo la spettroscopia conseguì enormi progressi: Joseph von Fraunhofer, considerato il padre di questa disciplina, effettuò le prime osservazioni delle linee di assorbimento dello spettro solare, che attualmente vengono chiamate, in suo onore, linee di Fraunhofer. Nei primi anni dell'era scientifica moderna gli scienziati si interrogavano su quale fosse la causa dell'energia solare. William Thomson, il barone Kelvin, ipotizzò che il Sole fosse un corpo liquido in graduale raffreddamento, che emetteva nello spazio la sua riserva interna di calore; l'emissione energetica venne spiegata da Kelvin e Hermann von Helmholtz attraverso la teoria detta meccanismo di Kelvin-Helmholtz, secondo la quale l'età del Sole era di 20 milioni di anni: un valore nettamente inferiore ai 4,6 miliardi di anni suggeriti per il nostro pianeta dagli studi geologici. Nel 1890 Joseph Norman Lockyer, scopritore dell'elio nello spettro solare, suggerì che la stella si fosse formata dalla progressiva aggregazione di frammenti rocciosi simili alle meteore. Una possibile soluzione alla discrepanza tra il dato di Kelvin-Helmholtz e quello geologico arrivò nel 1904, quando Ernest Rutherford suggerì che l'energia del Sole potesse essere originata da una fonte interna di calore, generata da un meccanismo di decadimento radioattivo. Fu tuttavia Albert Einstein a fornire lo spunto decisivo sulla questione, con la sua relazione massa-energia  $E=mc^2$ . Lo stesso Einstein riuscì a dimostrare tra il 1905 ed il 1920 la ragione del particolare moto orbitale di Mercurio,

attribuita inizialmente alle perturbazioni di un pianeta più interno, chiamato dagli astronomi Vulcano. Einstein suppose che il particolare moto del pianeta non fosse dovuto ad alcuna perturbazione planetaria, bensì al campo gravitazionale del Sole, la cui enorme massa genera una curvatura dello spazio-tempo. L'entità della curvatura dipenderebbe dalla relazione: dove " $G$ " è la costante di gravitazione universale " $M$ " è la massa del corpo " $R$ " indica la deflessione dei raggi misurata in gradi è " $c^2$ " è la velocità della luce nel vuoto. Tale curvatura sarebbe dunque responsabile della precessione del perielio del pianeta e della lieve deflessione che la luce e qualunque altra radiazione elettromagnetica, in conseguenza della teoria della relatività generale, subirebbe in prossimità del campo gravitazionale del Sole. Si è calcolato che la curvatura spaziotemporale provocherebbe uno spostamento nella posizione di una stella pari a 1,7 secondi d'arco. Nel 1919 il fisico inglese Arthur Eddington confermò la teoria in occasione di un'eclissi. L'anno successivo il fisico inglese ipotizzò che l'energia solare fosse il risultato delle reazioni di fusione nucleare, causate dalla pressione e dalla temperatura interna del Sole, che trasformerebbero l'idrogeno in elio e produrrebbero energia a causa della differenza di massa. La teoria venne ulteriormente sviluppata negli anni trenta dagli astrofisici Subrahmanyan Chandrasekhar e Hans Bethe; quest'ultimo studiò nei dettagli le due principali reazioni nucleari che producono energia nelle stelle, ovvero la catena protone-protone ed il ciclo del carbonio-azoto, calcolando il quantitativo energetico sviluppato da ciascuna reazione. Nel 1957 venne poi pubblicato un articolo, intitolato *Synthesis of the Elements in Stars*, in cui veniva proposto un modello consistente con i dati a disposizione, e a tutt'oggi valido, secondo il quale la maggior parte degli elementi nell'Universo furono creati dalle reazioni nucleari all'interno delle stelle, a eccezione di idrogeno, elio e litio, formatisi in massima parte durante la nucleosintesi primordiale e dunque già presenti in notevole quantità prima che si formassero le prime stelle.

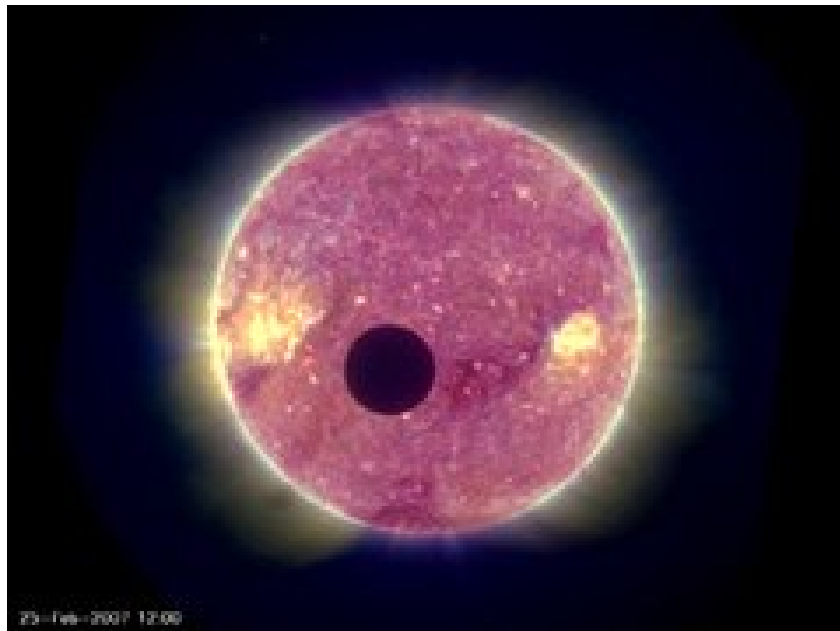


Le linee di Fraunhofer nello spettro solare deflessione da parte del campo gravitazionale del Sole

## Missioni Spaziali

Con l'avvento, nei primi anni cinquanta, dell'era spaziale e l'inizio delle esplorazioni del sistema solare, numerose sono state le sonde appositamente progettate per studiare la nostra stella. I primi satelliti progettati per osservare il Sole furono i Pioneer 5, 6, 7, 8 e 9 della NASA, lanciati tra il 1959 e il 1968. Le sonde orbitarono attorno al Sole ad una distanza di poco inferiore a quella dell'orbita terrestre ed effettuarono le prime misure dettagliate del vento e del campo magnetico solare. La sonda Pioneer 9 operò per molto tempo, trasmettendo dati fino al 1987. Negli anni settanta la sonda Helios 1 e la stazione spaziale Skylab fornirono agli scienziati nuovi e significativi dati sull'emissione del vento solare e sulla corona. Ulteriori dati sono stati forniti dalla sonda della NASA Solar Maximum Mission, lanciata nel 1980, che aveva lo scopo di osservare le radiazioni ultraviolette, i raggi gamma ed X emanati dai flare solari durante il periodo di massima attività. Gli anni novanta videro il lancio di numerose sonde, come la giapponese Yohkoh 1991, progettata per osservare i flare solari alle lunghezze d'onda dei raggi X, e la Solar and Heliospheric Observatory SOHO, 1995, frutto della collaborazione tra ESA e NASA; quest'ultima in particolare ha garantito sin dal suo lancio una costante osservazione della

nostra stella in gran parte delle lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, permettendo anche la scoperta di un gran numero di comete radenti. Queste sonde hanno tuttavia effettuato osservazioni dettagliate solamente delle regioni equatoriali del Sole, visto che le loro orbite erano situate sul piano dell'eclittica. La sonda Ulysses venne invece progettata per studiare le regioni polari, operando anche misurazioni del vento solare e dell'intensità del campo magnetico. Lanciata nel 1990, la Ulysses fu inizialmente diretta verso Giove in modo da sfruttare l'effetto fionda gravitazionale del gigante gassoso ed allontanarsi dal piano delle orbite planetarie. Nel 1998 fu lanciata la sonda TRACE, finalizzata ad individuare le connessioni tra il campo magnetico della stella e le strutture di plasma associate, grazie anche all'ausilio di immagini ad alta risoluzione della fotosfera e della bassa atmosfera del Sole. A differenza della fotosfera, ben studiata attraverso la spettroscopia, la composizione interna del Sole è poco conosciuta. La missione Genesis fu progettata per prelevare dei campioni di vento solare e avere una misura diretta della composizione della materia costituente la stella. Nel 2006 è stata lanciata la missione **Solar Terrestrial Relations Observatory STEREO**, che consiste di due navicelle identiche poste in orbite che permettono di ottenere una visione stereoscopica della stella.



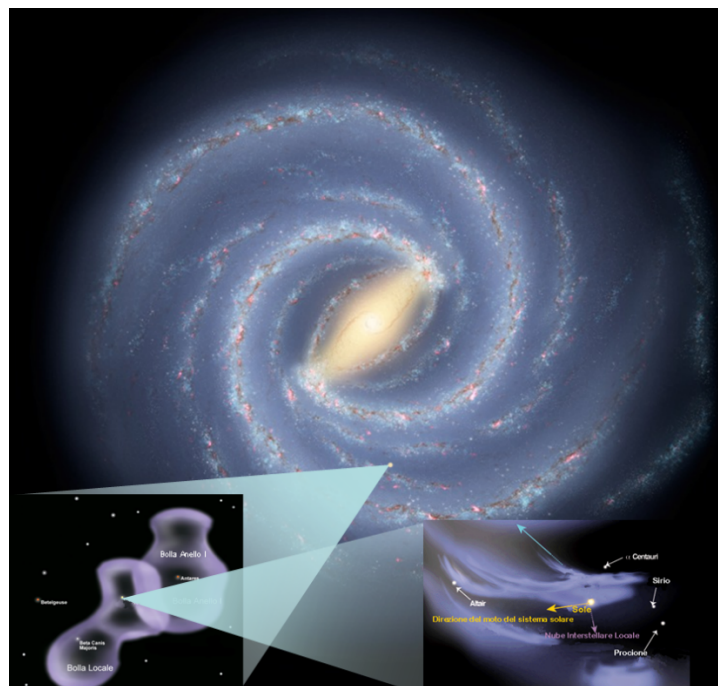
**Un transito della Luna davanti al Sole catturato durante il rodaggio delle camere ad ultravioletti delle sonde STEREO.**

### **Posizione all'interno della Galassia**

Il Sole orbita a una distanza dal centro della Via Lattea stimata in 26.000 anni luce 7,62 kpc. La stella è situata in una regione periferica della Galassia, più precisamente all'interno della Bolla Locale, una cavità nel mezzo interstellare della Cintura di Gould, collocata nel bordo più interno del Braccio di Orione, un braccio galattico secondario posto tra il Braccio di Perseo e il Braccio del Sagittario; i due bracci sono separati da circa 6.500 anni luce di distanza. La nostra stella si trova attualmente nella Nube Interstellare Locale, un addensamento del mezzo interstellare dovuto all'unione della Bolla Locale con l'adiacente Bolla Anello I. Data la relativa lontananza dal centro galattico, da altre regioni ad elevata densità stellare e da forti sorgenti di radiazioni quali pulsar o oggetti simili, il Sole, e dunque il sistema solare, si trova in quella che gli scienziati definiscono zona galattica abitabile. Il sistema solare impiega 225–250 milioni di anni per



completare una rivoluzione attorno al centro della Galassia anno galattico; perciò il Sole avrebbe completato 20–25 orbite dal momento della sua formazione ed 1/1250 di orbita dalla comparsa dell'essere umano sulla Terra. La velocità orbitale della nostra stella è di circa 220 km/s; a questa velocità il Sistema Solare impiega circa 1 400 anni per percorrere la distanza di un anno-luce, ossia 8 giorni per percorrere una unità astronomica UA. La direzione apparente verso cui si muove la nostra stella durante la propria rivoluzione attorno al centro di massa della Galassia prende il nome di apice solare e punta verso la stella Vega e la costellazione di Ercole, con un'inclinazione di circa 60° in direzione del centro galattico. Si ritiene che l'orbita del Sole abbia una forma ellittica quasi circolare, tenendo conto delle perturbazioni causate dalla diversa distribuzione delle masse nei bracci della spirale galattica; inoltre il Sole oscilla al di sopra e al di sotto del piano galattico mediamente 2,7 volte ogni orbita, secondo un andamento assimilabile ad un moto armonico. Poiché la densità stellare è piuttosto alta nel piano galattico e nei suoi pressi, tali oscillazioni coincidono spesso con un incremento nel tasso degli impatti meteoritici sulla Terra, responsabili talvolta di catastrofiche estinzioni di massa. Tale incremento è dovuto al fatto che le altre stelle esercitano delle forze mareali sugli asteroidi della Fascia principale o della Cintura di Kuiper o sulle comete della Nube di Oort, che vengono di conseguenza dirette verso il Sistema Solare interno. Il Sole fa parte di un gruppo di oltre 100 milioni di stelle di classe spettrale G2 note all'interno della Via Lattea e supera in luminosità ben l'85% delle stelle della Galassia, gran parte delle quali sono deboli nane rosse. Tra le stelle luminose più vicine, poste entro un raggio di 17 anni luce, il Sole occupa la quinta posizione in termini di luminosità intrinseca: la sua magnitudine assoluta, infatti, è pari a +4,83.



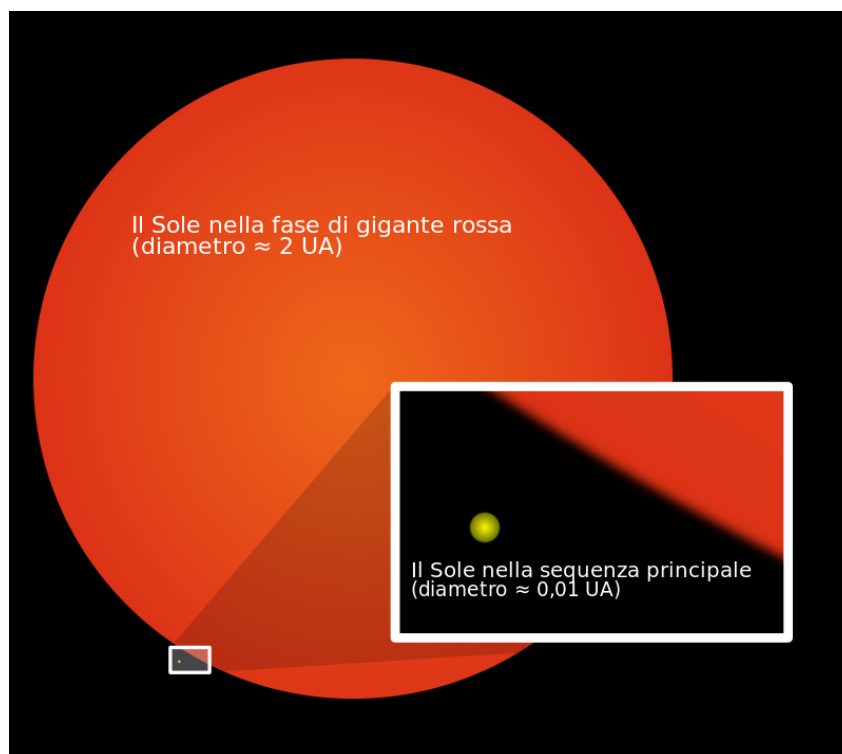
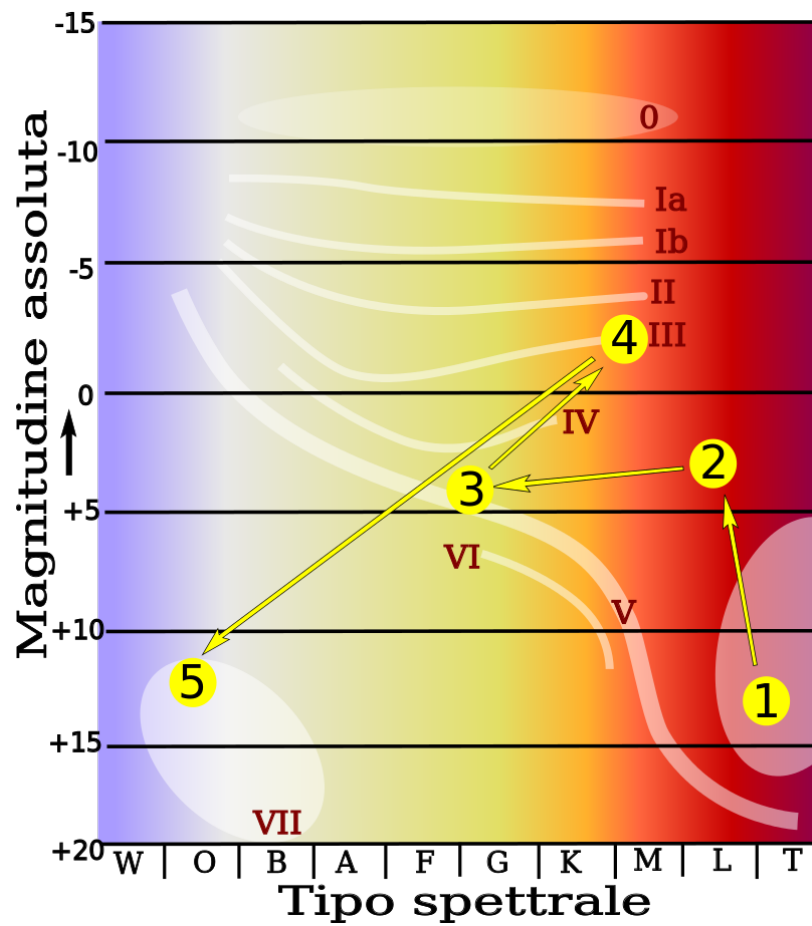
**La posizione del Sole all'interno della Via Lattea NASA.**

## Ciclo Vitale

Il Sole è una stella di popolazione I o terza generazione la cui formazione sarebbe stata indotta dall'esplosione, circa 5 miliardi di anni fa, di una o più supernova/e nelle vicinanze di un'estesa nube molecolare del Braccio di Orione. È accertato che, circa 4,57 miliardi di anni fa, il rapido collasso della nube, innescato da supernovae, portò alla formazione di una generazione di

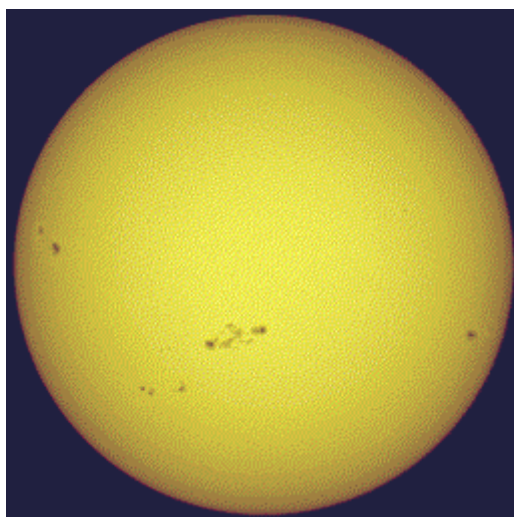


giovannissime stelle T Tauri, tra le quali anche il Sole, che, subito dopo la sua formazione, assunse un'orbita quasi circolare attorno al centro della Via Lattea, ad una distanza media di circa 26 000 a.l. Le inclusioni ricche di calcio e alluminio, residue dalla formazione stellare, formarono poi un disco proto planetario attorno alla stella nascente. Tale ipotesi è stata formulata alla luce dell'alta abbondanza di elementi pesanti, quali oro e uranio, nel nostro sistema planetario. Gli astronomi ritengono che questi elementi siano stati sintetizzati o tramite una serie di processi nucleari endoergonici durante l'esplosione della supernova fenomeno che prende il nome di nucleo sintesi delle supernovae, o grazie alle trasmutazioni, per mezzo di successivi assorbimenti neutronici, da parte di una stella massiccia di popolazione II o di seconda generazione. Il Sole è attualmente nella sequenza principale del diagramma Hertzsprung-Russell, ovvero in una lunga fase di stabilità durante la quale l'astro genera energia attraverso la fusione, nel suo nucleo, dell'idrogeno in elio; la fusione nucleare inoltre fa sì che la stella sia in uno stato di equilibrio, sia idrostatico, ossia non si espande a causa della pressione di radiazione delle reazioni termonucleari né si contrae per via della forza di gravità, cui sarebbe naturalmente soggetta, sia termico. Una stella di classe G2 come il Sole impiega, considerando la massa, circa 10 miliardi  $10^{10}$  di anni per esaurire completamente l'idrogeno nel suo nucleo. Il Sole si trova a circa metà della propria sequenza principale. Al termine di questo periodo di stabilità, tra circa 5 miliardi di anni, il Sole entrerà in una fase di forte instabilità che prende il nome di gigante rossa: nel momento in cui l'idrogeno del nucleo sarà totalmente convertito in elio, gli strati immediatamente superiori subiranno un collasso dovuto alla scomparsa della pressione di radiazione delle reazioni termonucleari. Il collasso determinerà un incremento termico fino al raggiungimento di temperature tali da innescare la fusione dell'idrogeno negli strati superiori, che provocheranno l'espansione della stella fino ad oltre l'orbita di Mercurio; l'espansione causerà un raffreddamento del gas fino a 3500 K, motivo per il quale la stella avrà una colorazione fotosferica tipicamente gialla intensa. Quando anche l'idrogeno dello strato superiore al nucleo sarà totalmente convertito in elio entro poche decine di milioni di anni si avrà un nuovo collasso, che determinerà un aumento della temperatura del nucleo di elio fino a valori di  $10^8$  K; a questa temperatura si innescherà repentinamente la fusione dell'elio flash dell'elio in carbonio e ossigeno. La stella subirà una riduzione delle proprie dimensioni, passando dal ramo delle giganti al ramo orizzontale del diagramma H-R. A causa delle elevatissime temperature del nucleo, la fusione dell'elio si esaurirà in breve tempo qualche decina di milioni di anni e i prodotti di fusione, non impiegabili in nuovi cicli termonucleari a causa della piccola massa della stella, si accumuleranno inerti nel nucleo; frattanto, venuta a mancare nuovamente la pressione di radiazione che spingeva verso l'esterno, avverrà un successivo collasso che determinerà l'innescio della fusione dell'elio nel guscio che avvolge il nucleo e dell'idrogeno nello strato ad esso immediatamente superiore. Queste nuove reazioni produrranno una quantità di energia talmente elevata da provocare una nuova espansione dell'astro, che raggiungerà così dimensioni prossime ad 1 UA circa 100 volte quelle attuali, tanto che la sua atmosfera arriverà ad inglobare molto probabilmente Venere. Incerto è invece il destino della Terra: alcuni astronomi ritengono che anche il nostro pianeta verrà inglobato dalla stella morente; altri invece ipotizzano che il pianeta si salverà, poiché la perdita di massa da parte della nostra stella farebbe allargare la sua orbita, che slitterebbe di conseguenza sino a quasi 1,7 UA. Il nostro pianeta sarà però inabitabile: gli oceani saranno evaporati a causa del forte calore e gran parte dell'atmosfera verrà dispersa nello spazio dall'intensa energia termica, che incrementerà l'energia cinetica delle molecole del gas atmosferico, consentendo loro di vincere l'attrazione gravitazionale del nostro pianeta. Tutto ciò avverrà entro i prossimi 3,5 miliardi di anni e, cioè, ancor prima che il Sole entri nella fase di gigante rossa. Entro 7,8 miliardi di anni, esaurito ogni processo termonucleare, il Sole rilascerà i suoi strati più esterni, che verranno spazzati via sotto forma di super vento creando una nebulosa planetaria; le parti più interne collaseranno e daranno origine ad una nana bianca circa delle dimensioni della Terra, che lentamente si raffredderà sino a diventare, nel corso di centinaia di miliardi di anni, una nana nera. Questo scenario evolutivo è tipico di stelle con una massa simile a quella del Sole, ossia che hanno una massa non sufficientemente elevata da esplodere come supernove.



## Caratteristiche Morfologiche e Rotazioni

Il Sole è una sfera di plasma quasi perfetta, le cui dimensioni sono un po' più grandi di quelle di una stella di media grandezza, ma decisamente più piccole di quelle di una ben più imponente gigante blu o gigante rossa. Possiede un'ellitticità stimata in circa 9 milionesimi: infatti, il suo diametro polare differisce da quello equatoriale di appena 10 km. Tale differenza sussiste perché la rotazione del corpo sul proprio asse origina all'equatore una forza che tenderebbe a fargli assumere una forma ellissoidale: la forza centrifuga. Tuttavia, poiché la rotazione della stella è molto lenta, la forza centrifuga è 18 milioni di volte più debole della gravità superficiale; da ciò ne consegue che la stella non possieda un rigonfiamento equatoriale molto pronunciato, caratteristica propria invece di alcune stelle, come Achernar, le quali possiedono elevate velocità di rotazione. Inoltre, gli effetti mareali esercitati dai pianeti sulla stella non ne influenzano significativamente la forma. Poiché si trova allo stato di plasma e non possiede, al contrario di un pianeta roccioso, una superficie solida, la stella è soggetta ad una rotazione differenziale, ovvero ruota in maniera diversa a seconda della latitudine: infatti la stella ruota più velocemente all'equatore che non ai poli ed il periodo di rotazione varia tra i 25 giorni dell'equatore e i 35 dei poli. Tuttavia, poiché il punto di vista osservativo dalla Terra cambia man mano che il nostro pianeta compie il proprio moto di rivoluzione, il periodo di rotazione apparente all'equatore è di 28 giorni. Inoltre, la densità dei gas che costituiscono la stella diminuisce esponenzialmente all'aumentare della distanza dal centro.



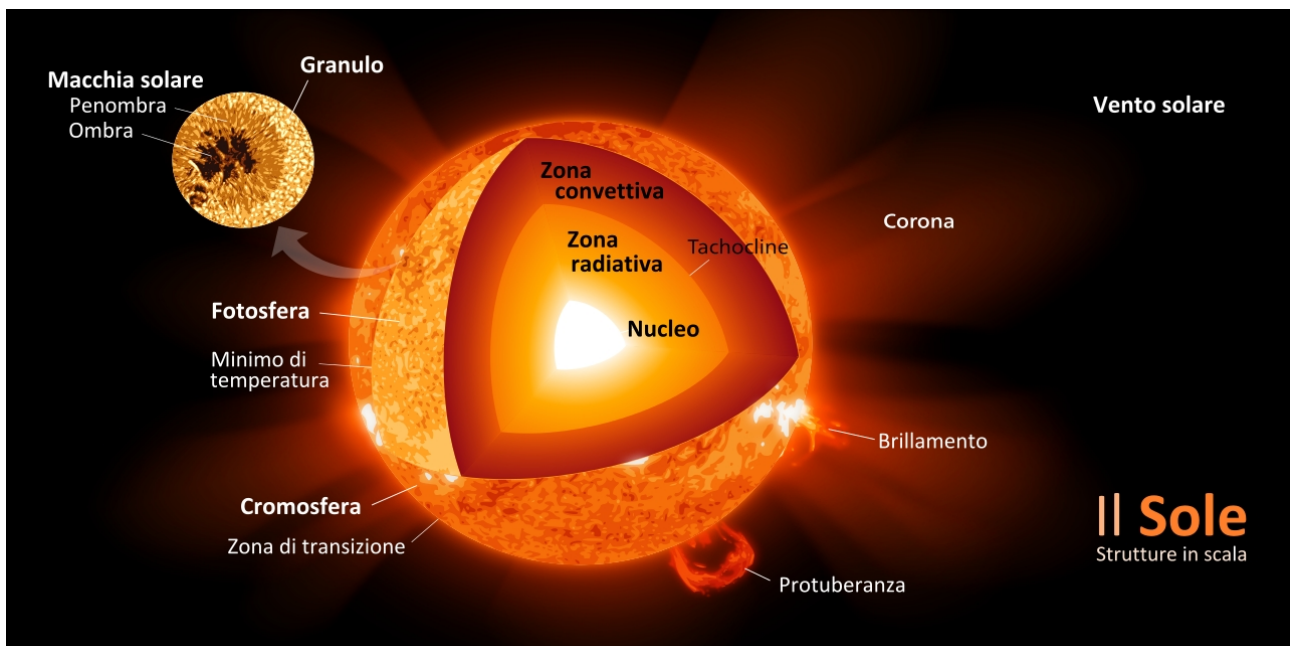
NASA - <http://solarscience.msfc.nasa.gov/surface.shtml> vedi qui il video

## Struttura

Il Sole possiede una struttura interna ben definita, la quale non è, tuttavia, direttamente osservabile a causa dell'opacità alla radiazione elettromagnetica degli strati interni della stella. Un valido strumento per determinare la struttura solare è fornito dall'elio sismologia, una disciplina che, esattamente come la sismologia, studia la diversa propagazione delle onde sismiche per rivelare l'interno della Terra, analizza la differente propagazione delle onde di pressione infrasuoni che attraversano l'interno del Sole. L'analisi elio sismologica è spesso associata a simulazioni computerizzate, che consentono agli astrofisici di determinare con buona approssimazione la struttura interna della nostra stella. Il raggio del Sole è la distanza tra il suo centro e il limite della fotosfera, strato al di sopra del quale i gas sono abbastanza freddi o rarefatti da consentire l'irraggiamento di un significativo quantitativo di energia luminosa; è perciò lo strato meglio visibile ad occhio nudo. La struttura interna del Sole, come quella delle altre stelle, appare costituita di involucri concentrici; ogni strato possiede caratteristiche e condizioni fisiche ben precise, che lo differenziano dal successivo.

Gli strati sono, dal centro verso l'esterno:

- Il nucleo;
- La zona radiativa;
- La tachocline;
- La zona convettiva;
- La fotosfera, la superficie del Sole;
- L'atmosfera, suddivisa in:
  - Cromosfera;
  - Zona di transizione;
  - Corona.



Spaccato della struttura interna del Sole



## Nucleo

Il nucleo solare rappresenta in volume il 10% della stella, in massa oltre il 40%. È qui che avvengono le reazioni di fusione nucleare, fonte principale dell'energia solare. Gli astrofisici ritengono che il nucleo solare abbia dimensioni prossime a 0,2 raggi solari, con una densità superiore a  $150.000 \text{ kg/m}^3$  150 volte quella dell'acqua, una temperatura di circa  $13.600.000 \text{ K}$  per raffronto, la temperatura superficiale della stella è 2.350 volte inferiore  $5.777 \text{ K}$  ed una pressione di quasi 500 miliardi di atmosfere; è la combinazione di simili valori a favorire la fusione nucleare dell'idrogeno in elio. Il nucleo è l'unica regione della nostra stella in cui, attualmente, avvenga la fusione nucleare. Tali reazioni liberano energia sotto forma di radiazione  $\gamma$ , che, una volta emessa dal nucleo, viene assorbita e riemessa dalla materia degli strati superiori, contribuendo a mantenere alta la temperatura; nell'attraversare gli strati della stella, la radiazione elettromagnetica perde energia, assumendo lunghezze d'onda sempre maggiori, passando dalla banda  $\gamma$  alla banda X e ultravioletta, per poi diffondersi nello spazio come luce visibile. Un altro prodotto delle reazioni nucleari è i neutrini, particelle che raramente interagiscono con la materia e che dunque attraversano liberamente lo spazio.

## Fotosfera

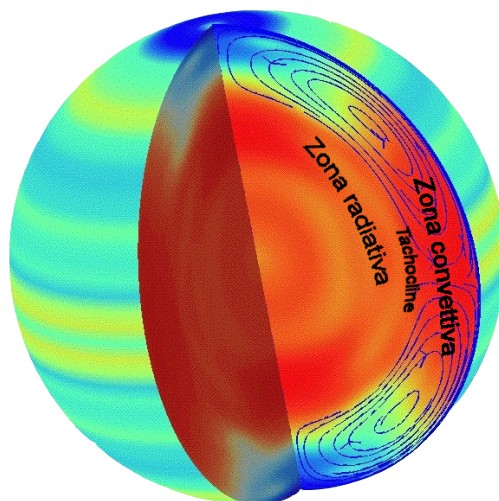
La fotosfera è lo strato del Sole al di sotto del quale la stella diviene opaca alla luce visibile; si tratta dunque del primo strato visibile, dal quale l'energia proveniente dall'interno è libera di propagarsi nello spazio. È sede di fenomeni come le macchie solari e i brillamenti. È caratterizzata da una densità di  $10^{23}$  particelle al metro cubo equivalente all'1% della densità dell'atmosfera terrestre al livello del mare, mentre il suo spessore varia da alcune decine fino a qualche centinaio di chilometri. Il cambiamento di opacità rispetto agli strati inferiori la sua opacità è infatti lievemente inferiore a quella dell'atmosfera terrestre è dovuto alla diminuzione del numero di ioni idruro  $\text{H}^-$ , che assorbono con facilità la luce visibile; la luce da noi percepita è invece prodotta dalla ricombinazione tra gli elettroni liberi e gli atomi di idrogeno per generare ioni  $\text{H}^-$ . Poiché gli strati più alti della fotosfera sono più freddi di quelli più profondi, l'immagine del Sole appare più luminosa al centro, e si fa via via più tenue man mano che si procede verso il bordo del perimetro del disco visibile; questo fenomeno è chiamato oscuramento al bordo, ed è causato da un fenomeno di prospettiva. Lo spettro fotosferico presenta caratteristiche relativamente simili a quelle dello spettro continuo di un corpo nero riscaldato alla temperatura di  $5.777 \text{ K}$ , e appare intervallato dalle linee di assorbimento della tenue atmosfera stellare. All'osservazione diretta la fotosfera presenta un aspetto granuloso, dovuto alla presenza della granulazione e della super granulazione. Durante i primi studi dello spettro ottico della fotosfera, furono trovate alcune linee di assorbimento che non corrispondevano con nessun elemento noto sulla Terra. Nel 1868, Norman Lockyer ipotizzò che queste linee fossero causate da un nuovo elemento, che chiamò elio, come l'omonimo dio greco del Sole; venticinque anni dopo, l'elio venne isolato sulla Terra.

## Zona Radioattiva

Situata all'esterno del nucleo, la zona radiativa si estende da circa 0,2 sino a 0,7 raggi solari; essa assorbe l'energia prodotta dal nucleo e la trasmette per irraggiamento donde il nome agli strati superiori. Pressione e temperatura sono ancora abbastanza elevate da permettere il trasferimento dell'energia allo strato successivo. In questa fascia avviene il trasferimento dell'energia prodotta nel nucleo verso lo strato superiore, la zona convettiva; la zona radiativa appare priva di moti convettivi: infatti, mentre la materia diventa più fredda a quote crescenti, il gradiente di temperatura resta minore di quello del tasso di caduta adiabatica, il che agevola il trasferimento di energia per irraggiamento. L'energia viene trasferita verso gli strati più esterni in maniera molto lenta: infatti, gli ioni di idrogeno ed elio emettono fotoni, che viaggiano attraverso una breve distanza prima di essere riassorbiti e riemessi da altri ioni. Una recente analisi dei dati raccolti dalla missione SOHO suggerisce che la velocità di rotazione della zona radiativa sia leggermente inferiore a quella del nucleo.

## Zona di transizione o Tachocline

La zona di transizione tra la porzione radiativa e quella convettiva prende il nome di tachocline e si estende, secondo recenti studi elio sismologici, a partire da 0,7 raggi solari. Gli astrofisici ritengono che tali dimensioni svolgano un ruolo determinante nella genesi del campo magnetico solare, in quanto interverrebbero nella dinamo solare meccanismo grazie al quale si origina il campo magnetico della nostra stella rinforzando i deboli campi polo idali per crearne uno più intenso di forma toroidale.



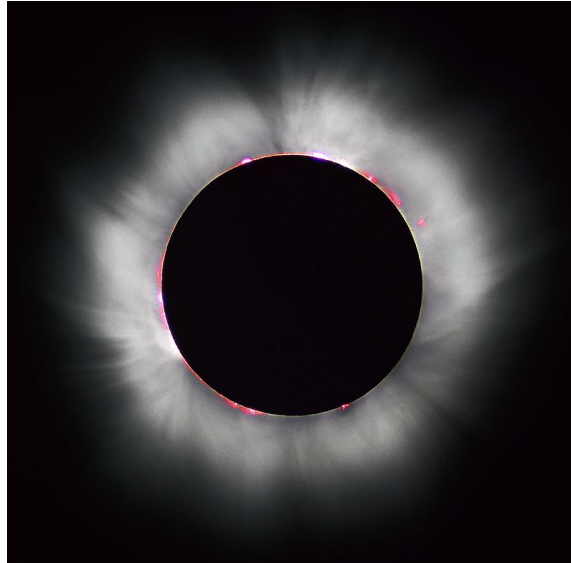
**Rielaborazione computerizzata dei dati elio sismologici che mette in evidenza la disposizione e la struttura della zona radiativa, della *tachocline* e della zona convettiva.**

## Zona Convettiva

La zona convettiva ha uno spessore di circa 200.000 km e si trova nella porzione esterna del Sole, a partire da circa il 70% del raggio solare. L'area è caratterizzata da temperature e densità inferiori a quelle degli strati sottostanti; di conseguenza, energia e calore non possono essere trasferiti per irraggiamento, ma attraverso moti convettivi. La materia più calda e meno densa viene portata in superficie, dove cede parte della propria energia termica; una volta raffreddata, la materia risprofonda alla base della zona convettiva, dove riceve nuovamente il calore proveniente dalla zona radiativa. A differenza dello strato sottostante, dunque, nella zona convettiva la materia è in costante movimento. Questo costante e turbolento movimento sembra essere una delle cause fondamentali della dinamo solare. Le colonne termiche della zona convettiva lasciano segni sulla fotosfera solare che prendono il nome di granuli o super granuli solari.

## Atmosfera

Gli strati al di sopra della fotosfera costituiscono l'atmosfera solare e risultano visibili a tutte le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, dalle onde radio ai raggi gamma passando per la luce visibile. Gli strati sono, in ordine: la cromosfera, la zona di transizione, la corona e l'eliosfera; quest'ultima, che può essere considerata la tenue prosecuzione della corona, si estende sin oltre la Fascia di Kuiper, fino all'elio pausa, dove forma una forte onda d'urto di confine bow shock con il mezzo interstellare. La cromosfera, la zona di transizione e la corona sono molto più caldi della superficie solare; la ragione di questo riscaldamento resta tuttora sconosciuta. Qui si trova anche lo strato più freddo del Sole: si tratta di una fascia chiamata regione di minima temperatura temperature minimum in inglese, posta circa 500 km sopra la fotosfera: quest'area, che ha una temperatura di 4.000 K, è sufficientemente fredda da consentire l'esistenza di alcune molecole, come il monossido di carbonio e l'acqua, le cui linee di assorbimento sono ben visibili nello spettro solare.



La corona del Sole risulta visibile durante un'eclissi totale.

## Cromosfera

Al di sopra della fotosfera si trova una sottile fascia spessa circa 2.000 km, chiamata cromosfera (chroma, chromatos, che significa colore, a causa dei suoi brillanti colori visibili subito prima e subito dopo le eclissi totali di Sole. È un sottile involucro costituito da gas rarefatto che appare di colore rossastro; in realtà, lo strato è trasparente. La colorazione rossastra è dovuta agli atomi di idrogeno, che alle più basse pressioni della cromosfera emettono radiazioni di tale colore. La cromosfera è interessata da diversi fenomeni emissivi di origine magnetica, come le spicule e le protuberanze solari. La temperatura nella cromosfera aumenta gradualmente man mano che ci si allontana dalla stella, raggiungendo i 100.000 K negli strati più esterni.

## Zonadi transizione di base

Al di sopra della cromosfera si trova la zona di transizione, in cui la temperatura sale rapidamente dai circa 100.000 K degli strati più esterni della cromosfera, fino al milione di kelvin della corona; tale incremento causa una transizione di fase dell'elio, che qui diventa completamente ionizzato per le elevate temperature. La zona di transizione non possiede un limite di altitudine definito: forma, infatti, una sorta di alone attorno alle formazioni della cromosfera come le spicule ed i filamenti ed è in moto costante e caotico. La zona di transizione non è visibile facilmente dalla Terra, ma è ben rilevabile dallo spazio attraverso strumenti sensibili alle lunghezze d'onda dell'ultravioletto distante.

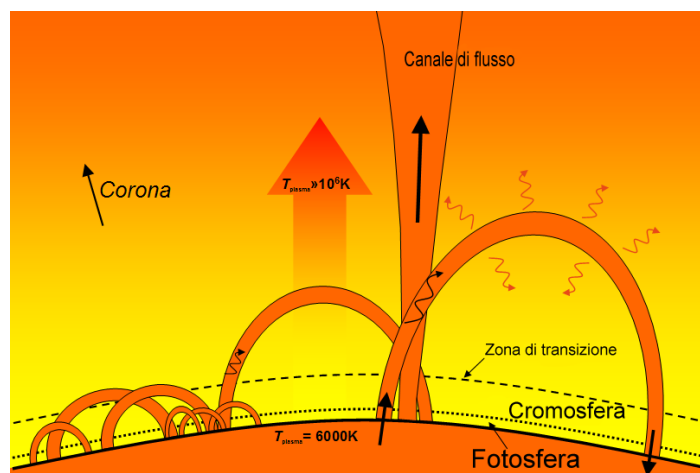


Diagramma della bassa atmosfera solare.

## Corona

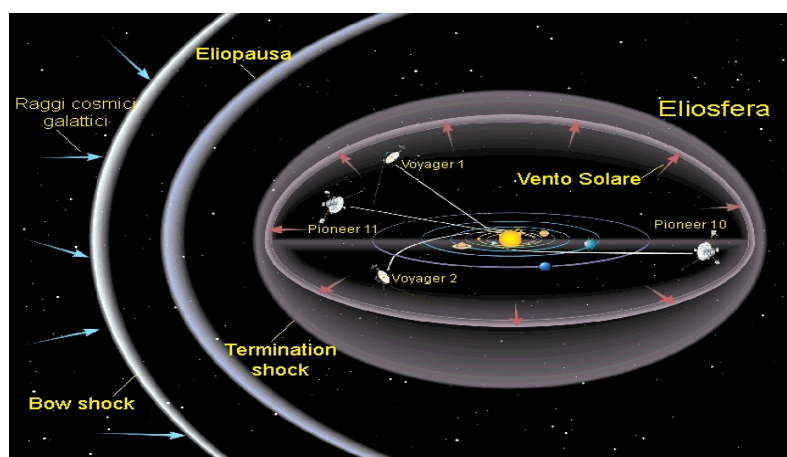
La corona è la parte esterna dell'atmosfera solare, non ha limiti definiti e si estende nello spazio per decine di milioni di chilometri in modo molto tenue. È costituita da plasma a elevatissima temperatura oltre un milione di kelvin. Essendo il plasma molto rarefatto, la temperatura non è da intendersi nel significato convenzionale; si parla in questo caso di temperatura cinetica. Gli strati interni della corona hanno una densità di  $10^{14} - 10^{16}$  particelle al metro cubo l'atmosfera terrestre al livello del mare ha una densità di  $2 \times 10^{25}$  particelle al metro cubo ed è sede di numerosi fenomeni di tipo magnetico, come le espulsioni di massa CME e gli anelli coronali. Gli astrofisici non sono ancora riusciti a comprendere perché la corona abbia una temperatura così elevata; essi ritengono che parte del calore sia originato dalla riconnessione delle linee del campo magnetico solare l'argomento è trattato più ampiamente nel paragrafo Problema del riscaldamento coronale

## Vento Solare

Anche il Sole, come altre stelle, emette un flusso di particelle dall'atmosfera superiore: il vento solare. Il vento solare è formato da plasma e la sua composizione chimica è identica a quella della corona: 73% idrogeno e 25% elio, con il restante 2% formato da elementi in tracce. Nei pressi della Terra, la velocità del vento solare varia tra 200 e 900 km/s in media 450 km/s. Ogni secondo la stella perde, tramite il vento solare, una quantità di materia pari a  $1,37 \times 10^9$  kg; si tratta tuttavia di una perdita insignificante, poiché in un anno corrisponde a  $2,18 \times 10^{-14}$  volte la massa complessiva del Sole. Il vento solare trasporta con sé, a causa del peculiare comportamento del plasma magnetizzato, il campo magnetico del Sole nello spazio interplanetario, fino ad una distanza di circa 160 unità astronomiche. Il vento solare si muove in direzione radiale rispetto al Sole; a causa della sua rotazione le linee di campo si curvano a forma di spirale. Alcuni studi ipotizzano che il vento solare svolga un'importante funzione protettiva nei confronti dei pianeti, ossia schermerebbe i raggi cosmici grazie alla sua natura ionizzata.

## Elio Sfera

Il vento solare crea una bolla nel mezzo interstellare, che prende il nome di eliosfera. L'eliosfera si estende da una distanza di circa 20 raggi solari 0,1 UA dalla superficie del Sole fino alle regioni più estreme del sistema solare. Il suo limite più interno è definito come la regione in cui il flusso del vento solare diventa super alfvénico, ossia supera la velocità dell'onda di Alfvén; le forze dinamiche e di turbolenza all'esterno di questo limite non possono però influenzare la forma della corona solare, poiché entro questo limite il flusso viaggia a velocità inferiori o uguali a quelle dell'onda di Alfvén. Il vento solare viaggia in maniera continua attraverso l'eliosfera, fino a che non si scontra con l'elio pausa, ad oltre 50 UA dal Sole. Nel dicembre del 2004, la sonda spaziale Voyager 1 attraversò l'elio pausa; entrambe le sonde Voyager, nell'avvicinarsi al confine col l'eliopausa, hanno registrato un livello sempre più alto di particelle energetiche.

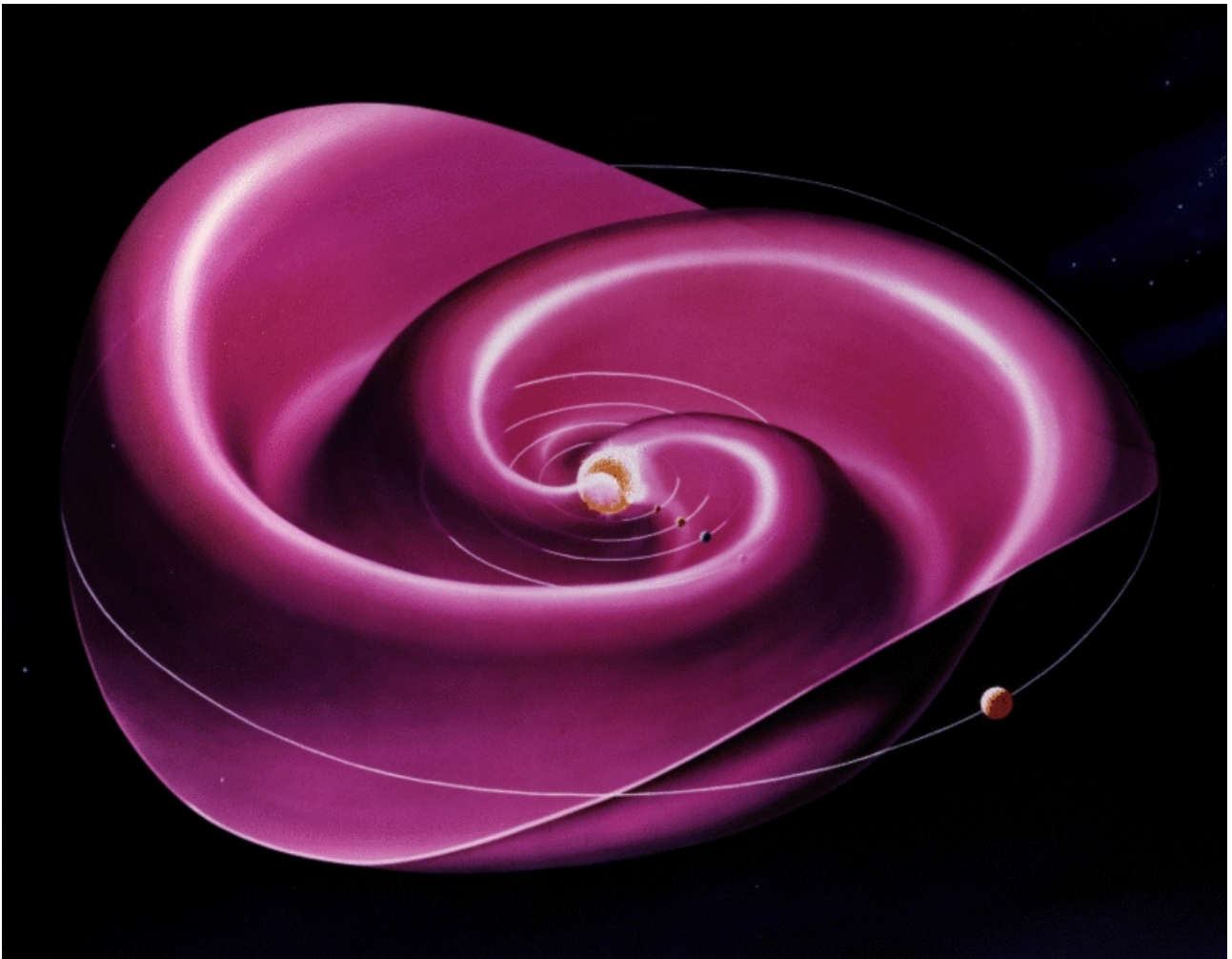


Disegno che rappresenta le strutture dell'eliosfera.



## Campo Magnetico

Il moto turbolento del plasma e delle particelle cariche della zona convettiva generano un potente campo magnetico, caratterizzato da poli appaiati nord e sud disposti lungo tutta la superficie solare. Il campo inverte il proprio verso ogni undici anni, in corrispondenza del massimo del ciclo solare. Il campo magnetico solare è all'origine di diversi fenomeni che prendono complessivamente il nome di attività solare; tra essi si annoverano le macchie fotosferiche, i flare o brillamenti e le variazioni nell'intensità del vento solare, che diffonde materia attraverso il sistema solare. La rotazione differenziale della stella causa una forte deformazione delle linee del campo magnetico, che appaiono aggrovigliate su sé stesse; su di esse si dispone il plasma delle eruzioni solari, che vanno a formare vasti anelli di materia incandescente, noti come anelli coronali. Le deformazioni delle linee di campo danno luogo alla dinamo e al ciclo undecennale dell'attività solare, durante il quale l'intensità del campo magnetico subisce delle variazioni. La densità del flusso magnetico solare è di  $10^{-4}$  tesla in prossimità della stella. L'interazione tra il campo magnetico solare ed il plasma del mezzo interplanetario crea una corrente elio sferica diffusa, ossia un piano che separa regioni in cui il campo magnetico converge in direzioni diverse.



**Rappresentazione artistica della corrente elio sferica diffusa.**

## Ciclo Solare

Il ciclo solare detto anche ciclo dell'attività magnetica solare è il tempo, mediamente pari a undici anni, che intercorre tra due periodi di minimo dell'attività solare; la lunghezza del periodo non è strettamente regolare, ma può variare tra i dieci e i dodici anni. È anche la principale causa delle periodiche variazioni di tutti i fenomeni solari che influiscono sul tempo meteorologico spaziale. Alimentato da un processo di tipo idro magnetico, all'origine del campo magnetico solare stesso, il ciclo solare:

- modella l'atmosfera ed il vento solare;
- modula l'irradianza solare;
- modula il flusso delle radiazioni a lunghezza d'onda corta, dagli ultravioletti ai raggi X;
- modula la frequenza dei fenomeni eruttivi, come i flare e le espulsioni di massa;
- modula indirettamente il flusso dei raggi cosmici ad alta energia che penetrano nel sistema solare.

Il ciclo solare si divide in due fasi: una fase di massimo, in cui l'attività della stella si presenta più frenetica, e una fase di minimo, in cui l'attività è meno intensa. L'attività solare durante il minimo coincide spesso con temperature più basse rispetto alla media sulla Terra, mentre le fasi di massimo più ravvicinate tendono ad essere correlate a temperature più alte rispetto alla media. Poiché i campi magnetici possono influire sui venti stellari, arrivando ad agire come dei freni che rallentano progressivamente la rotazione della stella man mano che essa compie il proprio percorso evolutivo, le stelle non più giovani, come il Sole per l'appunto, compiono la propria rotazione in tempi più lunghi e presentano un'attività magnetica meno intensa. I loro livelli di attività tendono a variare in maniera ciclica e possono cessare completamente per brevi periodi di tempo. Un esempio fu il minimo di Maunder, durante il quale il Sole andò incontro ad un settantennio, nel corso del XVII secolo, di attività minima; in questo periodo, noto anche come, Piccola era glaciale, l'Europa subì un brusco calo delle temperature. I primi minimi solari di considerevole durata furono scoperti attraverso l'analisi dentro cronologica degli anelli annuali dei tronchi di alcuni alberi, il cui spessore dipende dalle condizioni ambientali in cui vivono i vegetali; le linee più sottili sembravano coincidere con i periodi in cui le temperature globali erano state al di sotto della media.

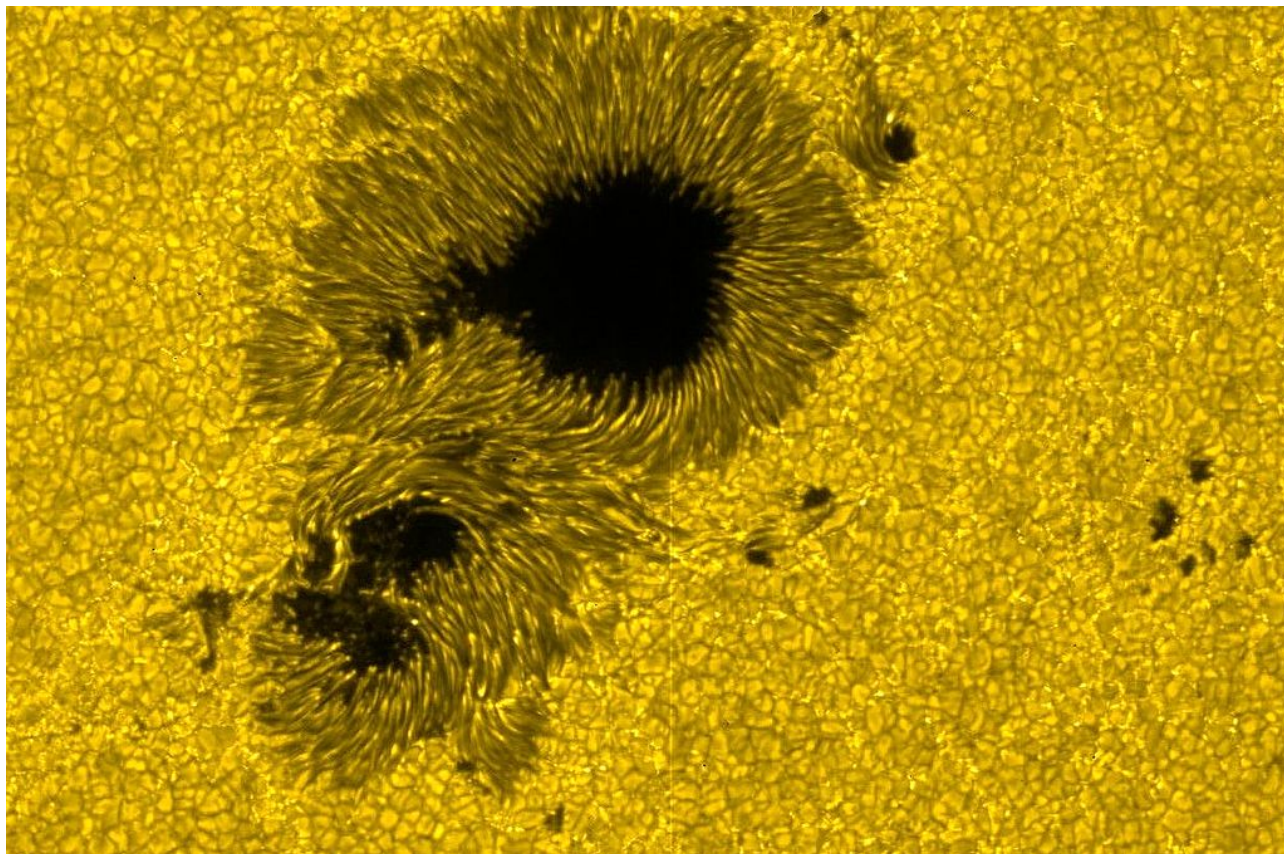
## Macchie Solari

Osservando il Sole con filtri adatti, è possibile scorgere lungo la sua superficie le caratteristiche macchie fotosferiche, aree ben definite che appaiono più scure rispetto al resto della fotosfera a causa della loro temperatura più bassa dell'ordine dei 4.500 K. Si tratta di regioni di intensa attività magnetica, nelle quali la convezione visibile nel resto della superficie sotto forma di granulazione risulta inibita dal forte campo magnetico, che riduce il trasporto di energia dalle regioni interne più calde alla superficie. Le macchie solari più grandi possono estendersi anche per migliaia di chilometri. Il numero di macchie solari visibili sulla superficie del Sole non è costante, varia durante il ciclo solare. Normalmente, durante il minimo solare le macchie sono assenti o molto esigue; quelle che appaiono si trovano di solito alle alte latitudini lontane dall'equatore. Man mano che il ciclo prosegue, avanzando verso il massimo, le macchie si fanno sempre più frequenti e tendono a spostarsi verso le zone equatoriali della stella, in osservanza della legge di Spörer. Le macchie di solito si trovano in coppie di polarità magnetica opposta; la polarità magnetica delle macchie si inverte durante ogni ciclo solare, cosicché se in un ciclo una assume le caratteristiche di un polo nord magnetico, al ciclo successivo essa diventa un sud magnetico.

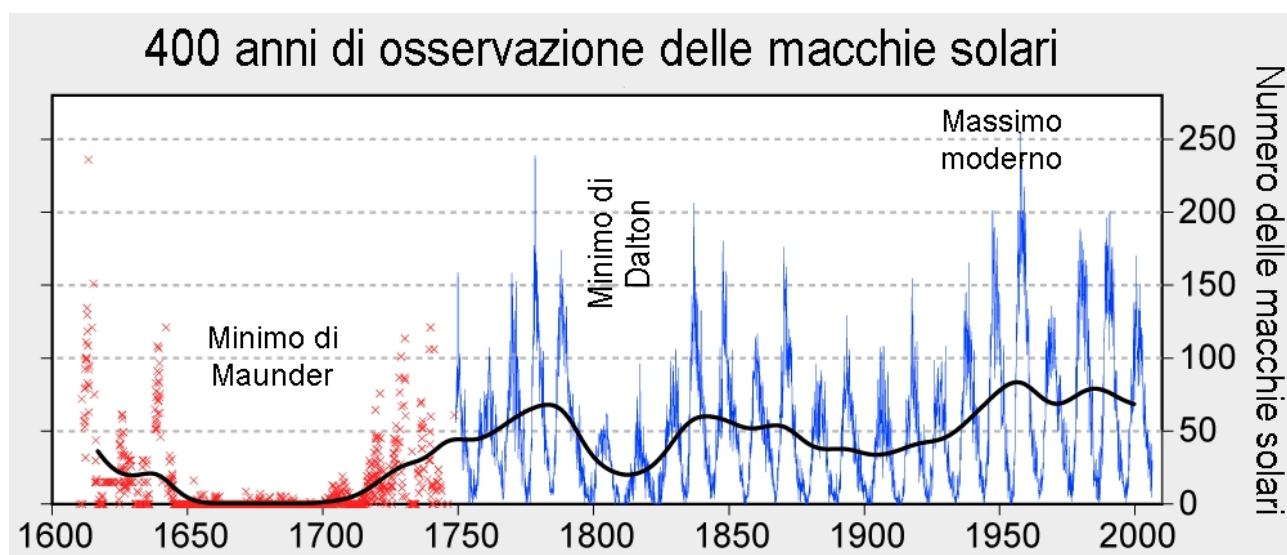


## Eventualità di fenomeni ciclici a lungo termine

Una recente teoria afferma che possono esistere delle instabilità magnetiche all'interno del Sole che causano delle fluttuazioni con periodi di 41 000 o 100 000 anni; tali fluttuazioni potrebbero fornire una spiegazione sia delle ere glaciali che dei cicli di Milanković. Tuttavia, come molte teorie in astrofisica, anche questa non può essere verificata direttamente.



Un gruppo di macchie solari; si noti la granulazione fotosferica.



La variazione nel numero delle macchie solari dal XVII secolo al 2007.

## Composizione Chimica

Il Sole, come ogni altro corpo celeste nell'Universo, è costituito da elementi chimici. Molti scienziati hanno analizzato questi elementi per conoscerne l'abbondanza, le loro relazioni con gli elementi costitutivi dei pianeti e la loro distribuzione all'interno della stella. La stella ha ereditato la sua composizione chimica dal mezzo interstellare da cui ha preso origine: l'idrogeno e l'elio, che ne costituiscono la grande parte, si sono costituiti grazie alla nucleosintesi del Big Bang, gli elementi più pesanti sono stati sintetizzati dalla nucleosintesi delle stelle più evolute, che, al termine della propria evoluzione, li hanno diffusi nello spazio circostante. La composizione del nucleo è fortemente alterata dai processi di fusione nucleare, che hanno aumentato la percentuale in massa dell'elio 34% a discapito dell'idrogeno 64%. La percentuale di elementi pesanti, detti convenzionalmente metalli, è rimasta invece pressoché invariata. Questi, presenti in tracce soprattutto negli strati più superficiali, sono: litio, berillio e boro; neon, la cui quantità effettiva sarebbe maggiore di quella precedentemente stimata tramite le osservazioni eliosismologiche; gli elementi del gruppo 8 della tavola periodica, cui appartengono ferro, cobalto e manganese. Numerosi astrofisici hanno preso anche in considerazione l'esistenza di relazioni di frazionamento della massa tra le composizioni isotopiche dei gas nobili, quali neon e xeno, presenti nell'atmosfera solare e in quelle planetarie. Poiché le parti interne della stella sono radiative e non convettive, la fotosfera, costituita essenzialmente da idrogeno circa il 74% della sua massa, il 92% del suo volume, elio circa il 24-25% della massa, il 7% del volume ed elementi in tracce, ha mantenuto e mantiene una composizione chimica essenzialmente immutata dalla formazione della stella, tanto che molti tendono a considerarla come esempio della composizione chimica primordiale del sistema solare. Fino al 1983 era diffusa la convinzione che la stella avesse la stessa composizione della sua atmosfera; in quell'anno si scoprì che proprio il frazionamento degli elementi nel Sole era all'origine della distribuzione degli stessi al suo interno. Tale frazionamento è determinato da vari fattori, quali la gravità, che fa sì che gli elementi più pesanti come l'elio, in assenza di altri elementi più pesanti si dispongano nel centro di massa dell'astro, mentre gli elementi meno pesanti quindi l'idrogeno si diffondano attraverso gli strati esterni del Sole; la diffusione dell'elio all'interno del Sole tende a velocizzarsi nel corso del tempo.

Percentuale degli elementi nella fotosfera solare

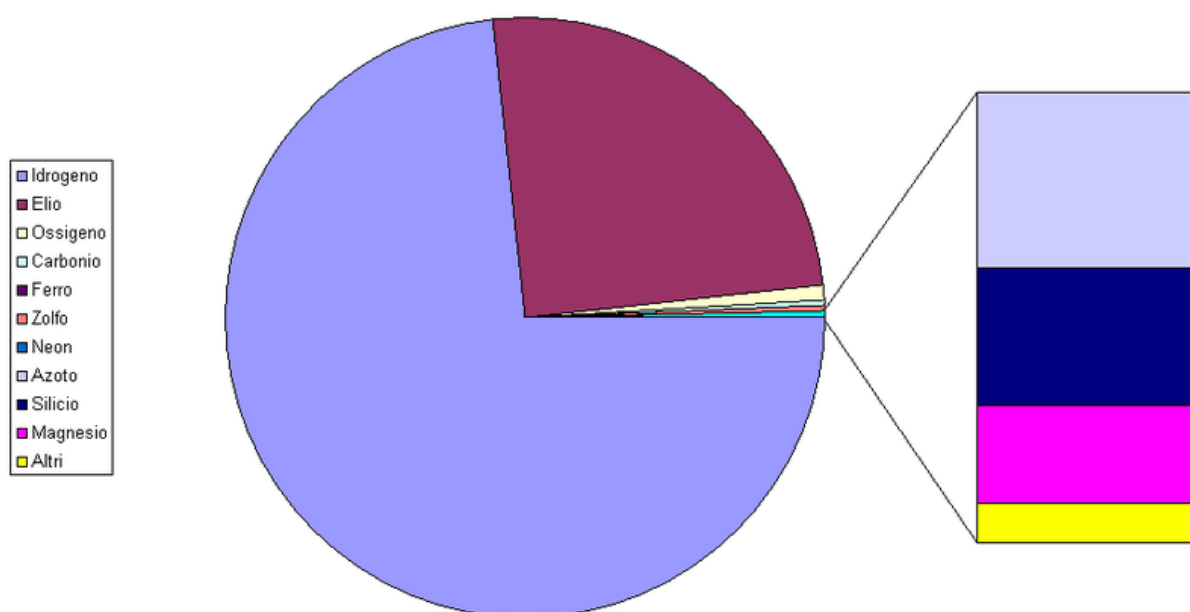
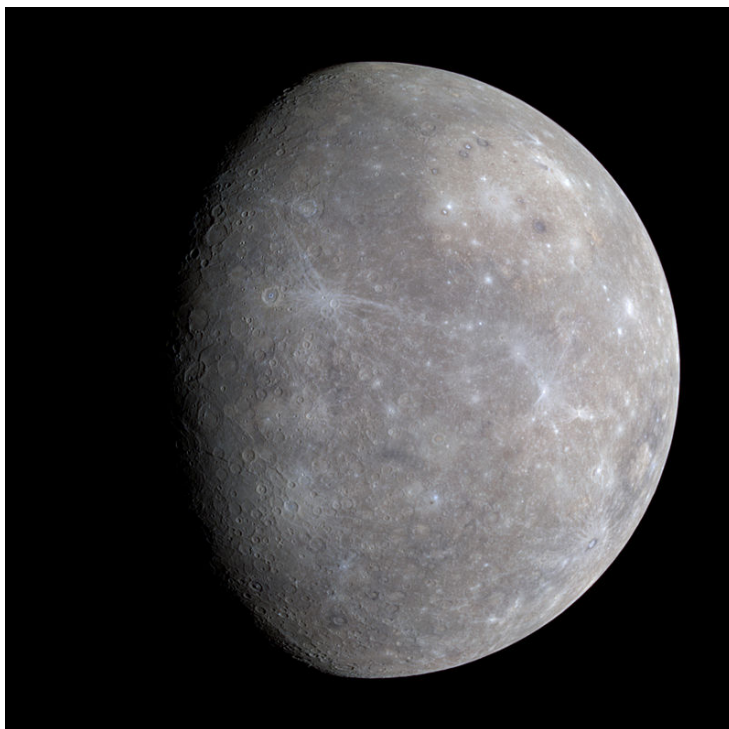


Grafico che mette in luce la percentuale degli elementi nella fotosfera solare.



## ***Primo Pianeta Mercurio***



**Foto di Mercurio fatta dalla sonda Messenger**

Mercurio è il pianeta più interno del sistema solare e il più vicino al Sole. È il più piccolo e la sua orbita è anche la più eccentrica, ovvero la meno circolare, degli otto pianeti. Mercurio orbita in senso diretto in senso antiorario, come tutti gli altri pianeti del sistema solare a una distanza media di 0,3871 UA dal Sole con un periodo siderale di 87,969 giorni terrestri. Mercurio è anche in risonanza orbitale-rotazionale: completa tre rotazioni intorno al proprio asse ogni due orbite attorno al Sole. L'eccentricità orbitale è abbastanza elevata e vale 0,205, ben 15 volte quella della Terra. Dalla superficie il Sole ha un diametro apparente medio di  $1,4^\circ$ , circa 2,8 volte quello visibile dalla Terra, e arriva a  $1,8^\circ$  durante il passaggio al perielio. Il rapporto fra la radiazione solare al perielio e quella all'afelio è 2,3. Per la Terra questo rapporto vale 1,07. La superficie di Mercurio sperimenta la maggiore escursione termica tra tutti i pianeti, con temperature che nelle regioni equatoriali vanno da 100 K  $-173^\circ\text{C}$  della notte a 700 K  $427^\circ\text{C}$  del dì; le regioni polari invece sono costantemente inferiori a 180 K  $-93^\circ\text{C}$ . Ciò è dovuto all'assenza dell'atmosfera che, se presente, svolgerebbe un ruolo nella ridistribuzione del calore. La superficie fortemente craterizzata indica che Mercurio è geologicamente inattivo da miliardi di anni. Conosciuto sin dal tempo dei Sumeri, il suo nome è tratto dalla mitologia romana. Il pianeta è stato associato a Mercurio, messaggero degli Dei, probabilmente a causa della sua rapidità di movimento nel cielo. Il suo simbolo astronomico è una versione stilizzata del caduceo del Dio.

## Conoscendo il Pianeta

<b>Parametri Orbitali, Dati Fisici e Osservativi</b>					
<b>Orbitali</b>		<b>Fisici</b>		<b>Osservativi</b>	
<i>Semiasse</i>	0,387 UA	<i>Diamet. equat.</i>	4.879 km	<i>Magn. app. min</i>	+7,25
<i>Perielio</i>	0,313 UA	<i>Superficie</i>	$7,5 \times 10^{13} \text{ m}^2$	<i>Magn. app med</i>	+0.12
<i>Afelio</i>	0,459 UA	<i>Period. Rotaz.</i>	58,65 gg	<i>Magn. app max</i>	-2,48
<i>CRF orbitale</i>	2,406 UA	<i>Period. Orbit.</i>	0,241 anno		
<i>Inclinazione</i>	7°	<i>Period. Sinod.</i>	0,32 anno		
<i>Satelliti</i>	0	<i>Temp. max</i>	452 °C		
<i>Anelli</i>	0	<i>Temp. med.</i>	167 °C		
		<i>Temp. min.</i>	-183 °C		
		<i>Press. Atmosf</i>	$5 \times 10^{-15} \text{ bar}$		

**UA= distanza Terra/Sole media pari a km149.597.870.**

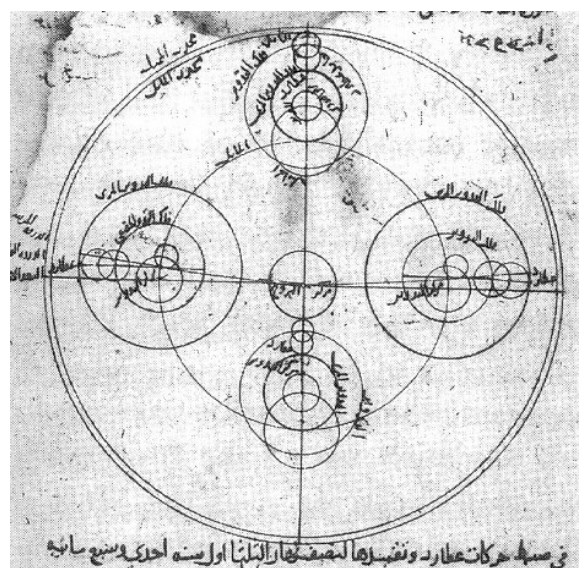
## Osservazioni

Trattandosi di un pianeta interno rispetto alla Terra, Mercurio appare sempre molto vicino al Sole la sua elongazione massima è di 27,8°, al punto che i telescopi terrestri possono osservarlo raramente. La sua magnitudine apparente oscilla tra -2,4 e +7,2 a seconda della sua posizione rispetto alla Terra e al Sole. Durante il giorno la luminosità solare impedisce ogni osservazione e l'osservazione diretta è possibile solamente subito dopo il tramonto, sull'orizzonte a ovest, o poco prima dell'alba verso est, oppure eccezionalmente in occasione delle eclissi totali. Inoltre, l'estrema brevità del suo moto di rivoluzione ne permette l'osservazione solamente per pochi giorni consecutivi, dopo di che il pianeta è inosservabile dalla Terra. Per evitare danni agli strumenti il telescopio spaziale Hubble non viene mai utilizzato per riprendere immagini del pianeta. Mercurio è visibile solitamente per sei periodi l'anno, con tre apparizioni la mattina prima dell'alba e tre la sera immediatamente dopo il tramonto. I periodi migliori per l'osservazione sono dopo il tramonto attorno all'equinozio di primavera per l'emisfero boreale e prima dell'alba attorno all'equinozio di autunno per l'emisfero australe, a causa dell'inclinazione dell'eclittica sull'orizzonte. I transiti di Mercurio osservati dalla Terra sono molto più frequenti dei transiti di Venere grazie alla ridotta distanza dal Sole e alla maggiore velocità orbitale: ne avvengono circa tredici ogni secolo. Sin dai tempi antichi il transito fornisce un'ottima occasione per condurre studi scientifici. Nel 1600 i transiti di Mercurio vennero usati per stimare la dimensione del pianeta e per calcolare la distanza tra Terra e Sole, allora sconosciuta. In epoca moderna i transiti sono usati per analizzare dalla Terra la composizione della tenue atmosfera e come valido elemento di confronto per i metodi di individuazione di pianeti extrasolari. Come nel caso della Luna e di Venere, anche per Mercurio dalla Terra è visibile un ciclo delle fasi, sebbene sia abbastanza difficile osservarlo con strumenti amatoriali.

## Storia delle Osservazioni popoli antichi

Le osservazioni più antiche del pianeta di cui si ha traccia storica sono riportate nelle tavole MUL.APIN, eseguite probabilmente da astronomi assiri intorno al XIV secolo a.C. Il nome utilizzato per designare Mercurio in questi testi, redatti in scrittura cuneiforme, è trascritto come Udu. Idim. Gu. Ud il pianeta saltellante. Le registrazioni babilonesi risalgono al I millennio a.C. I Babilonesi chiamarono il pianeta Nabu o Nebo, dio della scrittura e della saggezza nella loro mitologia<sup>1</sup>. Gli Egizi e i Greci assegnarono a Mercurio, come anche a Venere, due nomi: uno come stella del mattino, l'altro come stella della sera. Per gli Egizi alle due apparizioni corrispondevano rispettivamente Seth, un dio nefasto che veniva scacciato dalla luce accecante del Sole nascente,

e Horus, un dio benigno associato alla figura del faraone e dello Stato. Invece nella tradizione greca sono rintracciabili due coppie di nomi per Mercurio. La più antica, attestata nell'epoca di Esiodo fine dell'VIII, inizio del VII secolo a.C., consistette in Stilbon, il brillante, come stella del mattino, e Hermaon, come stella della sera. Successivamente queste denominazioni furono sostituite rispettivamente da Apollo e Hermes. Alcune fonti attribuiscono a Pitagora intorno al 500 a.C. la comprensione del fatto che si trattasse di un unico pianeta, altre invece propendono per un periodo più tardo, intorno al 350 a.C. I Romani chiamarono il pianeta Mercurio in onore del messaggero alato degli dei, il dio romano del commercio e dei viaggi corrispondente al greco Hermes. Probabilmente il pianeta ricevette questi nomi a causa del suo rapido moto attraverso il cielo, più veloce di quello di tutti gli altri pianeti. Tolomeo nel II secolo a.C. scrisse della possibilità che Mercurio transitasse davanti al Sole nelle Ipotesi Planetarie. Suggerì che nessun transito era stato fino ad allora osservato o a causa delle dimensioni del pianeta, troppo piccolo perché il fenomeno risultasse osservabile o perché l'evento era poco frequente. Nell'Antica Cina Mercurio era conosciuto come Chen Xing la Stella delle Ore. Era associato con il Nord e l'elemento dell'acqua nel Wu Xing. Nelle moderne culture cinese, coreana, giapponese e vietnamita si è conservato il legame con il Wu Xing e il pianeta è chiamato la stella dell'acqua. Nella mitologia indiana Mercurio era identificato con il dio Budha, che presiedeva il mercoledì. Nella mitologia germanica e norrena il pianeta e il giorno erano dedicati al dio Odino Woden in germanico. I Maya potrebbero aver rappresentato il pianeta come un gufo o forse come quattro gufi, due che ne esprimevano le caratteristiche mattutine e altri due per quelle serali, che recavano messaggi all'oltretomba. Nel Surya Siddhanta, un trattato di astronomia indiano del V secolo, è fornita una stima del diametro di Mercurio con un errore rispetto al valore oggi noto inferiore dell'1%. Tuttavia il calcolo era basato sull'inaccurata supposizione che il diametro angolare del pianeta fosse di 3,0 arco minuti. Nell'astronomia islamica medievale l'astronomo andaluso Al-Zarqali nell'XI secolo descrisse il deferente dell'orbita geocentrica di Mercurio come un ovale; ciò non influenzò in seguito né le sue teorie, né i suoi calcoli astronomici. Nel XII secolo Ibn Bajja osservò due pianeti come macchie scure sulla faccia del Sole. Nel XIII secolo Qotb al-Din Shirazi dell'Osservatorio di Maragheh suggerì che il suo predecessore potesse aver osservato il transito di Mercurio o di Venere sul disco solare. Questi rapporti medievali di transiti planetari furono in seguito reinterpretati come osservazioni di macchie solari. Nel XV secolo l'astronomo indiano Nilakantha Somayaji della Scuola del Kerala sviluppò un modello planetario del sistema solare parzialmente eliocentrico in cui Mercurio orbitava attorno al Sole che a sua volta orbitava attorno alla Terra. Si trattava di un modello simile al sistema ticonico suggerito dall'astronomo danese Tycho Brahe nel XVI secolo.



**Il modello di Ibn al-Shatir per le apparizioni di Mercurio utilizza la moltiplicazione degli epicicli attraverso la coppia di Tusi, eliminando quindi l'eccentrico e l'equante**

## Storia delle Osservazioni in epoca scientifica

Galileo Galilei compì le prime osservazioni telescopiche di Mercurio all'inizio del XVII secolo. Sebbene fosse riuscito nell'osservare le fasi di Venere, il suo telescopio non era sufficientemente potente da permettergli di cogliere anche quelle di Mercurio, che furono scoperte nel 1639 da Giovanni Battista Zupi fornendo la prova definitiva che Mercurio orbita intorno al Sole. Intanto nel 1631 Pierre Gassendi era stato il primo a osservare un transito di Mercurio innanzi al Sole, secondo le previsioni fornite da Giovanni Keplero. Evento raro nell'astronomia è il passaggio di un pianeta davanti a un altro occultazione visto dalla Terra. Mercurio e Venere si occultano ogni pochi secoli e l'evento del 28 maggio 1737 rilevato da John Bevis all'Osservatorio di Greenwich è l'unico storicamente osservato. La prossima occultazione di Mercurio da parte di Venere avverrà il 3 dicembre 2133. Le difficoltà insite nella osservazione di Mercurio lo hanno reso il pianeta meno studiato tra gli otto del sistema solare. Nel 1800 Johann Schröter compì alcune osservazioni delle caratteristiche superficiali e affermò di aver osservato montagne alte 20 km. Friedrich Wilhelm Bessel utilizzò i disegni di Schröter e stimò erroneamente un periodo di rotazione di 24 ore e un'inclinazione dell'asse di rotazione di  $70^\circ$ . Negli anni ottanta dell'Ottocento Giovanni Schiapparelli compose mappe più accurate della superficie e suggerì che il periodo di rotazione del pianeta fosse di 88 giorni, uguale a quello di rivoluzione, e quindi che il pianeta fosse in rotazione sincrona con il Sole così come la Luna lo è con la Terra. L'impegno nel mappare la superficie di Mercurio fu proseguito da Eugène Michel Antoniadi che pubblicò le sue mappe e osservazioni in un libro nel 1934. Molte caratteristiche superficiali del pianeta, e in particolare quelle di albedo, prendono il loro nome dalle mappe di Antoniadi. L'astronomo italiano Giuseppe Colombo osservò che il periodo di rotazione era circa due terzi di quello orbitale e propose una risonanza 3:2 invece che l'1:1 prevista dalla teoria della rotazione sincrona. Nel giugno del 1962 ricercatori sovietici dell'Istituto di radio-ingegneria ed elettronica dell'Accademia delle Scienze dell'URSS diretto da Vladimir Kotelnikov furono i primi a eseguire osservazioni radar del pianeta. Tre anni dopo ulteriori osservazioni radar condotte con il radiotelescopio di Arecibo dagli statunitensi Gordon Pettengill e R. Dyce indicarono in modo conclusivo che il pianeta completa una rotazione in 59 giorni circa. La scoperta risultò sorprendente perché l'ipotesi che la rotazione di Mercurio fosse sincrona era ormai ampiamente accettata e vari astronomi, riluttanti ad abbandonarla, proposero spiegazioni alternative per i dati osservativi. In particolare, la temperatura notturna della superficie del pianeta risultò molto più alta rispetto al valore atteso nel caso di rotazione sincrona e, tra le varie ipotesi, fu proposta l'esistenza di venti estremamente potenti che avrebbero redistribuito il calore dalla faccia illuminata a quella buia. I dati raccolti dalla missione spaziale Mariner 10 confermarono la previsione di Colombo e l'esattezza delle mappe di Schiapparelli e Antoniadi. Gli astronomi rilevarono le stesse caratteristiche di albedo ogni seconda orbita e le registrarono, ma non dettero importanza necessaria a quelle dell'altra faccia di Mercurio a causa delle condizioni osservative scarse nel momento in cui le guardavano. Le osservazioni dalla Terra non permisero di acquisire maggiori informazioni su Mercurio e le sue principali caratteristiche rimasero ignote finché non fu visitato dal Mariner 10, la prima sonda spaziale a visitare il pianeta. Tuttavia recenti progressi tecnologici hanno migliorato anche le osservazioni dalla Terra e, grazie alle osservazioni condotte dall'Osservatorio di Monte Wilson con la tecnica del lucky imaging nel 2000, è stato possibile risolvere per la prima volta dettagli superficiali sulla porzione di Mercurio che non era stata fotografata dal Mariner 10. Osservazioni successive hanno permesso di ipotizzare l'esistenza di un cratere d'impatto più grande del Bacino Caloris nell'emisfero non fotografato dal Mariner 10, cratere a cui è stato informalmente dato il nome di Bacino Skinakas. La maggior parte del pianeta è stata mappata dal radiotelescopio di Arecibo, con una risoluzione di 5 km, compresi depositi polari in crateri in ombra che potrebbero essere composti da ghiaccio d'acqua.





## Missioni Spaziali

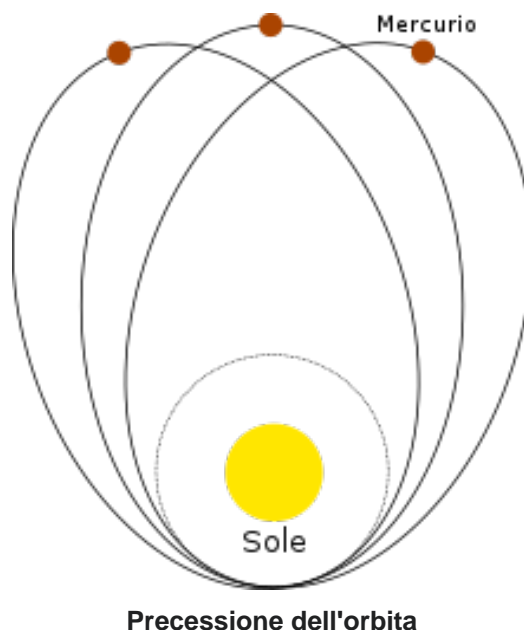
Mercurio fu visitato per la prima volta nel 1974 dalla sonda statunitense Mariner 10 che teletrasmise a Terra fotografie registrate nel corso di tre successivi sorvoli. Concepito per l'osservazione di Venere e Mercurio, il Mariner 10 venne lanciato il 3 novembre 1973 e raggiunse il pianeta nel 1974, usando per la prima volta nella storia la manovra di fionda gravitazionale. La sonda effettuò il primo sorvolo il 29 marzo a una distanza minima di 700 km, fornendo le prime immagini inedite del pianeta e risultati scientifici inaspettati: la sonda registrò un campo magnetico rilevante che si pensava fosse quasi del tutto assente. Il secondo sorvolo, il 21 settembre, fu ben più lontano del primo. Si decise di risparmiare carburante per permettere un terzo sorvolo che avrebbe permesso di capire la natura del campo magnetico: se intrinseco come quello della Terra o indotto dal vento solare come quello di Venere. Il sorvolo avvenne a circa 50.000 km dalla superficie e fornì ulteriori immagini della superficie illuminata e dettagli del polo sud. Le manovre preparatorie per il terzo sorvolo non furono prive di incidenti, ma riuscirono comunque a portare la sonda statunitense alla minima distanza da Mercurio il 16 marzo 1975, quando passò a soli 327 km dalla superficie, confermando la natura intrinseca del campo magnetico e l'esistenza di una magnetosfera. La sonda abbandonò il pianeta dopo aver fotografato il 41% della superficie del pianeta, fu spenta e rimase in orbita eliocentrica. La NASA lanciò nel 2004 la sonda Messenger il cui primo passaggio ravvicinato di Mercurio, avvenuto il 14 gennaio 2008, fu preceduto da un sorvolo ravvicinato della Terra e da due di Venere e fu seguito da tre manovre di fionda gravitazionale su Mercurio prima dell'ingresso in orbita attorno al pianeta il 18 marzo 2011. In seguito al primo fly-by di Mercurio, la sonda Messenger inviò a Terra le prime immagini dell'emisfero sconosciuto di Mercurio. La missione permise di scoprire la composizione della superficie, di rivelare la sua storia geologica, di analizzare il suo campo magnetico e di verificare la presenza di ghiaccio ai poli. La missione si concluse con il decadimento orbitale e l'impatto ad alta velocità sulla superficie, creando presumibilmente un nuovo cratere dal diametro di 16 metri. Il 20 ottobre 2018 è avvenuto il lancio da parte dell'ESA della missione spaziale Bepi Colombo, così battezzata in onore dello scienziato, matematico e ingegnere Giuseppe Colombo 1920-1984. La missione è volta esclusivamente all'esplorazione del pianeta più interno. La missione ha l'obiettivo di approfondire lo studio del pianeta e di testare la teoria della relatività generale; consiste di due orbiter, uno che si stabilizzerà in un'orbita con un apoermeo di 1500 km per lo studio ravvicinato del pianeta e uno con apoermeo di 11.600 km per lo studio della magnetosfera.



La prima immagine dell'emisfero sconosciuto di Mercurio inviata da Messenger il 14 gennaio 2008

## Parametri Orbitali

L'orbita di Mercurio risulta essere ellittica solo in prima approssimazione, è infatti soggetta alla precessione del perielio, effetto che mise in difficoltà gli astronomi e i calcoli della fisica classica del XIX secolo. Le anomalie osservate nell'orbita del pianeta fecero ipotizzare a Urbain Le Verrier nel 1859 l'esistenza di un altro pianeta, che chiamò Vulcano; si supposeva che l'orbita di Vulcano si svolgesse interamente all'interno di quella di Mercurio. Il primo a dare una spiegazione corretta delle anomalie della precessione del perielio dell'orbita di Mercurio fu Albert Einstein grazie alla relatività generale nel 1915, che proprio su questo fenomeno ha avuto uno dei suoi banchi di prova. Mercurio si muove su un'orbita di eccentricità 0,2056, a una distanza dal Sole compresa fra 46.000.000 e 69.820.000 km, con un valore medio di 58.000.000 km rispettivamente 0,307, 0,466 e 0,387 UA. Il periodo siderale di Mercurio è di 88 giorni, mentre il periodo sinodico è di 115,9 giorni. Il piano orbitale è inclinato sull'eclittica di  $7^\circ$ . La velocità media siderale del pianeta è pari a 47 km/s; si tratta della più alta fra i pianeti del sistema solare. Il moto di rotazione mercuriano è molto lento: esso impiega 58,6 giorni per compiere un giro su sé stesso, e completa quindi tre rotazioni ogni due rivoluzioni, in risonanza orbitale 3:2, questo fa sì che la durata del giorno solare 176 giorni sia il doppio della durata dell'anno 88 giorni; Mercurio è l'unico pianeta del sistema solare sul quale la durata del giorno è maggiore del periodo di rivoluzione. Al perielio, la velocità orbitale molto elevata diventa la componente predominante del moto solare apparente per un osservatore sulla superficie, il quale dapprima vedrebbe il Sole stazionario nel cielo, poi invertire il suo cammino muovendosi da ovest verso est e infine riprendere la sua traiettoria ordinaria.



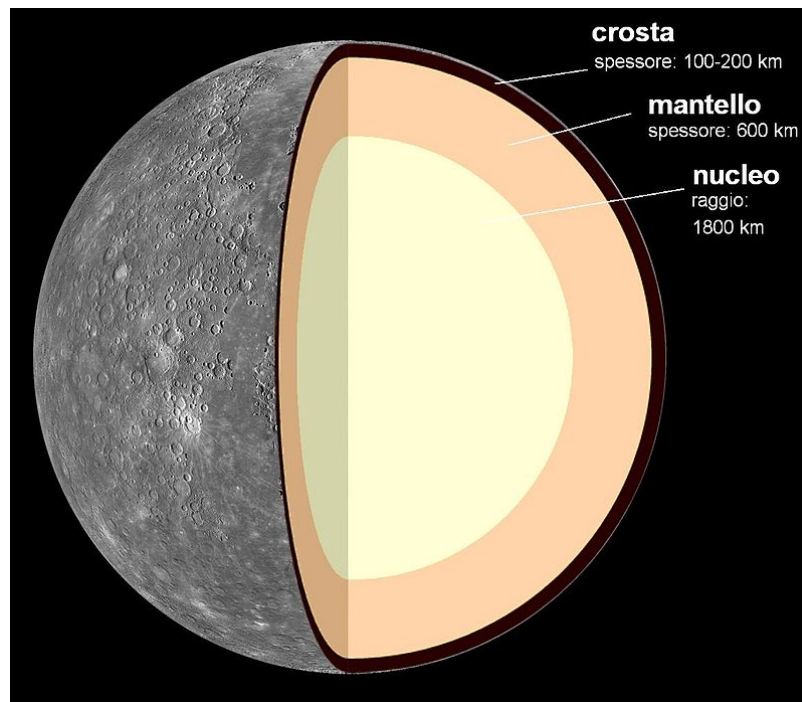
## Caratteristiche Fisiche

Mercurio è il più piccolo pianeta del sistema solare in termini di dimensioni e massa. In termini di dimensioni è più piccolo anche di Titano e Ganimede, satelliti naturali di Saturno e Giove, e, a causa delle dimensioni ridotte e della sua vicinanza al Sole, l'attrazione gravitazionale del pianeta non è riuscita a trattenere un'atmosfera consistente. La sua forma è grossomodo sferica e non presenta la caratteristica forma geoidale schiacciamento ai poli e rigonfiamento all'equatore degli altri pianeti. Il pianeta non possiede né satelliti naturali né anelli planetari, sebbene nel 1974 poco prima del sorvolo ravvicinato della sonda Mariner 10 un'errata interpretazione di alcuni dati ricevuti lasciò immaginare la presenza di una luna di notevoli dimensioni.

## Struttura Interna

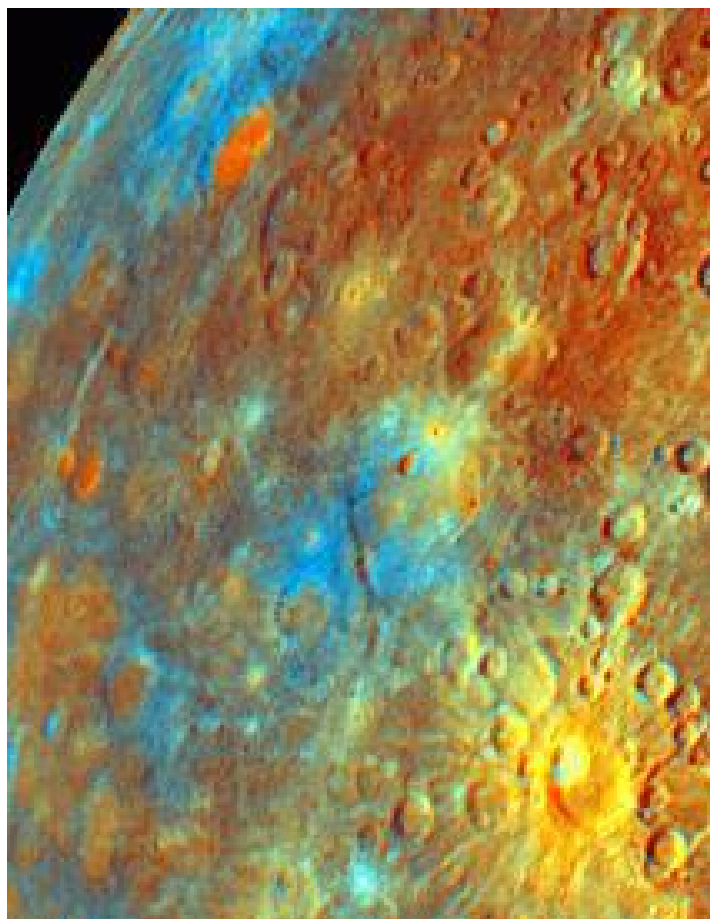
La densità di Mercurio, pari a  $5,43 \text{ g/cm}^3$ , si discosta molto da quella lunare e, al contrario, è molto vicina a quella terrestre. Questo lascia supporre che, nonostante le somiglianze con la Luna, la struttura interna del pianeta sia più vicina a quella della Terra. Mentre l'alta densità terrestre è il risultato della forte compressione gravitazionale, Mercurio è molto più piccolo e le regioni interne non sono compresse come quelle terrestri, pertanto per avere una tale densità, si suppone che il suo nucleo debba essere relativamente grande e ricco di ferro. I geologi stimano che il nucleo di Mercurio occupi circa il 42% del suo volume, mentre per la Terra questa percentuale è del 17%. Una ricerca pubblicata nel 2007, unita alla presenza del debole campo magnetico, suggerisce che Mercurio possieda un nucleo metallico fuso elettricamente conduttore, circondato da un mantello dello spessore di 500–700 km composto da silicati. Sulla base dei dati di Mariner 10 e di osservazioni compiute dalla Terra, la crosta di Mercurio è ritenuta essere spessa 100–300 km. Una caratteristica distintiva della superficie di Mercurio è la presenza di numerose creste strette, che si estendono fino a diverse centinaia di chilometri in lunghezza. Si ritiene che queste si siano formate dal raffreddamento e dalla contrazione di nucleo e mantello, successivi alla solidificazione della crosta. Il nucleo di Mercurio ha un contenuto di ferro superiore a quella di qualsiasi altro grande pianeta del sistema solare, e diverse teorie sono state proposte per spiegare questa caratteristica. La teoria più accreditata è che in origine Mercurio avesse un rapporto metalli-silicati simile alle comuni meteoriti condriti, che costituiscono il tipico materiale roccioso presente nel sistema solare, e avesse una massa di circa 2,25 volte quella attuale. Quando il sistema solare si stava formando, Mercurio potrebbe essere stato colpito da un planetesimo di circa  $1/6$  della sua massa e di diverse migliaia di chilometri di diametro. L'impatto avrebbe spazzato via gran parte della crosta e del mantello presenti a quel tempo, lasciando il nucleo come componente predominante del corpo celeste. Un processo simile, noto come teoria dell'impatto gigante, è stato proposto per spiegare la formazione della Luna. Un'altra ipotesi suggerisce che Mercurio potrebbe essersi formato dalla nebulosa solare prima che la produzione di energia del Sole si stabilizzasse. In questa ipotesi Mercurio avrebbe avuto inizialmente due volte la sua massa attuale, ma dopo la contrazione del proto sole, le temperature si alzarono a 2.500-3.500 K e forse anche più 10.000 K. A tali temperature gran parte delle rocce superficiali di Mercurio sarebbero vaporizzate e sarebbero state poi spazzate via dal vento solare. Una terza ipotesi propone che le perturbazioni dovute alla nebulosa solare causarono la perdita delle particelle più leggere, che non furono raccolte da Mercurio. Ciascuna ipotesi predice una diversa composizione della superficie. Una risposta conclusiva potrebbe provenire dal confronto tra i risultati delle osservazioni che saranno condotte dalla missione Bepi Colombo con quelli ottenuti dalla missione Messenger. La sonda Messenger ha rilevato in superficie livelli di potassio e zolfo superiori alla norma, che sembrerebbero escludere l'ipotesi dell'impatto gigante, e la conseguente vaporizzazione della crosta e del mantello. I risultati sembrerebbero dunque favorire la terza ipotesi; a ogni modo, occorrono ulteriori studi per confermarla.





## Superficie

Le prime fotografie della superficie si devono all'astronomo greco-francese Eugène M. Antoniadi 1870-1944 che all'inizio del ventesimo secolo disegnò delle mappe di questo pianeta. Similmente alla Luna, il suolo di Mercurio è ampiamente craterizzato a causa dei numerosi impatti di asteroidi che hanno contrassegnato il suo passato e presenta bacini riempiti da vecchie colate laviche, ancora evidenti a causa della mancanza quasi assoluta di un'atmosfera. Alcuni crateri sono circondati da raggi. Si esclude la presenza sul pianeta di placche tettoniche. Mercurio, come la Luna, ha subito urti con meteoriti ed è normale che i pianeti in possesso di un'atmosfera consistente risentano in misura assai minore dell'effetto degli impatti, poiché i corpi incidenti vengono fortemente erosi dall'attrito atmosferico. Inoltre, l'atmosfera stessa erode lentamente la superficie del pianeta, cancellando le tracce dell'urto. Oltre all'atmosfera ci sono diversi elementi che cancellano i crateri causati da asteroidi che non sono infatti presenti su Mercurio, come il vento e l'acqua. Inoltre, un numero così ampio di crateri induce a supporre che il pianeta, come la Luna, manchi da numerosi secoli di attività interna. Sulla superficie di Mercurio l'accelerazione di gravità è mediamente pari a 0,378 volte quella terrestre. A titolo di esempio si potrebbe affermare che un uomo dalla massa di 70 kg che misurasse il proprio peso su Mercurio facendo uso di una bilancia tarata sull'accelerazione di gravità terrestre registrerebbe un valore pari a circa 25,9 kg. La ridotta distanza di Mercurio dal Sole e l'assenza di un'atmosfera consistente lo rendono un pianeta con una grande escursione termica, con temperature superiori a 350 °C nella zona esposta al Sole, contro i -170 °C nella parte in ombra. Inoltre, l'insolazione media della superficie mercuriana è pari a circa 6 volte e mezzo quella della Terra; la costante solare ha un valore di 9,2 kW/m<sup>2</sup>.



**Mercurio in falsi colori, immagine ripresa dalla sonda Mariner 10 (1974) ed elaborata dal Jet Propulsion Laboratory della NASA**

## **Crateri**

Alcuni tra i più grandi crateri di Mercurio superano i 200 km e prendono il nome di bacini. Al centro di molti crateri, spesso riempiti da antiche colate laviche ancora evidenti, s'innalzano piccole formazioni montuose. Il bacino più grande e più noto è la Caloris Planitia, dal diametro di circa 1 500 km: si tratta di una grande pianura circolare circondata da anelli di monti. Questo bacino deve il suo nome al fatto che si trova sempre esposto alla luce del Sole durante il passaggio di Mercurio al perielio e pertanto è uno dei punti più caldi del pianeta. Dal cratere fuoriescono gas a base di potassio e sodio che contribuiscono alla tenue atmosfera del pianeta. Agli antipodi del bacino Caloris si trova un tipo di terreno collinare del tutto insolito, assente sul resto della superficie, di età stimata pari a quella dello stesso bacino antipodale. Si è formato probabilmente quando un grosso asteroide, impattando su Mercurio, ha generato il bacino Caloris provocando un'onda d'urto che ha convogliato agli antipodi. Alcuni crateri del polo nord, invece, sono in grado di schermare completamente la luce solare in alcune zone al loro interno, grazie anche alla scarsa inclinazione dell'asse orbitale, mantenendo la temperatura considerevolmente bassa per migliaia e milioni di anni, fino a circa  $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e conservare così grosse riserve di acqua allo stato solido.



**Il cratere Zola su Mercurio, Mariner 10, 1974**

## **Atmosfera**

Per via della sua bassa attrazione gravitazionale Mercurio è sprovvisto di una vera e propria atmosfera come quella terrestre, fatta eccezione per esili tracce di gas probabilmente frutto dell'interazione del vento solare con la superficie del pianeta. La composizione atmosferica è stata determinata come segue: ossigeno 42%, sodio 29%, idrogeno 22%, elio 6%, potassio 0,5% e tracce di argon, anidride carbonica, vapore acqueo, azoto, xeno, kripton, neon, calcio e magnesio. La pressione atmosferica al suolo, misurata dalla sonda Mariner 10, è nell'ordine di un millesimo di pascal. La bassa densità dell'atmosfera non le permette di innescare un meccanismo di distribuzione del calore ricevuto dal Sole; per questo motivo e per la rotazione estremamente lenta, che espone lo stesso emisfero alla luce solare diretta per lunghi periodi, l'escursione termica su Mercurio è la più elevata finora registrata nell'intero sistema solare: l'emisfero illuminato raggiunge i 600 K 700 K nelle zone equatoriali, quello in ombra scende spesso fino a 90 K. L'azione intensa del vento solare produce un fenomeno assente negli altri pianeti ma presente nelle comete quando si avvicinano al Sole: la presenza di una coda cometaria. Il vento solare espelle atomi neutri dalla prossimità del pianeta rendendo misurabile una coda fino a distanze di oltre un milione di chilometri, composta principalmente da atomi di sodio.

## **Astronomia su Mercurio**

Il cielo di Mercurio sarebbe nero anche di giorno, non avendo il pianeta un'atmosfera che lo circonda. La differenza più grande rispetto al cielo terrestre è la maggior grandezza apparente del Sole, il cui diametro angolare può variare da  $1,14^\circ$  all'afelio a  $1,73^\circ$  quando si trova al perielio, cioè rispettivamente 2,1 e 3,2 volte più grande rispetto al Sole visto dalla Terra. L'orbita di Mercurio è infatti piuttosto eccentrica, e la distanza del pianeta dalla nostra stella varia considerevolmente nel corso del suo anno, durante cioè il moto di rivoluzione attorno al Sole. Mercurio ruota sul proprio asse più lentamente che attorno al Sole, con una risonanza di 3:2 che perdura il giorno solare 176 giorni terrestri: è questo il periodo necessario per rivedere il Sole al medesimo meridiano. Il moto del Sole nel cielo di Mercurio non è tuttavia rettilineo e costante, perché quando il pianeta si avvicina al perielio, la velocità orbitale aumenta, superando la velocità di rotazione, con il risultato che il Sole appare fermarsi in cielo e spostarsi per un breve periodo nella direzione opposta, per poi riprendere il suo normale scorrere da est a ovest. Sole a parte, l'oggetto più luminoso nei cieli di Mercurio sarebbe Venere, il pianeta più vicino, ancor più luminoso che visto dalla Terra. Da Mercurio, infatti, oltre alla minore distanza, Venere sarebbe un pianeta esterno e arriverebbe all'opposizione mostrando il suo disco completamente illuminato, arrivando a brillare di magnitudine  $-7,7$ . La Terra sarebbe comunque anch'essa molto luminosa, di magnitudine  $-5$ ,

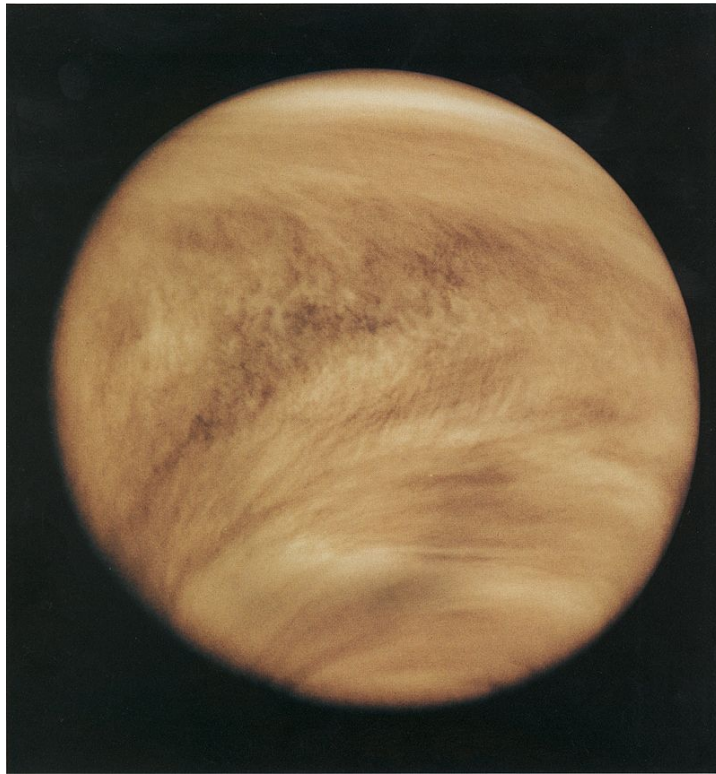
accompagnata dalla Luna, di magnitudine  $-1,2$ . La separazione angolare massima tra la Terra e la Luna viste da Mercurio sarebbe di circa  $15'$ . Marte, meno brillante che visto dalla Terra, alla massima vicinanza raggiungerebbe una magnitudine  $-0,7$ , mentre gli altri pianeti del sistema solare apparirebbero sostanzialmente come visti dalla Terra e leggermente meno luminosi, vista la maggiore distanza.



**La Terra e la Luna viste dalla sonda Messenger in un'immagine ripresa il 6 maggio 2010. Sebbene al momento dello scatto la sonda non fosse ancora in orbita attorno a Mercurio, l'immagine per distanza e angolazione mostra il sistema Terra-Luna come apparirebbe a un osservatore posto su Mercurio.**



## ***Secondo Pianeta Venere***



**Nuvole nell'atmosfera di Venere, rivelate dall'osservazione ai raggi ultravioletti  
missione Pioneer Venus, 1979**

Venere è il secondo pianeta del Sistema solare in ordine di distanza dal Sole con un'orbita quasi circolare che lo porta a compiere una rivoluzione in 224,7 giorni terrestri. Prende il nome dalla dea romana dell'amore e della bellezza e il suo simbolo astronomico è la rappresentazione stilizzata della mano di Venere che sorregge uno specchio. Con una magnitudine massima di  $-4,6$ , è l'oggetto naturale più luminoso nel cielo notturno dopo la Luna e per questo motivo è conosciuto fin dall'antichità. Venere è visibile soltanto poco dopo il tramonto e poco prima dell'alba e per questa ragione è spesso stato chiamato dagli antichi Greci e poi dai Romani stella della sera o stella del mattino. La scoperta che si tratta dello stesso oggetto sarebbe stata introdotta in occidente da Pitagora, ma sarebbe dovuta agli astronomi della Mesopotamia. Infatti nella Tavola di Venere di Ammi-Saduqa sono riportate osservazioni risalenti al 1.550 a.C. o antecedenti, in cui non si fa distinzione fra l'astro del mattino e quello della sera. Classificato come un pianeta terrestre, a volte è definito il pianeta gemello della Terra, cui è molto simile per dimensioni e massa. Tuttavia, per altri aspetti è piuttosto differente dal nostro pianeta. L'atmosfera di Venere è costituita principalmente da anidride carbonica ed è molto più densa dell'atmosfera terrestre, con una pressione al livello del suolo pari a 92 atm. La densità e la composizione dell'atmosfera creano un impressionante effetto serra che rende Venere il pianeta più caldo del sistema solare. Venere è avvolto da uno spesso strato di nubi altamente riflettenti composte principalmente di acido solforico, che impediscono la visione nello spettro visibile della superficie dallo spazio. Il pianeta non è dotato di satelliti o anelli e ha un campo magnetico più debole di quello terrestre.

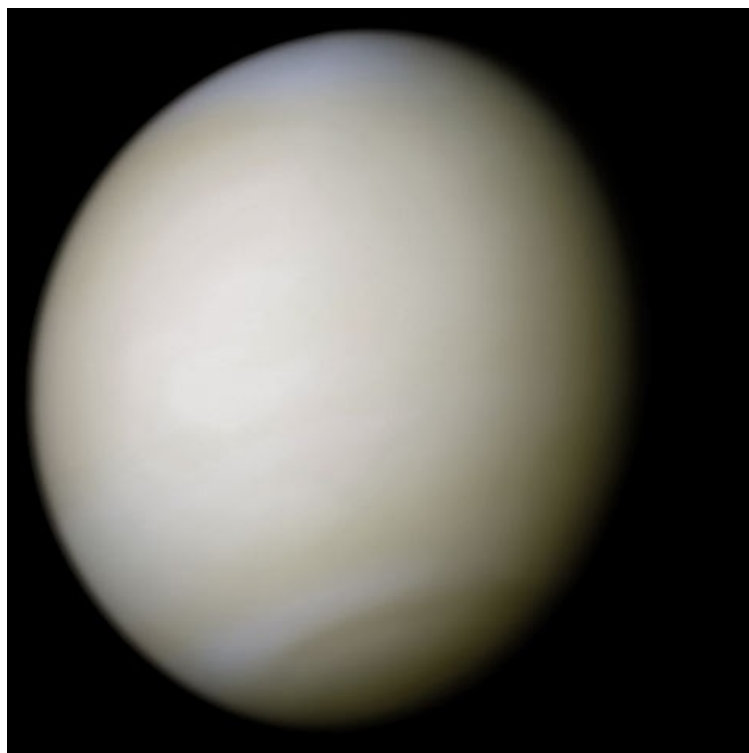
## Conoscendo il Pianeta

<b>Parametri Orbitali, Dati Fisici e Osservativi</b>					
<b>Orbitali</b>		<b>Fisici</b>		<b>Osservativi</b>	
<i>Semiasse</i>	<i>0.73UA</i>	<i>Diamet. equat.</i>	<i>12.103 km</i>	<i>Magn. app. min</i>	
<i>Perielio</i>	<i>0,72 UA</i>	<i>Superficie</i>	<i>4,6x10<sup>14</sup>m<sup>2</sup></i>	<i>Magn. app med</i>	<i>-4,38</i>
<i>Afelio</i>	<i>0,74 UA</i>	<i>Period. Rotaz.</i>	<i>243,7 gg</i>	<i>Magn. app max</i>	<i>-4,8</i>
<i>CRF orbitale</i>	<i>4,55 UA</i>	<i>Period. Orbit.</i>	<i>224,7 gg</i>		
<i>Inclinazione</i>	<i>3,39°</i>	<i>Period. Sinod.</i>	<i>583,9 gg</i>		
<i>Satelliti</i>	<i>0</i>	<i>Temp. max</i>	<i>548 °C</i>		
<i>Anelli</i>	<i>0</i>	<i>Temp. med.</i>	<i>464 °C</i>		
		<i>Temp. min.</i>	<i>380 °C</i>		
		<i>Press. Atmosf</i>	<i>92 bar</i>		

**UA = distanza Terra/Sole media pari a km149.597.870.**

## Osservazioni

Poiché si tratta di un pianeta interno, ovvero con un'orbita più vicina al Sole di quella della Terra, può essere visto di solito soltanto per poche ore e nelle vicinanze del Sole stesso: durante il giorno la luminosità solare lo rende difficilmente visibile. Invece è molto brillante subito dopo il tramonto sull'orizzonte a ovest oppure poco prima dell'alba verso est, compatibilmente con la sua posizione. Ha l'aspetto di una stella lucentissima di colore giallo-biancastro, di gran lunga più brillante di qualsiasi altra stella nel firmamento. L'osservazione al telescopio è migliore quando non è completamente immerso nell'oscurità, ma piuttosto nelle luci del crepuscolo o in pieno giorno, in quanto il contrasto col cielo è minore e consente una migliore percezione dei deboli dettagli e delle ombreggiature dell'atmosfera; inoltre il pianeta in questi casi è più alto sull'orizzonte e la stabilità dell'immagine è migliore, in quanto meno disturbata dal riverbero dell'atmosfera terrestre. Particolarmente utile nell'osservazione telescopica di Venere è l'uso di filtri colorati per selezionare la luce a diverse lunghezze d'onda o di filtri neutri e polarizzatori per ottimizzare la quantità di luce nelle osservazioni crepuscolari, permettendo di evidenziare maggiormente le tenui caratteristiche dell'atmosfera venusiana. Essendo l'orbita del pianeta interna a quella della Terra, lo si vede muoversi alternativamente a est e a ovest del Sole. La sua elongazione distanza angolare tra un pianeta e il Sole può arrivare fino a 47°, variando tra due valori massimi a ovest e a est. Le variazioni della sua elongazione massima sono dovute più alla variazione della distanza tra Terra e Sole che alla forma dell'orbita di Venere e quando l'elongazione è ampia Venere può restare visibile per diverse ore. Periodicamente passa davanti o dietro al Sole entrando quindi in congiunzione: quando il passaggio avviene dietro si ha una congiunzione superiore, mentre quando avviene davanti si ha una congiunzione inferiore e la faccia illuminata del pianeta non è visibile dalla Terra in nessun momento del giorno. Il diametro angolare di Venere durante una congiunzione inferiore è di circa 66 secondi d'arco. L'eclittica sull'orizzonte è un fattore molto importante per la visibilità di Venere. Nell'emisfero boreale l'inclinazione è massima dopo il tramonto nel periodo dell'equinozio di primavera oppure prima dell'alba nel periodo dell'equinozio d'autunno. È importante anche l'angolo formato dalla sua orbita e l'eclittica: infatti Venere può avvicinarsi alla Terra fino a 40 milioni di chilometri e raggiungere un'inclinazione di circa 8° sull'eclittica con un forte effetto sulla sua visibilità. A parte il Sole, la Luna e con difficoltà Giove, Venere è l'unico corpo celeste che è visibile a occhio nudo anche di giorno, sia pure a condizione che la sua elongazione dal Sole non sia troppo piccola e che il cielo sia abbastanza terso.



**Venere in colori reali fotografato dalla sonda Mariner 10 il 5 febbraio 1974**

## **Fasi**

Similmente alla Luna, la porzione di superficie visibile dalla Terra non risulta completamente illuminata e la variazione di illuminazione nel corso dell'orbita genera delle fasi. Al variare delle fasi varia anche il diametro apparente e la luminosità percepita da un osservatore sulla Terra. La fase piena, durante la quale la faccia del pianeta rivolta verso la Terra è completamente illuminata, si verifica quando Venere si trova in congiunzione superiore col Sole e non è osservabile dal nostro pianeta. Alla congiunzione inferiore corrisponde il massimo valore del diametro apparente di Venere, pari a 66 secondi d'arco, e la sua fase nuova, con la faccia del pianeta rivolta verso la Terra quasi completamente in ombra.

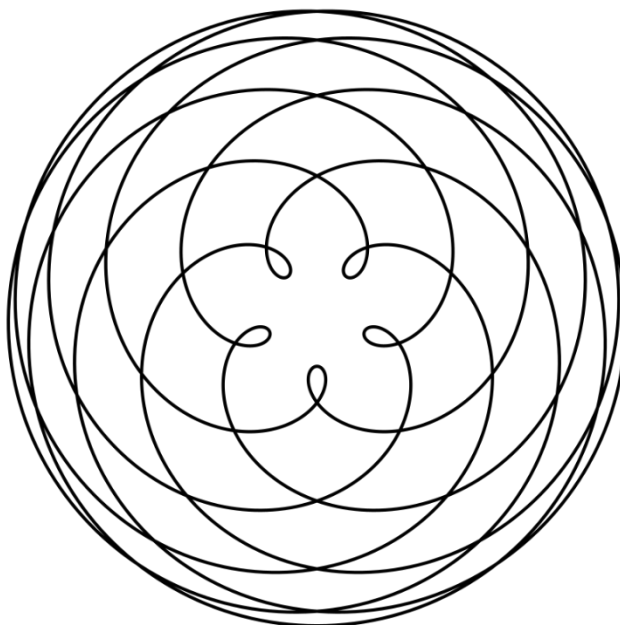


**Fasi di Venere ed evoluzione del suo diametro apparente.**

**Immagini riprese dall'Osservatorio Europeo Australe nel 2004.**

## Pentagramma

Il percorso effettuato da Venere e osservato dalla Terra ha una forma molto particolare dovuta alla risonanza orbitale di circa 13:8. Sotto questa risonanza il percorso descrive una figura simile a un pentagramma in funzione di direzione e distanza, pentagramma che si ripete ogni 8 anni, ovvero 13 orbite complete di Venere: il rapporto  $8/13$  è approssimativamente 0,6154 mentre il periodo di rivoluzione di Venere è 0,6152 anni, da qui la risonanza. Questa leggera differenza fa sì che dopo 8 anni il pentagramma successivo sia ruotato rispetto al precedente di  $2,55^\circ$ .



**Il pentagramma di Venere. La Terra è posizionata al centro del diagramma e la curva rappresenta la posizione relativa di Venere in funzione del tempo.**

## Storia delle Osservazioni

Conosciuto probabilmente già nella preistoria, Venere fu osservato poi da tutte le culture antiche come quella dei babilonesi che lo chiamarono Ištar, in onore della dea dell'amore, dell'erotismo e della guerra. Egizi, Greci, Maya e Romani distinguevano invece le apparizioni mattutine e serali in due corpi distinti, chiamandolo stella del mattino o stella della sera: Lucifero quando appariva prima dell'alba e Vespero quando appariva a ovest al calar del Sole. Per via del suo splendore in molte culture, tra cui quella Maya, Venere rappresentava due divinità gemelle, in cui venivano rispettivamente identificati Quetzalcoatl nella Stella del Mattino e Xolotl nella Stella della Sera. Era inoltre l'astro più studiato nei suoi movimenti in cielo. Per gli Inca rappresentava Chasca, dea dell'aurora dai lunghi capelli ricci, considerata il paggio del Sole poiché non si discostava mai troppo da esso. Fu Galileo Galilei il primo a studiare Venere, osservandolo con il suo cannocchiale. Egli riuscì ad osservare le fasi e notò che queste erano simili a quelle della Luna, dimostrando la correttezza della teoria eliocentrica predetta qualche decennio prima dall'astronomo polacco Niccolò Copernico che sosteneva che Venere era posto tra la Terra e il Sole e ruotava attorno a quest'ultimo. A maggior sostegno della teoria c'era anche l'osservazione di Galileo della variazione del diametro angolare di Venere durante le sue diverse fasi a seconda della sua distanza dalla Terra. Tuttavia, come usavano al tempo molti dotti quando ancora non erano completamente sicuri delle loro scoperte, Galileo inviò a Giuliano de' Medici a Praga l'11 Dicembre 1610 che lo comunicò subito a Keplero, l'anagramma in latino Haec immatura a me frustra leguntur oy Queste cose premature sono da me dette invano che si risolveva in seguito come: Mater Amorum aemulatur Cinthiae figuras ovvero La madre degli amori Venere imita le forme di Cinzia la Luna. Nel 1677 Edmond Halley suggerì di misurare la distanza Terra-Sole con



osservazioni da diversi luoghi della Terra, in particolare in occasione dei transiti di Venere. Successive spedizioni in vari luoghi del mondo permisero di misurare la parallasse del Sole in 8,85 secondi d'arco. I transiti storici di Venere furono particolarmente importanti al riguardo; inoltre, il transito del 1761 permise all'astronomo russo Michail Lomonosov di ipotizzare la presenza di un'atmosfera su Venere. Lo spesso strato di nubi e l'alta luminosità del pianeta hanno costituito un serio ostacolo nell'individuazione del periodo di rotazione del pianeta. Cassini e Francesco Bianchini osservarono Venere e mentre il primo ipotizzò un periodo di 24 ore, Bianchini teorizzò un periodo di 24 giorni. Tuttavia, William Herschel si accorse che il pianeta era ricoperto da uno spesso strato di nubi e che il periodo di rotazione non poteva dunque essere determinato con sicurezza. Così rimase un enigma anche se nel XVIII secolo molti astronomi pensavano che esso fosse di 24 ore, assumendo corrette le osservazioni di Cassini. Giovanni Schiapparelli fu il primo a sollevare nuove obiezioni a questa ipotesi ipotizzando che, come Mercurio, anche Venere fosse in rotazione sincrona, bloccato dal Sole. Schiapparelli infatti concluse i suoi studi l'11 agosto 1878 scrivendo: Addio bella Afrodite, ormai la tua rotazione non sarà più un segreto. Nel 1932, W. Adams e T. Dunham mediante osservazioni spettroscopiche nell'infrarosso scoprirono linee di assorbimento del carbonio che permisero di ipotizzare che l'anidride carbonica fosse predominante nell'atmosfera venusiana. Nel 1961, durante una congiunzione, il periodo di rotazione di Venere fu misurato con il radiotelescopio di Goldstone, in California, anche se fu confermato definitivamente il suo moto retrogrado solo nel 1964. Intanto nel 1962 il Mariner 2 aveva raggiunto con successo il pianeta, inviando i primi dati su temperatura superficiale e composizione atmosferica.

## Transiti

Un transito di Venere è un evento molto raro e avviene quando il pianeta si interpone fra la Terra e il Sole, oscurandone una piccola parte del disco. Solo gli ultimi due transiti, quelli del 2004 e del 2012, sono avvenuti successivamente all'acquisizione di conoscenze sul pianeta grazie all'esplorazione in loco con sonde spaziali e sono stati osservati con strumenti scientifici moderni. Nella storia dell'astronomia moderna e contemporanea i transiti di Venere sono considerati molto importanti sotto diversi punti di vista, tra cui quello della esatta misurazione dell'unità astronomica, la distanza tra la Terra e il Sole. I transiti avvengono a coppie, con un intervallo di otto anni tra i transiti di ciascuna coppia e intervalli di 121,5 e 105,5 anni tra coppie successive. C'è qualche menzione di transiti di Venere sul Sole in epoche antiche, come quella dello scienziato persiano Avicenna che riporta di aver osservato Venere nel 1032 come una macchia che passava sopra il Sole, concludendo che il pianeta fosse più vicino al Sole di quanto lo sia la Terra. Anche l'astronomo arabo Ibn Bajja menzionò transiti di Mercurio e Venere sul Sole nel XII secolo; tuttavia studi storici di Bernard R. Goldstein e altri nel XX secolo escludono che questi transiti possano essere stati effettivamente osservati ad occhio nudo, concludendo che i due astronomi molto probabilmente osservarono delle macchie solari. La prima previsione di un transito di Venere fu di Keplero nel 1631, anche se nessuno all'epoca riuscì ad osservarlo perché non visibile dall'Europa. Keplero non aveva previsto il transito che avvenne 8 anni dopo, cosa che fece il giovane astronomo britannico Jeremiah Horrocks, che nel 1639 osservò per primo un transito di Venere davanti al Sole. Da Horrocks in poi sono stati osservati solo altri sei transiti nel corso della storia, tra cui quello del 1761 che permise la scoperta dell'esistenza di un'atmosfera su Venere. In quegli anni però lo studio dei transiti era volto alla stima della distanza Terra-Sole, su suggerimento di Halley che agli inizi del XVIII secolo aveva rivolto un appello agli astronomi più giovani dell'epoca, astronomi che avrebbero potuto essere ancora in vita in occasione dei successivi transiti del 1761 e del 1769. Molti astronomi di diverse nazionalità raggiunsero le località, sparse per il mondo e a volte difficili da raggiungere, da dove sarebbero stati visibili i transiti previsti. Particolarmente sfortunato fu l'astronomo francese Guillaume Le Gentil, che dopo aver perso il transito del 1761 osservabile dall'India perché a bordo di una nave in movimento, perse anche quello di otto anni dopo perché quel giorno il cielo si rannuvolò. Tornato in Francia ebbe anche la brutta sorpresa di trovarvi la moglie risposata mentre lui era stato dato per morto dalle autorità. Il famoso navigatore britannico James Cook intraprese nel 1768 il suo primo viaggio diretto a Tahiti perché incaricato dalla Royal Society di studiare un transito di Venere. Nel 1771 Jérôme Lalande, un altro astronomo francese, utilizzando i dati dei transiti precedenti stimò

in 153 milioni di chilometri la distanza della Terra dal Sole, distanza poi corretta nel secolo successivo da Simon Newcomb in 149,67 milioni di km grazie alle osservazioni dei transiti del 1874 e del 1882. I transiti di Venere in epoca contemporanea destano un nuovo interesse perché costituiscono un valido elemento di confronto per i metodi di individuazione di pianeti extrasolari.

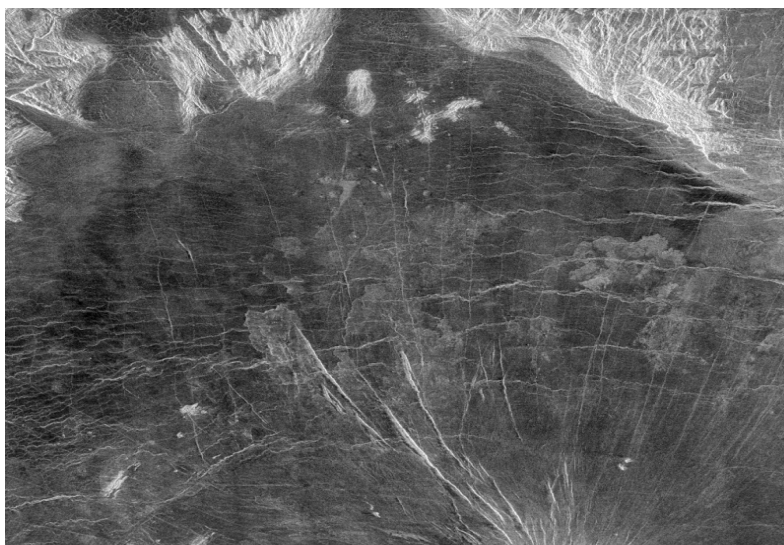


**Immagine amatoriale di Venere nel transito del 2004. Chiaramente visibile l'alone analogo a quello osservato da Lomonosov nel 1761.**

## **Missioni Spaziali**

La storia delle esplorazioni spaziali verso Venere nasce nel 1961 con la missione sovietica Venera 1 che effettuò il fly-by del pianeta senza però riuscire a trasmettere alcun dato. Il programma Venera continuò fino al 1983 con 16 missioni di successo. È oggi noto che Venere possiede una superficie rovente su cui insiste un'atmosfera corrosiva con un'altissima pressione, ma in passato questi dati erano sconosciuti e ciò lasciò campo aperto a qualsiasi ipotesi. Carl Sagan teorizzò che Venere fosse coperta da un oceano non di acqua, ma di idrocarburi. Altri studiosi ritenevano che il pianeta fosse ricoperto da paludi mentre altri ancora ipotizzavano un mondo desertico. Gli scienziati sovietici delle missioni Venera erano così propensi ad aspettarsi un oceano che sulla sonda Venera 4, lanciata nel 1967, installarono un morsetto fatto di zucchero bianco raffinato che a contatto con l'acqua o un altro fluido dotato della giusta composizione e temperatura si sarebbe sciolto facendo scattare l'antenna che con questo stratagemma si sarebbe salvata dall'affondamento della sonda. Su Venere la sonda Venera 4 non solo non trovò un oceano, ma non raggiunse neppure la superficie. Smise infatti di trasmettere quando la pressione atmosferica superò le 15 atmosfere, soltanto una frazione delle 93 atmosfere presenti sulla superficie del pianeta. Comunque si trattava di un risultato straordinario: per la prima volta un veicolo costruito dall'uomo aveva comunicato dati relativi all'analisi delle condizioni di un ambiente extraterrestre. I sovietici studiarono quindi una sonda più resistente. Il gruppo di Anatolij Perminov ipotizzò dapprima che la sonda dovesse resistere a una pressione di 60 atmosfere, quindi di 100 e infine di 150 atmosfere. Per tre anni il gruppo di Perminov testò le sonde in condizioni estreme e, per simulare l'atmosfera di Venere, costruì la più grande pentola di Papin del mondo, una pentola a pressione gigantesca in cui le sonde venivano immerse finché non si schiacciavano o fondevano. Venera 7 fu costruita per sopportare una pressione di 180 atmosfere e lanciata il 17 agosto 1970; il 15 dicembre dello stesso anno trasmise il segnale tanto atteso. La prima sonda costruita dall'uomo

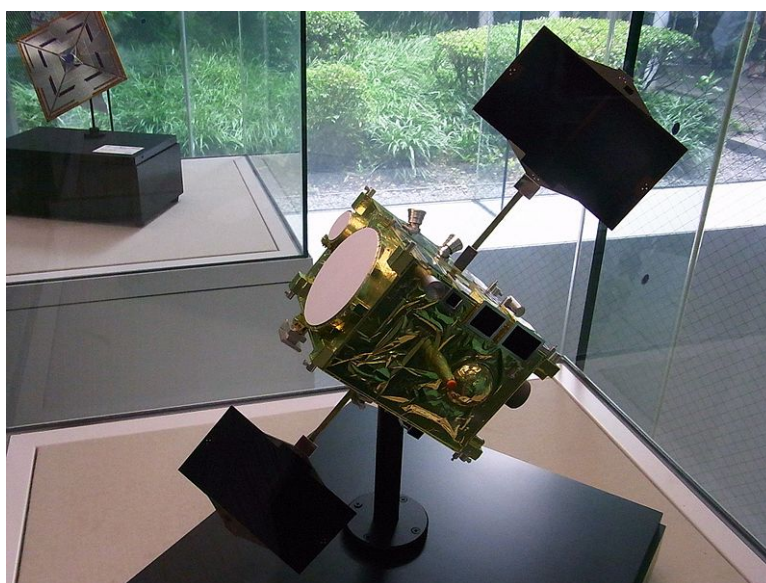
era atterrata su un altro pianeta e aveva comunicato con la Terra. Nel 1975 i sovietici inviarono le sonde gemelle Venera 9 e 10 equipaggiate con un disco frenante per la discesa nell'atmosfera e di ammortizzatori per l'atterraggio. Le sonde trasmisero immagini in bianco e nero della superficie di Venere mentre le sonde Venera 13 e 14 rimandarono le prime immagini a colori di quel mondo. La NASA iniziò il suo programma di esplorazione spaziale verso Venere nel 1962 con il programma Mariner: tre sonde riuscirono con successo ad effettuare un fly-by del pianeta e trasmettere i dati alla Terra. Nel 1978 nell'ambito del progetto Pioneer Venus per lo studio dell'atmosfera venusiana gli statunitensi lanciarono diverse sonde separate verso Venere. Negli anni ottanta i sovietici proseguirono invece con le sonde Venera: le Venera 15 e 16 lanciate nel 1983 e dotate di Radar ad apertura sintetica mapparono l'emisfero nord del pianeta rimanendo in orbita attorno ad esso. Nel 1985 i sovietici lanciarono anche le sonde Vega 1 e 2 che rilasciarono moduli sulla superficie prima di andare verso l'incontro con la cometa di Halley, l'altro oggetto di studi di quelle missioni. Vega 2 atterrò nella regione Aphrodite raccogliendo un campione di roccia contenente anortosite - troctolite, materiale raro sulla Terra, ma presente negli altopiani lunari. Nel 1989 la NASA, utilizzando lo Space Shuttle, lanciò verso Venere la Sonda Magellano, dotata di un radar che permise una mappa quasi completa del pianeta con una risoluzione nettamente migliore di quella delle precedenti missioni, lavorando per ben 4 anni prima della caduta e della conseguente distruzione nell'atmosfera venusiana, anche se qualche frammento potrebbe essere arrivato sulla superficie. Negli ultimi decenni, per risparmiare combustibile, Venere è stato spesso usato come fionda gravitazionale per missioni dirette verso altri pianeti del sistema solare. Fu il caso della sonda Galileo, diretta verso Giove e le sue lune, e la missione Cassini-Huygens, diretta all'esplorazione del sistema di Saturno, che effettuò due fly-by con Venere tra il 1998 e il 1999 prima di dirigersi verso le regioni esterne del sistema solare. Nel 2004 il pianeta venne usato due volte come fionda gravitazionale dalla sonda Messenger per dirigersi all'interno del sistema solare verso Mercurio. Venus Express, lanciata nel 2006, ha eseguito una mappatura completa della superficie e sebbene fosse inizialmente prevista una durata della missione di due anni, essa è stata estesa fino al dicembre del 2014. In otto anni la sonda ha fornito prove dell'esistenza passata di oceani, evidenze di fulmini nell'atmosfera e ha individuato un gigantesco doppio vortice polare al polo sud. Inoltre ha individuato la presenza del gruppo ossidrilico nell'atmosfera e di un sottile strato di ozono. Nel 2010 l'agenzia spaziale giapponese dimostrò la fattibilità di raggiungere Venere dalla Terra usando solo una vela solare come sistema di propulsione: a giugno lanciò la sonda Ikaros che raggiunse Venere in sei mesi. La sonda non trasportava nessuno strumento scientifico per l'osservazione del pianeta. Il 26 novembre del 2013 la NASA ha lanciato il Venus Spectral Rocket Experiment VeSpR, un telescopio suborbitale per lo studio dell'atmosfera di Venere nell'ultravioletto, osservazione non possibile dalla superficie della Terra in quanto l'atmosfera terrestre assorbe la maggior parte dei raggi UV, con lo scopo di individuare la quantità di atomi di idrogeno e deuterio rimasti nell'atmosfera venusiana.



**Immagine radar del sito di atterraggio della sonda sovietica Venera 10, fotografato dalla sonda statunitense Magellano 1990**

## Missioni attuali e future

Planet-C, o Venus Climate Orbiter, è una sonda giapponese che, seguendo la tradizione nipponica, è stata ribattezzata dopo il lancio col nome di Akatsuki ed è stata lanciata il 20 maggio 2010 dal centro spaziale di Tanegashima. Sarebbe dovuta entrare in orbita attorno a Venere nel dicembre del 2010 con lo scopo di studiare la dinamica dell'atmosfera venusiana, ma a causa di un problema col computer di bordo la manovra fallì. Non avendo subito gravi danni la sonda è riuscita a entrare in orbita attorno al pianeta nel dicembre 2015. L'agenzia spaziale indiana, forte del successo della missione Chandrayaan-1 sulla Luna, sta pianificando la missione Indian Venusian orbiter mission, con lancio nel 2020, per lo studio dell'atmosfera del pianeta. Venera-D è un progetto dell'Agenzia Spaziale Russa, progetto che inizialmente prevedeva l'atterraggio di un lander sulla superficie nel 2014. Tuttavia, in fase di riprogettazione della missione, dopo i fallimenti delle sonde Phobos, il progetto perse priorità rispetto ad altre missioni all'interno del programma spaziale russo e, dopo il rinvio del lancio al 2024, nell'agosto del 2012 si è deciso di posticipare la missione al 2026.



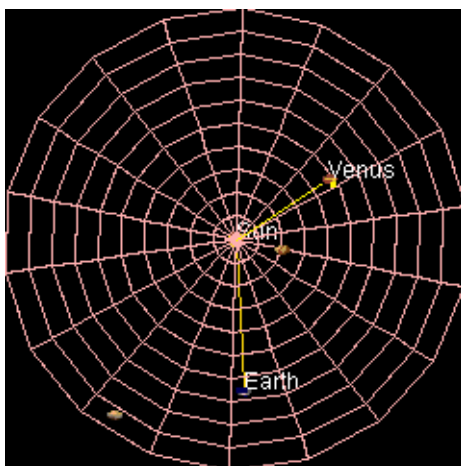
Modello della sonda Akatsuki esposta al museo municipale di Sagamihara

## Parametri Orbitali e Rotazione

L'orbita di Venere è quasi circolare, con un'eccentricità orbitale inferiore all'1% e una distanza media dal Sole di 108 milioni di chilometri. Con una velocità orbitale di 35 km/s, Venere impiega 224,7 giorni a compiere una rivoluzione attorno al Sole mentre il periodo sinodico, ossia l'intervallo di tempo per ritornare nella stessa posizione nel cielo terrestre rispetto al Sole, è di 584 giorni. L'inclinazione orbitale rispetto all'eclittica è di  $3,39^\circ$ . La rotazione di Venere, rimasta ignota fino alla seconda metà del XX secolo, avviene secondo il moto retrogrado in senso orario, cioè al contrario di come avviene per il Sole e per la maggior parte degli altri pianeti del sistema solare. La rotazione è molto lenta, con il giorno sidereo venusiano che dura circa 243 giorni terrestri ed è superiore al periodo di rivoluzione attorno al Sole; la velocità di rotazione all'equatore risulta di appena 6,5 km/h. Alcune ipotesi sostengono che la causa è da ricercarsi nell'impatto con un asteroide di dimensioni ragguardevoli. All'inizio del 2012, analizzando i dati della sonda Venus Express, si è scoperto che la rotazione di Venere sta ulteriormente rallentando, con un periodo di rotazione che è stato misurato in 243,0185 giorni, 6 minuti e mezzo superiore alla precedente misurazione di 16 anni prima effettuata dalla sonda Magellano. Venere è il pianeta che più si avvicina alla Terra e in occasione delle congiunzioni inferiori la distanza media tra i due corpi è di circa 41 milioni di chilometri. Essendo l'orbita di Venere quasi circolare, il massimo avvicinamento alla Terra avviene quando questa si trova al perielio. In queste occasioni e nei periodi di massima



eccentricità orbitale dell'orbita terrestre, la distanza minima di Venere dalla Terra è di 38,2 milioni di chilometri. A causa della rotazione retrograda, il moto apparente del Sole dalla superficie venusiana è opposto a quello osservato dalla Terra: quindi chi si trovasse su Venere vedrebbe l'alba a ovest e il tramonto a est. Nonostante il pianeta impieghi 225 giorni terrestri per compiere una rivoluzione attorno al Sole, tra un'alba e l'altro giorno solare trascorrono soltanto 117 giorni terrestri perché mentre Venere ruota su se stesso in senso retrogrado, si sposta anche lungo la propria orbita compiendo il moto di rivoluzione che procede in senso opposto a quello di rotazione. Ne deriva che lo stesso punto della superficie si viene a trovare nella stessa posizione rispetto al Sole ogni 117 giorni terrestri.

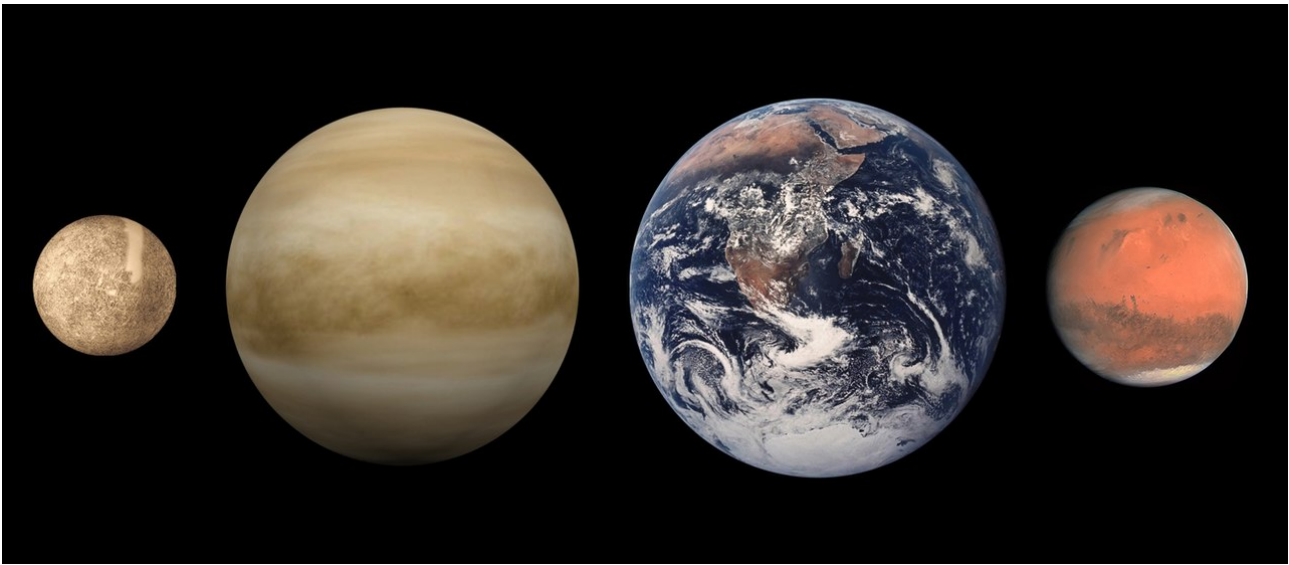


Rappresentazione del movimento di Venere e della Terra attorno al Sole

## Caratteristiche Fisiche

Venere è uno dei quattro pianeti terrestri del sistema solare. Questo significa che, come la Terra, è un corpo roccioso. Venere è inoltre molto simile al nostro pianeta anche per dimensioni e massa, tanto che è spesso descritto come il suo gemello. La sua forma è sferica e, a causa del suo moto lento di rotazione, non presenta il rigonfiamento equatoriale tipico degli altri pianeti. Si stima che abbia attraversato di recente una fase geologicamente attiva con molti vulcani e una superficie relativamente giovane rinnovata completamente negli ultimi 500 milioni di anni da flussi di lava. Il diametro di Venere è inferiore a quello terrestre di soli 650 km e la sua massa è l'81,5% di quella terrestre. A causa di questa differenza di massa sulla superficie di Venere l'accelerazione di gravità è mediamente pari a 0,88 volte quella terrestre. A titolo di esempio, un uomo di 70 kg che misurasse il proprio peso su Venere mediante un dinamometro tarato sull'accelerazione di gravità terrestre registrerebbe un valore pari a circa 62 kg utilizzando come unità di misura i chilogrammi forza. A dispetto di queste somiglianze, le condizioni sulla superficie venusiana sono molto differenti da quelle terrestri a causa della spessa atmosfera di anidride carbonica, la più densa tra quelle di tutti i pianeti terrestri: l'atmosfera di Venere è costituita per il 96,5% da anidride carbonica, mentre il restante 3,5% è composto soprattutto da azoto. La notevole percentuale di anidride carbonica è dovuta al fatto che Venere non ha un ciclo del carbonio per incorporare nuovamente questo elemento nelle rocce e nelle strutture di superficie, né esistono organismi, come le piante sulla Terra, che la possano assorbire in biomassa. È proprio l'anidride carbonica ad aver generato un fortissimo effetto serra a causa del quale il pianeta è divenuto così caldo che si ritiene che gli antichi oceani di Venere siano evaporati, lasciando un'asciutta superficie desertica con molte formazioni rocciose. Il vapore acqueo si è poi dissociato a causa dell'alta temperatura e dell'assenza di un campo magnetico planetario e il leggero idrogeno è stato diffuso nello spazio interplanetario dal vento solare. La pressione atmosferica sulla superficie del pianeta è pari a 92 volte quella della Terra. Il pianeta è ricoperto da un opaco strato di nuvole di acido solforico, altamente riflettenti, che insieme alle nubi dello strato inferiore impediscono la visione della superficie dallo spazio. Questa impenetrabilità ha creato nel corso dei secoli un alone di mistero

riguardo al pianeta e dato origine a molteplici discussioni, perdurate fino a quando i segreti del suolo di Venere furono rivelati dalla planetologia nel ventesimo secolo. La mappatura della sua superficie è stata possibile attraverso i dati forniti dalla sonda Magellano tra il 1990 e il 1991. Ne è risultato un suolo con evidenze di estensivo vulcanismo; anche la presenza di zolfo nell'atmosfera poteva essere un indizio di eruzioni recenti però l'assenza di flussi lavici accanto alle caldere visibili rimane un problema. Il pianeta mostra pochi crateri da impatto, il che depone a favore di una superficie relativamente giovane con un'età stimata di 300-600 milioni di anni. La mancata evidenza di attività tettonica viene collegata alla notevole viscosità del materiale che costituisce la crosta, viscosità che ostacola la subduzione; ciò sarebbe determinato dalla mancanza di acqua che fungerebbe altrimenti da lubrificante. Conseguentemente la perdita del calore interno risulta piuttosto limitata, così come il raffreddamento del nucleo per convezione. Infine, l'assenza di moti convettivi determina la mancanza di un campo magnetico planetario simile a quello terrestre. Invece si ritiene che il pianeta subisca perdite di calore interno in seguito a importanti eventi periodici di affioramento che rinnovano la superficie.

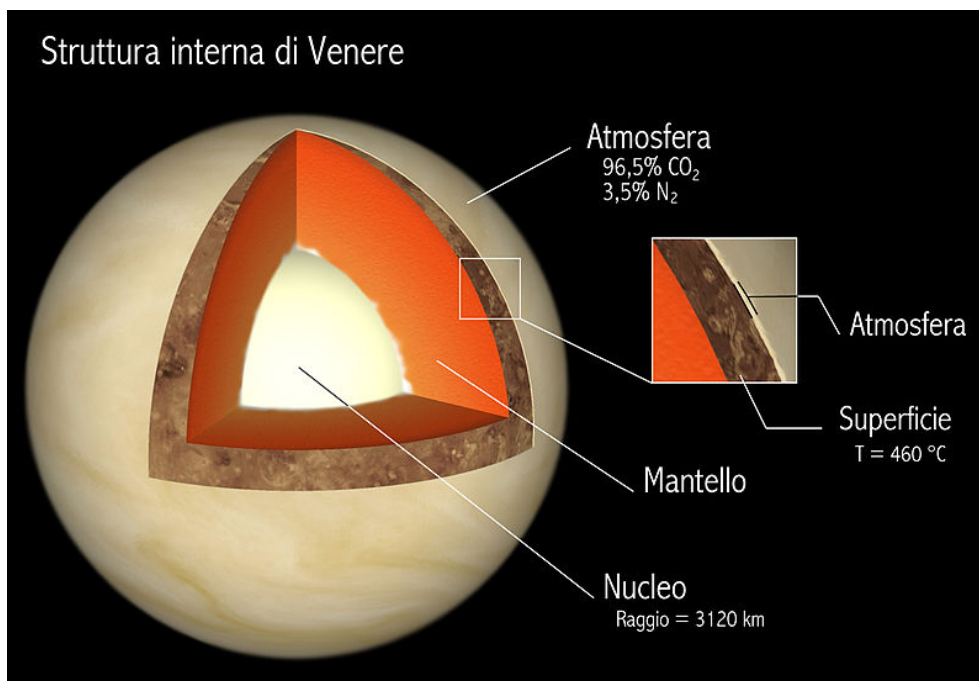


**Confronto delle dimensioni dei quattro pianeti terrestri: da sinistra, Mercurio, Venere, la Terra e Marte**

## **Struttura Interna**

Anche se vi sono poche informazioni dirette sulla sua struttura interna e sulla geochimica venusiana a causa della mancanza di dati sismici e della mancata conoscenza del suo momento di inerzia, le somiglianze in termini di dimensioni e di densità tra Venere e la Terra suggeriscono che i due pianeti possano avere una struttura interna simile: un nucleo, un mantello e una crosta. Si ritiene che il nucleo venusiano, come quello della Terra, sia almeno parzialmente liquido dal momento che i due pianeti hanno avuto un processo di raffreddamento simile. Le dimensioni leggermente inferiori di Venere suggeriscono che le pressioni al suo interno siano significativamente più basse di quelle terrestri. La differenza principale tra i due pianeti è l'assenza di tettonica delle placche su Venere, dovuta probabilmente alla diversa composizione della litosfera e del mantello venusiani rispetto a quelli terrestri: l'assenza di acqua porta a una viscosità maggiore e quindi a un maggiore grado di accoppiamento litosfera/mantello. L'omogeneità della crosta di Venere determina una minore dispersione di calore dal pianeta, che presenta un flusso di calore con valori di circa la metà inferiori a quelli terrestri. Questi due motivi impediscono la presenza di un campo magnetico rilevante che sulla Terra è generato dai moti convettivi interni del pianeta. Si ritiene che Venere sia soggetto a periodici episodi di movimenti tettonici per cui la crosta sarebbe subdotta rapidamente nel corso di pochi milioni di anni, con intervalli di alcune centinaia di milioni di anni di relativa stabilità. Questo contrasta fortemente con la condizione più o meno stabile di subduzione e di deriva continentale che si verifica sulla

Terra. Tuttavia, la differenza è spiegabile con l'assenza su Venere di oceani che agirebbero come lubrificanti nella subduzione. Le rocce superficiali di Venere avrebbero meno di mezzo miliardo di anni poiché l'analisi dei crateri di impatto suggerisce che le dinamiche di superficie avrebbero modificato la superficie stessa, eliminando gli antichi crateri, negli ultimi miliardi di anni.



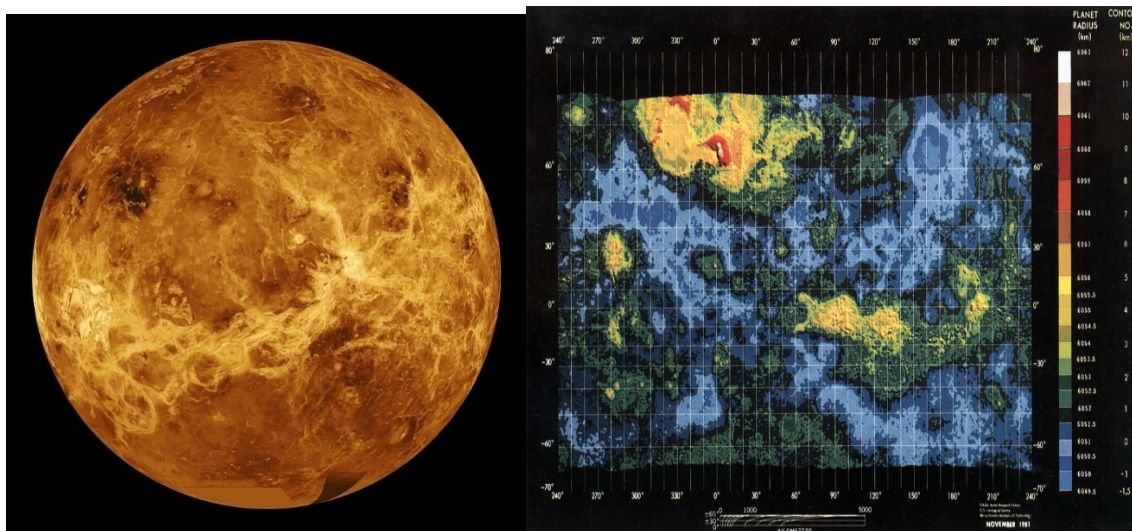
Struttura interna di Venere

## Superficie

Le sonde Venera, che si posarono sulla superficie di Venere, ripresero aree costituite principalmente da rocce di basalto. La prima e unica mappatura completa del pianeta è stata ottenuta attraverso la sonda Magellano, operativa tra il 1990 e il 1994. Furono così individuati un migliaio circa di crateri da impatto, un numero basso se confrontato con i dati relativi alla superficie terrestre. La scarsa presenza di crateri e il fatto che essi sono relativamente grandi, oltre i 3 km di diametro, è dovuto alla densa atmosfera venusiana che impedisce l'arrivo in superficie dei meteoriti più piccoli, causandone la disgregazione prima dell'impatto al suolo. Circa l'80% della superficie di Venere è formata da pianure vulcaniche che per il 70% mostrano dorsali da corrugamento, e per il 10% sono proprio lisce. Il resto è costituito da due altopiani definiti continenti, uno nell'emisfero nord e l'altro appena a sud dell'equatore. Il continente più a nord è chiamato Ishtar Terra, dalla dea babilonese dell'amore Ištar, e ha circa le dimensioni dell'Australia. I Monti Maxwell, il più alto massiccio montuoso su Venere, si trovano su Ishtar Terra. La superficie di Venere è, rispetto a quella della Terra e di Marte, generalmente pianeggiante in quanto solo il 10% della superficie si estende oltre i 10 km d'altezza, contro i 20 chilometri che separano invece i fondi oceanici terrestri dalle montagne più alte. Il continente a sud è chiamato Aphrodite Terra, dalla dea greca dell'amore, e ha circa le dimensioni dell'America meridionale. La maggior parte di questo continente è ricoperta da un intrico di fratture e di faglie. Venere è senza dubbio il pianeta del sistema solare con la maggior quantità di vulcani: ne sono stati individuati in superficie circa 1500 di dimensioni medio-grandi, ma ci potrebbe essere fino a un milione di vulcani minori. Alcune strutture vulcaniche sono peculiari di Venere come quelle chiamate farra a forma di focaccina larghe da 20 a 50 km e alte da 100 a 1000 m, fratture radiali a forma di stella chiamate novae, strutture con fratture sia radiali che concentriche chiamate aracnoidi per la loro somiglianza con le tele di ragno e infine le coronae, anelli circolari di fratture a volte circondati da una depressione. Tutte queste strutture hanno un'origine vulcanica. La superficie di Venere appare geologicamente molto giovane, i fenomeni vulcanici sono molto



estesi e lo zolfo nell'atmosfera dimostrerebbe, secondo alcuni esperti, l'esistenza di fenomeni vulcanici attivi ancora oggi. Tuttavia, questo solleva un enigma: l'assenza di tracce del passaggio di lava che accompagni una caldera tra quelle visibili. Quasi tutte le strutture di superficie di Venere prendono il nome da figure femminili storiche o mitologiche. Le uniche eccezioni sono rappresentate dai monti Maxwell, il cui nome deriva da James Clerk Maxwell, e da due regioni chiamate Alpha Regio e Beta Regio. Queste tre eccezioni si verificarono prima che l'attuale sistema fosse adottato dall'Unione Astronomica Internazionale, l'ente che controlla la nomenclatura dei pianeti. L'UAI ha anche realizzato una cartografia suddividendo la superficie del pianeta secondo due reticolati, uno adatto ad una rappresentazione in scala 1:10 000 000, che definisce 8 maglie, e uno in scala 1:5 000 000, che definisce 62 maglie per meglio localizzare le peculiarità della superficie.



La superficie di Venere in una ricostruzione 1991

Mapa topografica di Venere

## Atmosfera

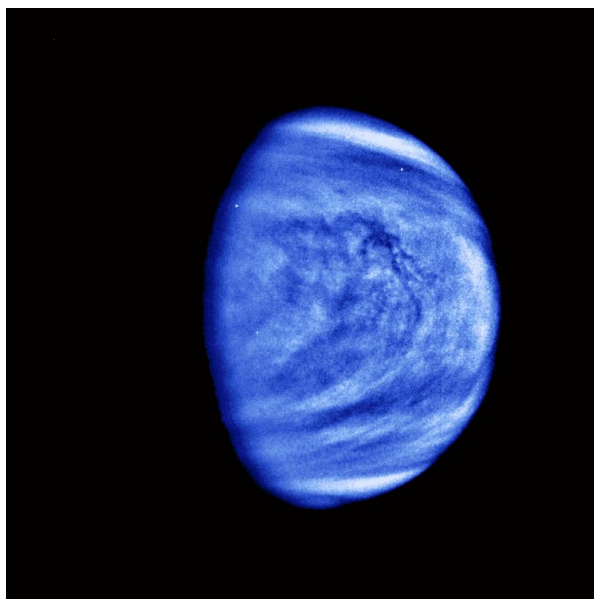
L'atmosfera di Venere è molto diversa da quella della Terra, sia in composizione sia in densità: è costituita al 96,5% di anidride carbonica e il 3,5% restante è azoto. La massa dell'atmosfera venusiana è circa 93 volte quella dell'atmosfera terrestre, mentre la pressione sulla superficie del pianeta è circa 92 volte quella della Terra, equivalente alla pressione presente a 950,36 metri di profondità in un oceano terrestre. La densa atmosfera composta essenzialmente di CO<sub>2</sub>, insieme alle nubi di anidride solforosa, genera il più forte effetto serra del sistema solare, portando la temperatura della superficie del pianeta a oltre 460 °C. Questo rende la superficie di Venere più calda di quella di Mercurio e quindi di qualunque altro pianeta del sistema solare. Questo sebbene Venere sia due volte più distante dal Sole e riceva quindi solo il 25% dell'irraggiamento ricevuto dal pianeta più interno. A causa dell'assenza di acqua su Venere non vi è umidità sulla superficie, che a causa di temperatura e condizioni atmosferiche è stata spesso descritta come infernale. Gli studi hanno evidenziato come, all'inizio del sistema solare, l'atmosfera di Venere fosse probabilmente molto più simile a quella terrestre e che vi fosse una presenza abbondante di acqua sulla superficie. Il progressivo aumento della radiazione solare causò un aumento dell'evaporazione e siccome il vapore acqueo è un potente gas serra si innescò un processo di feedback positivo. Questo processo diventò sempre più rapido fino a diventare incontrollabile: come risultato gli oceani di Venere evaporarono completamente e le temperature al suolo raggiunsero valori di 1.500 K. In seguito, la radiazione solare ha progressivamente foto dissociato il vapore acqueo in idrogeno e ossigeno. L'idrogeno non può essere trattenuto efficacemente da Venere ed è stato progressivamente perso tramite processi di fuga atmosferica, mentre l'ossigeno rimasto si è ricombinato con il carbonio portando alla composizione atmosferica odierna. Sebbene non sia possibile la vita sulla superficie di Venere, alcuni scienziati ipotizzano che essa potrebbe esistere



negli strati di nubi a 50-60 chilometri d'altezza, dove i valori di temperatura e pressione atmosferica sono simili a quelli terrestri. A settembre 2020 sono stati resi pubblici i risultati di ricerche effettuate in banda sub millimetrica dal radiotelescopio Maxwell e confermate da ALMA che hanno evidenziato in alta atmosfera la presenza di fosfina, una molecola tossica per la vita umana. La particolarità di questo semplice composto è dovuta al fatto che sulla Terra tale molecola può essere prodotta artificialmente per usi collegati alla sterilizzazione ambientale o sintetizzata da batteri anaerobici.

### **Osservazioni**

Molto tempo prima dell'arrivo delle sonde sovietiche sul suolo di Venere erano già state acquisite le prove che il pianeta disponesse di un'atmosfera. Anzitutto, prima e dopo la congiunzione inferiore, il pianeta presenta una falce rispetto al normale angolo teorico di 180° osservabile, ad esempio, nella Luna. Questa era una prima prova dell'esistenza di un'atmosfera, dal momento che il prolungamento delle punte della falce è dovuto alla riflessione della luce solare anche nell'emisfero non esposto al Sole a causa del fenomeno di diffusione, o crepuscolo, provocato dall'atmosfera. Inoltre, quando Venere occulta una stella l'occultamento non è istantaneo, ma progressivo: quando il disco del pianeta inizia a sovrapporsi a quello della stella la luce della stella è ancora parzialmente visibile; ciò si verifica perché la luce è in grado di penetrare parzialmente l'atmosfera. Analogamente quando la stella ricompare la luminosità non riappare improvvisamente, come succede nel caso dell'occultamento di una stella da parte della Luna, ma in modo continuo. Fu il transito del 1761 che permise di effettuare la prima osservazione diretta dell'atmosfera di Venere: al telescopio il pianeta, visto davanti al Sole, mostrava un margine non netto, ma sfumato, cioè appariva circondato come da un alone, prova palese dell'esistenza di un'atmosfera.

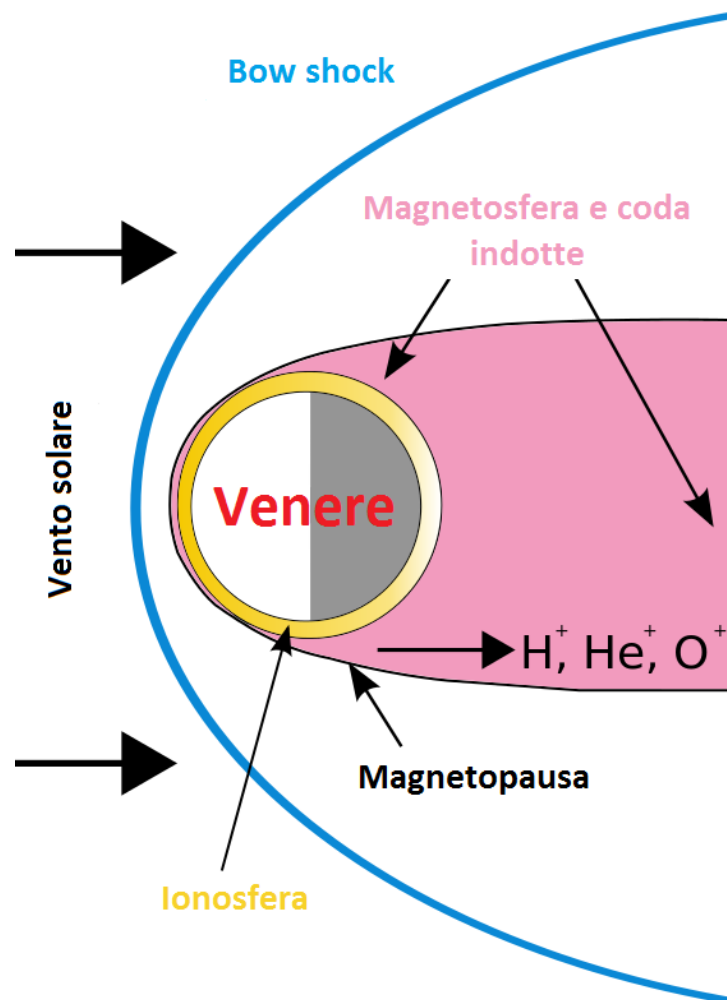


**Il prolungamento della falce in un'immagine in falsi colori ripreso dalla sonda Galileo durante la manovra di fionda gravitazionale su Venere in direzione di Giove 1990**

### **Magnetosfera**

Nel 1967 Venera 4 ha scoperto che Venere possiede un campo magnetico molto più debole di quello terrestre. Questo campo magnetico viene generato da un'interazione tra la ionosfera e il vento solare, contrariamente a quanto avviene nel caso del nostro pianeta il cui campo nasce dall'effetto dinamo delle correnti convettive all'interno del mantello. Il campo venusiano si dimostra

essere troppo debole per fornire una adeguata protezione dal vento solare. A 200 km dalla superficie, dove il campo raggiunge il suo massimo, l'intensità varia tra i 20 e i 70 nT, a seconda dell'intensità del vento solare; per confronto sulla Terra l'intensità varia tra circa 25 000 e 65.000 nT. Le particelle dell'alta atmosfera vengono continuamente strappate al campo gravitazionale del pianeta per disperdersi nello spazio. La mancanza di un campo magnetico intrinseco a Venere è un dato sorprendente, visto che è simile alla Terra per dimensioni, e inizialmente si era previsto anche per questo pianeta un effetto dinamo all'interno del mantello. Una dinamo richiede tre cose: un liquido conduttivo, la rotazione del nucleo e la convezione. Il nucleo è ipotizzato elettricamente conduttivo e, nonostante la lentezza della rotazione, le simulazioni mostrano che questa sarebbe sufficiente per produrre una dinamo. Questo implica che la dinamo manca a causa dell'assenza di convezione. Sulla Terra la convezione si verifica nel mantello a causa della temperatura inferiore di questo rispetto a quella del nucleo. Su Venere un evento di rifacimento globale può avere interrotto la tettonica a zolle e quindi eliminato le correnti convettive. Ciò ha causato l'innalzamento della temperatura del mantello e ridotto così il flusso di calore proveniente dal nucleo. Come risultato non c'è un geo dinamo interna che può produrre un campo magnetico. Una possibilità è che Venere non abbia un nucleo interno solido e che non ci sia un gradiente di temperatura all'interno in modo che tutta la parte liquida del nucleo sia approssimativamente alla stessa temperatura.



Interazione della magnetosfera di venere con il vento solare

## ***Terzo Pianeta Terra***



**L'emisfero orientale della Terra MODIS, Terra, 2002**

La Terra è il terzo pianeta in ordine di distanza dal Sole e il più grande dei pianeti terrestri del sistema solare, sia per massa sia per diametro. Sulla sua superficie, si trova acqua in tutti e tre gli stati di aggregazione solido, liquido e gassoso e un'atmosfera composta in prevalenza da azoto e ossigeno che, insieme al campo magnetico che avvolge il pianeta, protegge la Terra dai raggi cosmici e dalle radiazioni solari. Essendo l'unico corpo planetario del sistema solare adatto a sostenere la vita come concepita e conosciuta dagli esseri umani, è l'unico luogo nel quale vivono tutte le specie viventi conosciute. Dopo l'impresa di Jurij Gagarin è conosciuta con l'epiteto di "pianeta azzurro", che deriva dalle parole che il primo uomo a poterla guardare dallo spazio ha pronunciato mentre l'osservava. La sua formazione è datata a circa 4,54 miliardi di anni fa. La Terra possiede un satellite naturale chiamato Luna la cui età, stimata analizzando alcuni campioni delle rocce più antiche, è risultata compresa tra 4,29 e 4,56 miliardi di anni. L'asse di rotazione terrestre è inclinato rispetto alla perpendicolare al piano dell'eclittica: questa inclinazione combinata con la rivoluzione della Terra intorno al Sole causa l'alternarsi delle stagioni. Le condizioni atmosferiche primordiali sono state alterate in maniera preponderante dalla presenza di forme di vita che hanno creato un diverso equilibrio ecologico plasmando la superficie del pianeta. Circa il 71% della superficie è coperta da oceani di acqua salata e il restante 29% è rappresentato dai continenti e dalle isole. La superficie esterna è suddivisa in diversi segmenti rigidi detti placche tettoniche che si spostano lungo la superficie in periodi di diversi milioni di anni. La parte interna, attiva dal punto di vista geologico, è composta da uno spesso strato relativamente solido o plastico, denominato mantello, e da un nucleo diviso a sua volta in nucleo esterno, dove si genera il campo magnetico, e nucleo interno solido, costituito principalmente da ferro e nichel. Tutto ciò che riguarda la composizione della parte interna della Terra resta comunque una teoria indiretta ovvero mancante di verifica e osservazione diretta. Importanti sono le influenze esercitate sulla Terra dallo spazio esterno. Infatti la Luna è all'origine del fenomeno delle maree, stabilizza lo spostamento dell'asse terrestre e ha lentamente modificato la lunghezza del periodo di rotazione del pianeta rallentandolo; un bombardamento di comete durante le fasi primordiali ha giocato un ruolo fondamentale nella formazione degli oceani e in un periodo successivo alcuni impatti di asteroidi hanno provocato significativi cambiamenti delle caratteristiche della superficie e ne hanno alterato la vita presente. Il simbolo astronomico della Terra è un cerchio

con all'interno una croce  $\oplus$  e occasionalmente anche  $\delta$ : la linea orizzontale rappresenta l'equatore e quella verticale un meridiano..

## Conoscendo il Pianeta

<b>Parametri Orbitali, Dati Fisici e Osservativi</b>					
<b>Orbitali</b>		<b>Fisici</b>		<b>Osservativi</b>	
<i>Semiasse</i>	<i>1 UA</i>	<i>Diamet. equat.</i>	<i>12.756 km</i>	<i>Magn. app. min</i>	
<i>Perielio</i>	<i>0,98 UA</i>	<i>Superficie</i>	<i>5,01x10<sup>14</sup>m<sup>2</sup></i>	<i>Magn. app med</i>	
<i>Afelio</i>	<i>1,02UA</i>	<i>Period. Rotaz.</i>	<i>23,04 ore</i>	<i>Magn. app max</i>	
<i>CRF orbitale</i>	<i>6,18 UA</i>	<i>Period. Orbit.</i>	<i>365,25 gg</i>		
<i>Inclinazione</i>	<i>7,25°</i>	<i>Incl su Eclittica</i>	<i>23,44°</i>		
<i>Satelliti</i>	<i>1</i>	<i>Temp. max</i>	<i>57 °C</i>		
<i>Anelli</i>	<i>0</i>	<i>Temp. med.</i>	<i>15 °C</i>		
		<i>Temp. min.</i>	<i>-91 °C</i>		
		<i>Press. Atmosf</i>	<i>1 bar</i>		

**UA = distanza Terra/Sole media pari a km149.597.870.**

## Etimologia

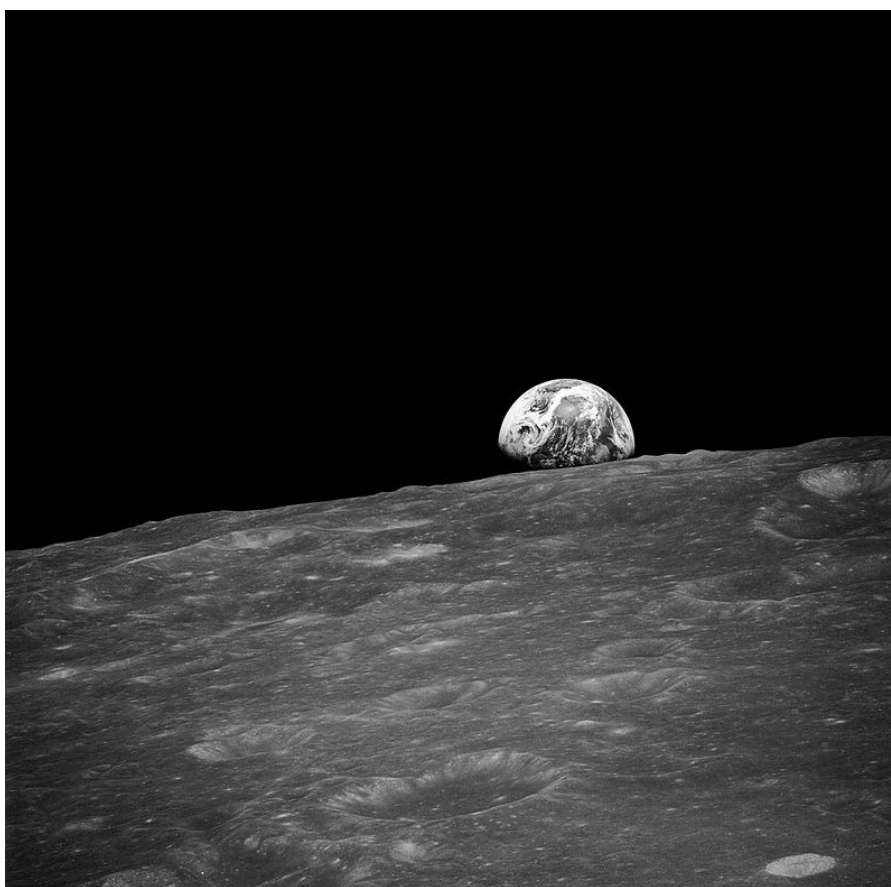
Il termine terra deriva dall'omologo latino terra, che probabilmente era originariamente materia tersa, vale a dire secca, arida, correlata al verbo torreo presente in torrido; dalla radice indoeuropea tars- con il significato di essere secco, disseccarsi che trovasi nel sanscrito trsyami, nel tedesco Durst, nell'inglese thirst e nel greco τερσαίνω.

## Storia della Terra

Gli scienziati da secoli effettuano ricerche volte a ricostruire la storia della Terra. Secondo le ipotesi più aggiornate la Terra e gli altri pianeti del Sistema Solare si formarono 4,54 miliardi di anni fa. Inizialmente liquefatto, il pianeta gradualmente si raffreddò formando una crosta terrestre sempre più di tipo granitico, simile all'odierna. La Luna si formò subito dopo, probabilmente a causa dell'impatto tra la Terra e un proto pianeta conosciuto come Theia, grande quanto Marte e avente circa il 10% della massa della Terra. Nell'urto tra i due corpi un po' della massa di questo piccolo corpo celeste si unì alla Terra e una porzione fu espulsa nello spazio e abbastanza materiale sopravvisse per formare un satellite orbitante. L'attività vulcanica, decisamente maggiore dell'odierna, produsse l'atmosfera primordiale, molto ricca di anidride carbonica. Il vapore acqueo condensandosi produsse gli oceani. Circa 3,5 miliardi di anni fa nacque la prima forma di vita. Lo sviluppo della fotosintesi permise ad alcune forme di vita di assorbire l'energia solare; l'ossigeno, prodotto di scarto della fotosintesi, si accumulò nell'atmosfera e creò uno strato di ozono una forma di ossigeno molecolare O<sub>3</sub> nell'atmosfera superiore. L'incorporazione di cellule più piccole in altre di dimensioni maggiori fece sì che si sviluppassero cellule più complesse delle cellule procarioti, chiamate eucarioti. Protette dallo strato di ozono che impediva ai raggi ultravioletti, dannosi per la vita, di attraversare l'atmosfera le varie forme di vita colonizzarono la superficie della Terra. La primordiale struttura geologica di micro placche continentali andò verso una primaria aggregazione, formando dei continenti che occasionalmente si univano per formare un supercontinente. Circa 750 milioni di anni fa la Rodinia, il primo supercontinente conosciuto, cominciò a dividersi in continenti più piccoli; i continenti in seguito si riunirono per formare



la Pannotia 600–540 milioni di anni fa e finalmente la Pangea che si divise in continenti più piccoli circa 180 milioni di anni fa ponendo le basi per la situazione geografica moderna. Dal 1960 si è ipotizzato che diverse ere glaciali tra i 750 e i 580 milioni di anni fa, durante il Neo proterozoico, abbiano coperto di ghiaccio la maggior parte del pianeta. Questa ipotesi, non ancora accettata dall'intera comunità scientifica, è conosciuta con il nome di Terra a palla di neve e deve il particolare interesse al fatto che precedette l'esplosione del Cambriano, quando le forme di vita multicellulari cominciarono a proliferare. Successivamente al Cambriano, circa 530 milioni di anni fa, si sono succedute cinque estinzioni di massa. L'ultima di esse, avvenuta 65 milioni di anni fa e probabilmente causata da una collisione meteoritica, provocò l'estinzione dei dinosauri e di altri animali, tra cui le ammonioidee, ma risparmiò alcuni piccoli animali come i mammiferi che presero il sopravvento nel periodo successivo. In seguito, i mammiferi si diversificarono, finché un animale africano, rassomigliante a una scimmia, guadagnò l'abilità di mantenere una posizione eretta. Questa evoluzione liberò le braccia e le mani dal compito della deambulazione, permise l'utilizzo di utensili, incoraggiò la comunicazione al fine di provvedere a una migliore nutrizione e creò i presupposti per lo sviluppo di una maggiore area cerebrale. Lo sviluppo della agricoltura, e della civiltà, permise agli esseri umani di plasmare la Terra in un tempo così breve come nessun'altra forma di vita era riuscita a fare, influenzando sia la natura, sia la quantità delle altre forme di vita. La fase recente delle ere glaciali incominciò circa 40 milioni di anni fa intensificandosi durante il Pleistocene, circa 3 milioni di anni fa. Le regioni polari sono state sottoposte a svariati cicli di glaciazioni e disgeli, succedutisi ogni 40-100.000 anni. L'ultima di queste fasi terminò 10.000 anni fa, lasciando il pianeta in una situazione morfo-climatica abbastanza stabile fino ai giorni nostri.



**La Terra vista dalla Luna.**

## Età della Terra

Modelli chimici basati sull'attuale abbondanza di isotopi radioattivi con lunghissimi tempi di decadimento e l'analisi composizionale di materiale non differenziato proveniente da meteoriti e dalla Luna datano la formazione della Terra a 4,54 miliardi di anni fa. La difficoltà principale nella determinazione dell'età della Terra è legata al fatto che nessuna roccia attualmente affiorante sul pianeta presenta questa età; ciò è dovuto alla natura fluida o plastica della totalità della crosta terrestre durante il primo miliardo di anni circa. Inoltre, processi di differenziazione magmatica separavano in questa prima fase i vari elementi concentrandone solo alcuni all'interno della crosta terrestre. Questo frazionamento rende difficile stabilire con esattezza il contenuto iniziale di alcuni geo cronometri e pertanto non è possibile calcolare con esattezza le abbondanze iniziali. Le rocce più antiche rinvenibili sul pianeta sono rocce continentali, si ritrovano nei cratoni e hanno un'età pari a 4,1 miliardi di anni. La maggior parte della crosta oceanica è più giovane, perché continuamente riciclata dai meccanismi legati alla tettonica delle placche: le rocce più antiche in questo tipo di crosta sono giurassiche e hanno un'età di 100 milioni di anni. L'età della Terra fu determinata da Clair Patterson nel 1953 utilizzando metodi radiometrici legati al decadimento dell'uranio.

## Caratteristiche Fisiche

La Terra, di forma geode dalla parola Gea o Geo o Ge in greco antico: Γῆ, Ghè, oppure Gaia in greco ionico e quindi nel greco omerico Γαῖα Gàia, è, nella religione e nella mitologia greca, la dea primordiale, quindi la potenza divina, della Terra è il maggiore sia per dimensione sia per massa dei quattro pianeti terrestri insieme a Mercurio, Marte e Venere, composto per lo più da roccia e silicati; questo termine è contrapposto a quello di giganti gassosi, pianeti appartenenti al sistema solare esterno. Sempre tra i pianeti terrestri è quello con la maggiore densità, la più alta gravità e il più forte campo magnetico.

## Forma

La forma della Terra è simile ad uno sferoide oblato. Più precisamente si dice che sia un geode, solido che per definizione ha la forma della Terra. Un geode è molto simile ad un ellissoide generato dalla rotazione di un'ellisse, detto ellissoide di riferimento, attorno al proprio asse minore rispetto al quale il geode ha uno scostamento massimo di 100 metri. Il diametro medio dell'ellissoide di riferimento è circa 12.742 km, tuttavia in maniera più approssimativa si può definire come  $40.009 \text{ km}/\pi$ , dato che il metro è stato originariamente definito come 1/10.000.000 della distanza tra l'equatore ed il polo Nord passando per Parigi. La rotazione della Terra è la causa del rigonfiamento equatoriale che comporta un diametro equatoriale di 43 km maggiore di quello polare. Le maggiori deviazioni locali sulla superficie sono: il Monte Everest, con 8848 m sopra il locale livello del mare e la Fossa delle Marianne, con 10.924 m sotto il locale livello marino. Se si paragona la Terra a un perfetto ellissoide essa ha una tolleranza di circa una parte su 584, o dello 0,17% che è minore dello 0,22% di tolleranza ammesso nelle palle da biliardo. Inoltre a causa della presenza del rigonfiamento il luogo maggiormente distante dal centro della Terra è situato attualmente sul Monte Chimborazo in Ecuador.

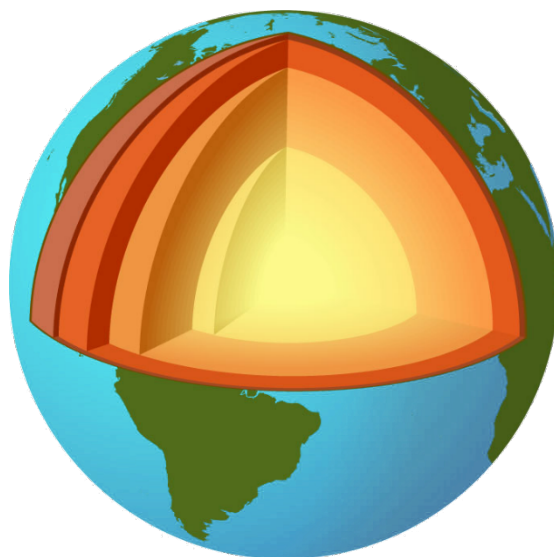
## Geosfera

L'interno della Terra, detto anche *geosfera*, è costituito da rocce di diversa composizione e fase solida, principalmente, ma talvolta anche liquida. Grazie allo studio dei sismogrammi si è giunti a considerare l'interno della Terra suddiviso in una serie di gusci; difatti si è notato che le onde sismiche subiscono fenomeni di rifrazione nell'attraversare il pianeta. La rifrazione consiste nella modifica della velocità e della traiettoria di un'onda quando questa si trasmette a un mezzo con differente densità. Si sono potute così rilevare superfici in profondità in cui si verificano una brusca accelerazione e una deviazione delle onde e in base a queste sono state identificate quattro zone sferiche concentriche: la crosta, il mantello, il nucleo esterno e il nucleo interno. L'interno della Terra, come quello degli altri pianeti terrestri, è diviso chimicamente in una crosta formata da rocce da basiche ad acide, un mantello ultrabasico e un nucleo terrestre composto principalmente da ferro. Il pianeta è abbastanza grande da avere un nucleo differenziato in un nucleo interno solido e un nucleo esterno liquido che produce un debole campo

magnetico a causa della convezione del suo materiale elettricamente conduttivo. La capacità elettrica della Terra vale invece 710  $\mu\text{F}$ , abbastanza piccola in rapporto alle sue dimensioni. Dal punto di vista delle proprietà meccaniche, la crosta e la porzione superiore del mantello formano la litosfera, rigida e una porzione intermedia del mantello, che si comporta in un certo senso come un fluido enormemente viscoso, costituisce l'astenosfera. Materiale proveniente dall'astenosfera si riversa continuamente in superficie attraverso vulcani e dorsali oceaniche non conservando però la composizione originale perché soggetto a cristallizzazione frazionata.

**Lo schema seguente riassume le profondità, la caratteristica principale per la definizione dei vari gusci che compongono la Terra e la loro densità:**

Profondità (km)		Porzione terrestre	Proprietà	Densità $\text{g/cm}^3$
0-60		<b>Litosfera:</b> varia tra i 5 km e i 120 km; comprende crosta e la parte più superficiale del mantello superiore.	fisiche	—
	0-35	<b>Crosta:</b> varia tra i 5–10 km di quella oceanica, ai 30-70 di quella continentale.	chimiche	2,2-2,9
	35-60	<b>Mantello litosferico</b> o litosfera densa: parte superficiale del mantello superiore.	fisiche	3,4-4,4
35-2900		<b>Mantello terrestre</b>	fisiche e chimiche	3,4-5,6
	100-700	<b>Mantello superiore</b> , di cui la parte superficiale si associa alla litosfera. La parte più spessa è detta astenosfera, di 100–250 km di spessore. La parte inferiore è definita zona di transizione verso il mantello superiore, o mesosfera, da non confondere con l'omonimo strato atmosferico.	fisiche	—
	700-2900	<b>Mantello inferiore</b> , di circa 2.000 km di spessore.	fisiche	—
2900-5100		<b>Nucleo esterno</b>	fisiche e chimiche	9,9-12,2
5100- $\approx 6375$		<b>Nucleo interno</b>	fisiche e chimiche	12,8-13,1



**Tabella degli ossidi della Crosta Terrestre di F.W. Clarke**

<b>Composto</b>	<b>Formula</b>	<b>Percentuale</b>
<b>Diossido di silicio</b>	$\text{SiO}_2$	59,71%
<b>Ossido di alluminio</b>	$\text{Al}_2\text{O}_3$	15,41%
<b>Ossido di calcio</b>	$\text{CaO}$	4,90%
<b>Ossido di magnesio</b>	$\text{MgO}$	4,36%
<b>Ossido di sodio</b>	$\text{Na}_2\text{O}$	3,55%
<b>Ossidi di ferro</b>	$\text{FeO}$	3,52
<b>Ossido di potassio</b>	$\text{K}_2\text{O}$	2,80%
<b>Trioossido di ferro</b>	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,63
<b>Acqua</b>	$\text{H}_2\text{O}$	1,52%
<b>Diossido di titanio</b>	$\text{TiO}_2$	0,60%
<b>Anidride fosforosa</b>	$\text{P}_2\text{O}_5$	0,22%

<b>Totale</b>	<b>99,22%</b>
---------------	---------------



## Proprietà chimico/fisiche della geo sfera

La massa della Terra è circa di  $5,98 \times 10^{24}$  kg ovvero quasi 6.000 trilioni di tonnellate. Essa aumenta nel tempo al ritmo di  $10^7$  kg/anno a causa della cattura di materiale cosmico.

È costituita in peso principalmente da

- **ferro 32,1%**
- **ossigeno 30,1%**
- **silicio 15,1%**
- **magnesio 13,9%**
- **zolfo 2,9%**
- **nichel 1,8%**
- **calcio 1,5%**
- **alluminio 1,4%**
- **altri elementi 1,2%**

Si ritiene che il nucleo sia costituito principalmente da ferro 88,8% con piccole quantità di nichel 5,8% e zolfo 4,5%. Il geochimico F. W. Clarke ha calcolato che poco più del 47% della crosta terrestre è composta da ossigeno. I costituenti più comuni sono rappresentati dagli ossidi; cloro, zolfo e fluoro sono le uniche importanti eccezioni, sebbene la loro presenza totale nelle rocce sia inferiore all'1%. Gli ossidi principali sono i silicati, gli ossidi di alluminio, di ferro, di calcio, magnesio, potassio e di sodio. I silicati sono la componente acida della crosta terrestre, costituendo tutti i principali minerali delle rocce intrusive. Analizzando 1.672 campioni di tutti i tipi di rocce, Clarke ha dedotto che il 99,22% di esse erano composte da solo undici ossidi vedere tabella a destra, mentre i rimanenti costituenti erano presenti solo in quantità veramente ridotte. La temperatura all'interno della Terra aumenta con un gradiente geotermico di circa  $25\text{ }^{\circ}\text{C/km}$  nella crosta, gradiente che poi diminuisce a  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $0,8\text{ }^{\circ}\text{C/km}$  nelle altre zone. La temperatura raggiunge i  $5\,270\text{ K}$   $5\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  e la pressione arriva a 3600 kbar nella porzione di nucleo interno. Il calore interno è stato generato in parte durante la formazione del pianeta e da allora ulteriore calore è stato continuamente generato dal decadimento radioattivo di isotopi dell'uranio, del torio e del potassio. Il calore trasmesso dall'interno all'esterno del pianeta deriva dai moti convettivi del mantello anche se, essendo le rocce cattive conduttrici termiche, rappresenta solo un ventimillesimo dell'energia che il pianeta riceve dal Sole. La densità media della Terra è di  $5,515\text{ g/cm}^3$ , rendendolo il pianeta più denso del sistema solare. Non è costante, ma cresce all'aumentare della profondità. Nella crosta terrestre passa da  $2,2$  a  $2,9\text{ g/cm}^3$  per aumentare progressivamente nel mantello, con una densità che va da  $3$  a  $5,6\text{ kg/dm}^3$ , fino a giungere nel nucleo a valori compresi tra i 9 e i  $13,5\text{ kg/dm}^3$ .

## Tettonica delle Placche

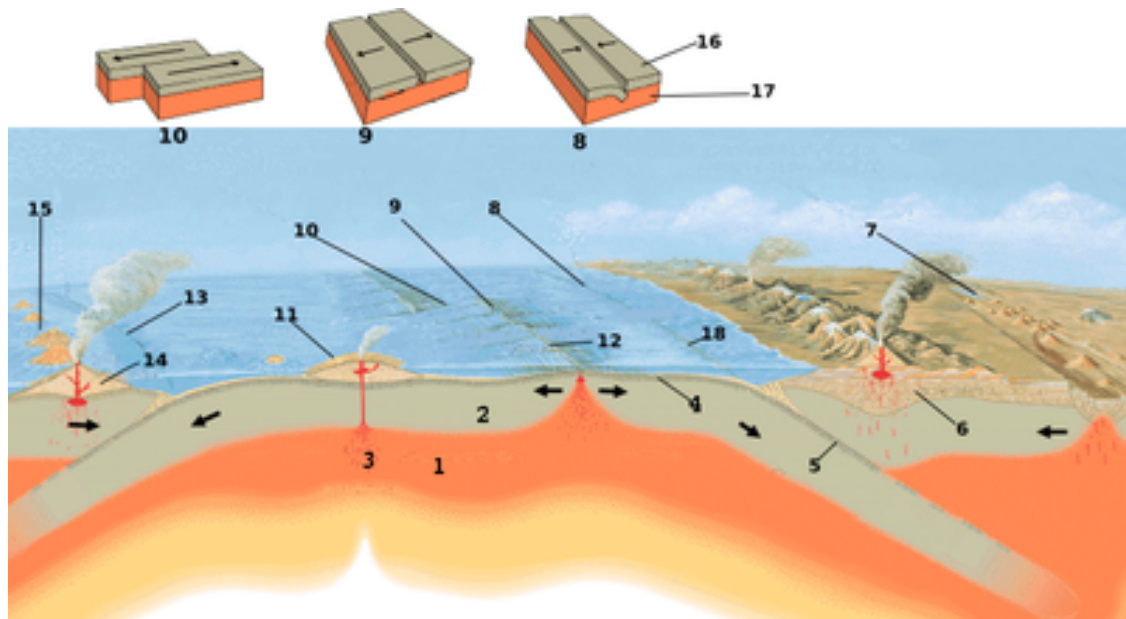
In accordo con la Tettonica delle placche, che è oramai accettata dalla quasi totalità degli esperti in scienze della Terra, la sua zona più esterna è suddivisa in due parti: la litosfera, comprendente la crosta terrestre e la parte più superficiale del mantello superiore, e l'astenosfera che forma la parte più interna e profonda del mantello. L'astenosfera si comporta come un liquido surriscaldato che fa muovere le placche litosferiche ed è estremamente viscoso. La litosfera sostanzialmente galleggia sull'astenosfera ed è suddivisa in quelle che comunemente sono chiamate placche tettoniche. Queste placche sono segmenti rigidi che si muovono le une rispetto alle altre secondo tre tipi di movimento: convergente, divergente e trasforme. Un ultimo tipo di movimento avviene quando due placche si muovono lateralmente rispetto a un'altra, attraverso una faglia strike-slip. Il pianeta è stato plasmato dagli spostamenti di queste placche, alternando momenti in cui era presente un solo supercontinente a situazioni simili alla odierna. Esistono le placche litosferiche di tipo continentale e di tipo oceanico. Inoltre la collisione tra due o più placche tettoniche è la base per la genesi delle catene montuose sulla parte di placca litosferica di tipo continentale; mentre una loro divergenza può portare alla nascita di una dorsale oceanica, sulla parte di placca litosferica di tipo oceanica e quindi di nuova crosta. Pertanto i limiti tra le placche tettoniche sono zone di elevata attività geologica e di intensi sforzi e lungo di esse si concentrano la maggior parte delle aree sismiche, con terremoti anche di forte intensità, e delle aree vulcaniche.

Le placche principali sono:

Nome della placca	Area		Copertura
	10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> mi <sup>2</sup>	
Placca africana	61,3	23,7	Africa
Placca antartica	60,9	23,5	Antartide
Placca australiana	47,2	18,2	Australia
Placca euroasiatica	67,8	26,2	Asia e Europa
Placca nordamericana	75,9	29,3	Nord America e nord-est Siberia
Placca sudamericana	43,6	16,8	Sud America
Placca pacifica	103,3	39,9	Oceano Pacifico

Mappa delle placche tettoniche della Terra



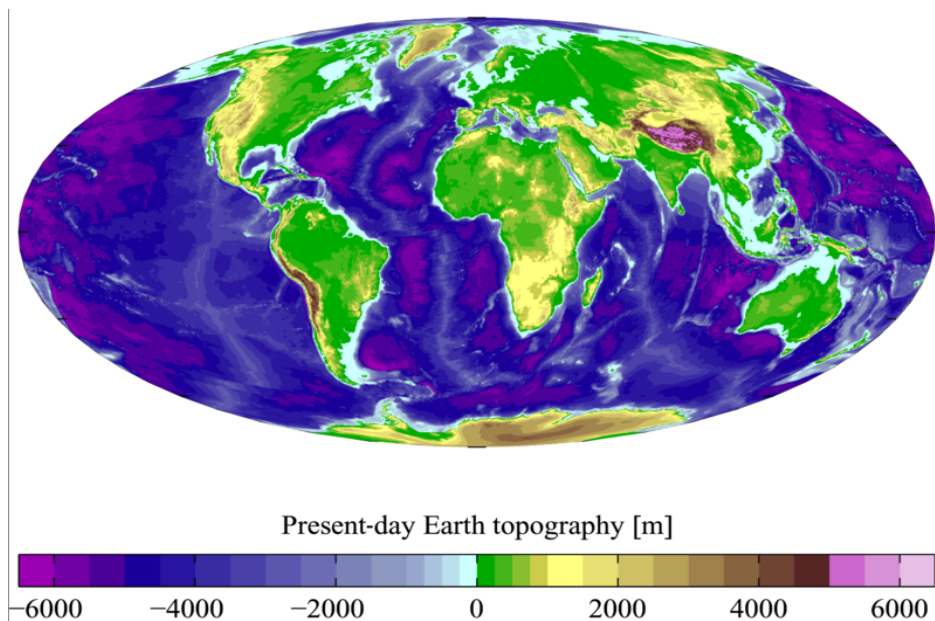


- 1- Astenosfera
- 2- Litosfera
- 3- Punto caldo
- 4- Crosta oceanica
- 5- Placca in subduzione
- 6- Crosta continentale
- 7- Zona di rift continentale, nuovo margine di placca
- 8- Placca a margine convergente
- 9- Placca a margine divergente
- 10- Placca a margine trasforme
- 11- Vulcano a scudo
- 12- Dorsale oceanica
- 13- Margine di placca convergente
- 14- Strato vulcano
- 15- Arco isola
- 16- Placca
- 17- Astenosfera
- 18- Fossa

## Superficie

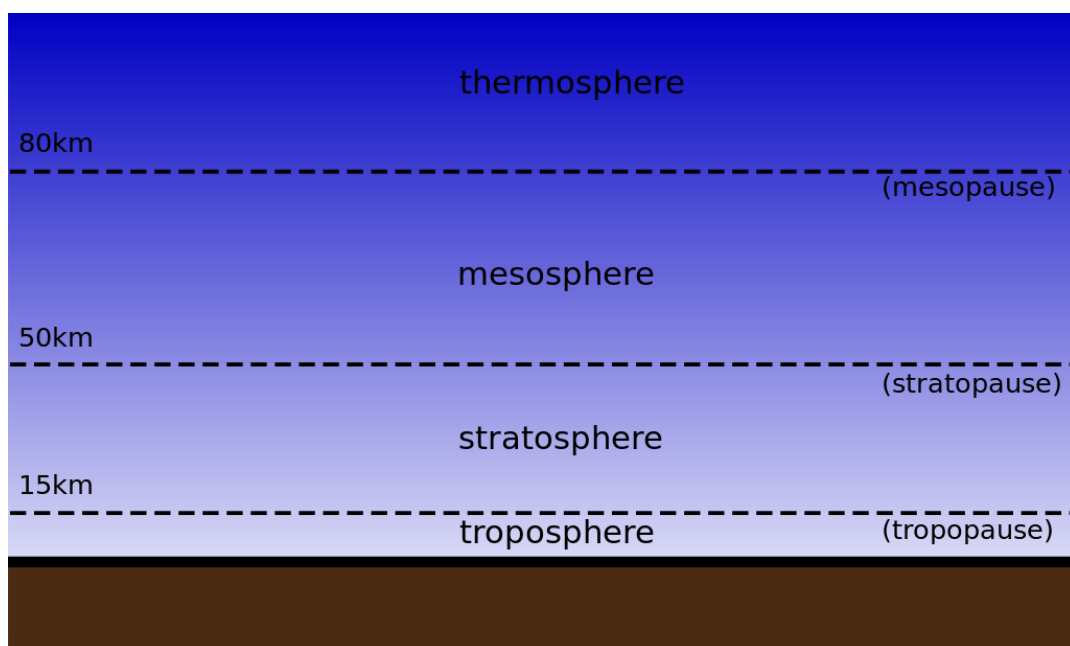
La superficie terrestre può variare enormemente da luogo a luogo. Circa il 70,8% della superficie è coperta da acqua; inoltre, la maggior parte della piattaforma continentale si trova al di sotto del livello marino. Nella parte sommersa del pianeta sono presenti tutte le caratteristiche tipiche di un territorio montuoso, caratteristiche comprendenti un sistema di dorsali medio oceaniche, dei vulcani sommersi, delle fosse oceaniche, dei canyon sottomarini, degli altopiani e delle piane abissali. Il rimanente 29,2% emerso consiste di montagne, deserti, pianure, altopiani e altre zone geomorfologiche minori. La superficie planetaria si modifica costantemente secondo tempi geologici a causa dei movimenti delle varie placche tettoniche e dell'erosione; inoltre le sue caratteristiche geografiche, create o deformate dai movimenti tettonici, sono sottoposte agli influssi meteorologici pioggia, neve, ghiaccio, vento, a svariati cicli termici gelo/disgelo delle zone alpine, elevata escursione termica giornaliera nel caso dei deserti e all'azione chimica. Infine, nel modellamento del pianeta sono compresi anche grandi eventi come glaciazioni e impatti meteorici. Durante la migrazione di due placche tettoniche continentali la crosta oceanica viene subdotta al di sotto dei margini di queste ultime. Nello stesso tempo, a causa della risalita di materiale mantellico, nuova crosta oceanica viene generata lungo margini divergenti nelle dorsali medio oceaniche. Questo ciclo sostituisce continuamente il materiale di crosta oceanica in un processo che l'ha portata ad avere un'età minore di 100 milioni di anni. La placca oceanica più antica, localizzata nel Pacifico occidentale, è stata stimata con un'età di circa 200 milioni di anni. Per comparazione la crosta continentale più antica, datata grazie alla presenza di fossili, ha un'età di circa 3 miliardi di anni. I movimenti subduttivi delle varie placche vengono regolati da contrasti di densità; infatti le placche continentali sono formate da rocce meno dense, specialmente da rocce intrusive come graniti e andesiti, mentre quelle oceaniche sono formate da rocce effusive, prevalentemente basaltiche. Questa differenza costitutiva spiega il perché nel contrasto tra due placche di tipo differente sia sempre quella oceanica ad andare in subduzione. Differenti sviluppi ha il caso in cui le due placche appartengano allo stesso tipo, per cui intervengono fattori più sensibili come gli sforzi e le direzioni di movimento. Su entrambi i tipi di crosta si possono trovare, in casi favorevoli alla loro messa in posto, le rocce sedimentarie. Esse sono formate dall'accumulo di sedimenti in maniera spesso così individuabile, quando è presente una stratificazione, da poter risalire indietro nel tempo alle condizioni presenti all'atto della formazione di ogni singolo strato e all'evoluzione di queste condizioni verso il presente. Inoltre, le rocce sedimentarie sono le uniche in cui possono esser ritrovati fossili, fondamentali per una datazione precisa della roccia stessa e per trarre informazioni paleo ambientali su clima, geografia, fauna e sulla flora presente in quell'epoca. In queste rocce vengono ricercati e sfruttati quasi tutti i principali giacimenti di idrocarburi e carboniferi. Circa il 75% di tutta la superficie dei continenti è coperta da sedimenti, sebbene essi formano solamente circa il 5% della crosta. Il terzo tipo di roccia presente sul pianeta, dopo quelle vulcaniche intrusive ed effusive e quelle sedimentarie, è quello delle rocce metamorfiche. Esse derivano dalla trasformazione di rocce preesistenti di qualsiasi tipo attraverso l'influenza di alte pressioni, di alte temperature o di entrambe queste variabili. Il processo metamorfico può essere di varia intensità, provocando sia una semplice ricristallizzazione di alcune specie minerali verso altre maggiormente stabili, sia la parziale fusione e deformazione della roccia, trasformandola in una completamente differente. Inoltre, attraverso i processi di fusione si crea una circolazione di fluidi caldi all'interno della roccia. All'interno di questi fluidi vengono portati in soluzione e concentrati, laddove presenti, elementi rari altrimenti dispersi in quantità infinitesimali. Pertanto, le rocce metamorfiche o i depositi derivanti dal loro smantellamento sono uno dei luoghi preferenziali di ricerca di giacimenti di materie prime, di pietre e metalli preziosi. I minerali maggiormente abbondanti sulla superficie terrestre sono i silicati che includono principalmente: quarzo, feldspato, anfibolo, mica, pirosseno e olivina. Invece tra i minerali carbonatici i più comuni sono: calcite, aragonite e dolomite. La componente pedologica è la parte più esterna della Terra, nonché la più sottile, e riguarda il suolo e i processi che portano alla sua formazione. La pedosfera si pone come contatto tra la litosfera, l'atmosfera, l'idrosfera e la biosfera. Si calcola che la parte arabile di superficie sia il 13,31% della superficie emersa, con solo il 4,71% di essa utilizzata per colture permanenti. Quasi il 40% della terra è attualmente utilizzata per agricoltura e pastorizia, con una stima di circa  $1,3 \times 10^9$  ettari  $3,3 \times 10^9$  acri a uso agricolo e  $3,4 \times 10^9$  ettari  $8,4 \times 10^9$  acri di pastorizia. Il rilievo della superficie terrestre varia dal punto più basso a -418 m del Mar Morto alla massima altitudine di 8848 m della cima del Monte Everest secondo la stima del 2005; inoltre l'altezza media della superficie terrestre non sommersa dalle acque marine è di 686 m.





## Atmosfera

La Terra ha un'atmosfera relativamente spessa, composta per il 78% di azoto, per il 21% di ossigeno e per l'1% di argon, più tracce di altri gas tra cui l'anidride carbonica e l'acqua. L'atmosfera separa la superficie terrestre dall'ambiente inospitale dello spazio, blocca buona parte delle radiazioni solari nocive, modera le temperature sulla superficie ed è il veicolo di trasporto del vapore acqueo e di altre sostanze gassose. I suoi vari strati, la troposfera, la stratosfera, la mesosfera, la termosfera e l'esosfera sono diversi attorno al globo e variano anche assieme alle stagioni. È proprio dell'atmosfera il fenomeno dell'effetto serra, consistente nell'assorbimento e remissione dell'infrarosso termico da parte di alcune specie gassose. I principali gas responsabili di questo fenomeno sono il diossido di carbonio, il vapore acqueo, il metano e l'ozono. L'effetto serra, in misura adeguata, è fondamentale per la vita sul pianeta; infatti, senza questo scudo termico, la temperatura media della superficie terrestre sarebbe di circa  $-18^{\circ}\text{C}$ , incompatibile con il mantenimento dell'acqua allo stato liquido e, di conseguenza, con la vita.



## Atmosfera Superiore

Al di sopra della troposfera, l'atmosfera è solitamente suddivisa in: stratosfera, mesosfera e termosfera. Ciascuna di queste zone possiede una tipica variazione della temperatura in funzione dell'altitudine. Proseguendo in altitudine, si incontra l'esosfera e successivamente la magnetosfera dove avviene l'iterazione tra il campo magnetico terrestre e il vento solare. Una fondamentale zona per la vita presente sul pianeta è l'ozonosfera, parte della stratosfera in cui una elevata concentrazione di ozono scherma la superficie terrestre dai raggi ultravioletti. La linea di Kármán, situata a 100 km di altitudine, è comunemente usata per definire il confine tra l'atmosfera terrestre e lo spazio. A causa dell'elevata energia termica alcune molecole della parte esterna dell'atmosfera riescono ad accelerare fino a raggiungere una velocità tale che permette loro di fuggire dalla gravità del pianeta. L'effetto è che l'atmosfera è in lentissima, ma costante perdita di materia nello spazio. Dato che l'idrogeno ha un peso molecolare basso, raggiunge la sua velocità di fuga più rapidamente e più facilmente rispetto ad altre molecole, e abbandona l'atmosfera a un tasso maggiore. Per questo motivo, la Terra è in un ambiente ossidante, piuttosto che riducente, con importanti conseguenze sulla natura chimica della vita. Tuttavia, l'atmosfera ricca di ossigeno riesce a preservare la maggior parte dell'idrogeno rimanente legandolo sotto forma di molecole di acqua.



**Luna ripresa dall'orbita terrestre parzialmente oscurata dalla presenza dell'atmosfera.**

## Magnetosfera

La magnetosfera è un fenomeno naturale, un dipolo magnetico con poli non coincidenti con quelli geografici, e non statici, e avente momento dipolare asse inclinato di  $11,3^\circ$  rispetto all'asse terrestre. Nonostante le numerose ipotesi sulla presenza di questo campo, le teorie si sono orientate verso un modello analogo a quello di una dinamo ad autoeccitazione. L'intensità del campo magnetico terrestre non è costante nel tempo, ma subisce notevoli variazioni. Esse hanno portato, nel corso delle ere geologiche, alla deriva dei poli magnetici rispetto ai continenti e a ripetuti fenomeni di inversione del campo, con scambio reciproco dei poli magnetici Nord e Sud. Il magnetismo terrestre ha una notevole importanza per la vita sulla Terra. Infatti esso si estende per svariate decine di migliaia di chilometri nello spazio, formando una zona chiamata magnetosfera, la cui presenza genera una sorta di scudo elettromagnetico che devia e riduce il numero di raggi cosmici che se arrivassero alla superficie del pianeta porterebbero alla sua sterilizzazione. Dall'interazione tra raggi cosmici vento solare e magnetosfera viene originato lo splendido fenomeno detto aurora boreale.

## Biosfera

***La Terra è l'unico pianeta conosciuto ospitante la vita.***

Le forme di vita del pianeta compongono la biosfera. Le teorie correnti pongono la sua nascita a qualche centinaio di milioni di anni dopo la formazione del pianeta, tra 3,5 e 4 miliardi di anni fa. La biosfera è divisa in vari biomi, abitati da una popolazione di flora e fauna all'incirca simile. Sulla Terra, i biomi sono separati principalmente secondo la latitudine. I biomi a nord del circolo polare artico e a sud del circolo polare antartico sono relativamente vuoti di vita animale e vegetale, mentre quelli più popolati si trovano vicino all'equatore. La complessa interazione fra biosfera e singole forme di vita ha portato alcuni autori all'ipotesi Gaia secondo la quale la vita sulla Terra è possibile grazie al comportamento degli esseri viventi che mantengono una delicata omeostasi.

## Idrosfera

termine idrosfera si riferirebbe ai soli oceani, tuttavia tecnicamente include tutti i mari interni, i laghi, i fiumi e l'acqua di falda fino a 2.000 m di profondità. La Terra è l'unico pianeta del sistema solare la cui superficie ospita acqua liquida. L'acqua copre il 71% della superficie terrestre ed è suddivisa in un 97% di acqua salata e un 3% di acqua dolce, il cui 68% circa è sotto forma di ghiaccio. L'acqua suddivide il pianeta in cinque oceani e sette continenti. Il punto più profondo sotto la massa d'acqua è rappresentato dalla Fossa delle Marianne nell'oceano Pacifico con  $-10\,911$  m; mentre la profondità media degli oceani è di  $3,794$  m, più di cinque volte l'altezza media dei continenti. La massa stimata dell'acqua oceanica è di circa  $1,35 \times 10^{18}$  tonnellate, comparabili a  $1/4400$  dell'intera massa terrestre; essa inoltre occupa un volume di  $1,386 \times 10^9$  km<sup>3</sup>. La media salina all'interno dell'acqua oceanica è di 35 g/l: tuttavia, essendo questo valore legato agli apporti esterni di acqua e all'evaporazione, può aumentare considerevolmente in bacini chiusi o diminuire in zone ad acque molto fredde. Questi sali provengono dalla diretta emissione vulcanica o dallo smantellamento chimico e fisico effettuato nel tempo a discapito delle rocce magmatiche. Le masse acquose sono, inoltre, enormi serbatoi di sostanze gassose, possiedono un'importante funzione termoregolatrice e mitigatrice del clima e sono agenti attivi dal punto di vista geomorfologico. Al loro interno vive un intero ecosistema acquatico, completo dal punto di vista della piramide alimentare e integrato con quello di superficie, nonché rivelatosi fondamentale per lo sviluppo umano passato e presente. La presenza di acqua liquida sulla superficie terrestre è una combinazione delle giuste caratteristiche orbitali, del vulcanismo, della gravità, dell'effetto serra, del campo magnetico e dell'atmosfera ricca di ossigeno. Ci sono varie ipotesi che Europa, un satellite di Giove, ospiti dell'acqua liquida sotto lo strato di ghiacci che ricopre interamente la superficie. La Terra è in effetti oltre il bordo esterno delle orbite che permetterebbero a un pianeta di essere abbastanza caldo per formare acqua liquida. Senza una qualche forma di effetto serra, l'acqua della Terra congelerebbe. Alcuni reperti paleontologici sembrano indicare che in un tempo precedente i 650 milioni di anni fa l'effetto serra si ridusse a tal punto da portare alla formazione della cosiddetta Terra a palla di neve; comunque questa ipotesi non è accettata da tutti i paleontologi, alcuni dei quali contestano le prove riportate e la possibilità che questo fenomeno possa verificarsi. Sugli altri pianeti, come Venere, l'acqua gassosa è dissociata dagli ultravioletti solari, e

l'idrogeno è ionizzato e soffiato via dal vento solare. L'effetto è lento, ma inesorabile. Si pensa che questa sia la causa della mancanza d'acqua di Venere. Privato dell'idrogeno, l'ossigeno reagisce con la superficie e viene inglobato in minerali solidi. Sulla Terra uno scudo di ozono assorbe la maggior parte degli ultravioletti energetici nell'alta atmosfera, riducendo questo effetto. Infine il vulcanismo, aiutato dagli effetti di marea della Luna, emette continuamente vapore d'acqua dall'interno. La tettonica delle placche della Terra ricicla il carbonio e l'acqua mediante la subduzione di zone ricche di sedimenti, convertendoli in magma ed emessi dai vulcani come anidride carbonica gassosa e vapore. Le correnti oceaniche, inoltre, sono ritenute causa di una particolare oscillazione dell'asse di rotazione terrestre, detta oscillazione di Chandler.



**Il Continente Americano, fotografato dalla NASA.**

## **Criosfera**

La criosfera è la porzione di crosta terrestre coperta dall'acqua allo stato solido e che comprende le coperture ghiacciate di mari, laghi e fiumi, le coperture nevose, i ghiacciai, le regioni polari ed il suolo ghiacciato in modo temporaneo o perenne permafrost. È una parte integrante del sistema climatico globale con importanti connessioni e retroazioni generate attraverso la sua influenza sulla radiazione solare assorbita dalla superficie, sui flussi di umidità, sulle nuvole, sulle precipitazioni, sull'idrologia e sulla circolazione atmosferica ed termoalina.



## Terra nel Sistema Solare

La Terra ruota da ovest verso est una volta al giorno, inteso come giorno siderale, attorno all'asse che unisce il polo Nord al polo Sud in 23 ore, 56 minuti e 4,091 secondi. È per questo che il sole e tutte le stelle sorgono a est e tramontano a ovest compiendo un movimento nel cielo a una velocità di circa 15°/h o 15'/min. Inoltre, la Terra ruota attorno al Sole a una distanza media di 150.000.000 km in un anno siderale. La sua velocità di orbita è di circa 30 km/s 108 000 km/h, veloce abbastanza da coprire il diametro del pianeta circa 12.600 km in 7 minuti e la distanza dalla Luna 384.000 km in 4 ore. Visti dal polo Nord terrestre tutti questi movimenti si svolgono in senso antiorario

### **Ha un satellite naturale, la Luna, che le gira attorno in 27,32 giorni.**

I piani dei movimenti non sono precisamente allineati: l'asse della Terra è inclinato di 23,5 gradi rispetto alla perpendicolare del piano Terra-Sole e il piano Terra-Luna è inclinato di cinque gradi, cosa che impedisce il verificarsi di due eclissi una solare e una lunare ogni mese e le rende invece un evento raro. Sempre a causa dell'inclinazione dell'asse terrestre, la posizione del Sole nel cielo e l'incidenza delle sue radiazioni vista da un osservatore posto sulla superficie varia nel corso dell'anno. Ad esempio, un osservatore posto a una latitudine settentrionale, quando il polo Nord è inclinato verso il Sole, noterà dei periodi di luce giornaliera più lunghi e un clima più temperato, mentre disporrà di meno ore di luce e di un clima più rigido nel caso opposto. Al di sopra dei due circoli polari si raggiunge il caso estremo di alternanza di lunghi periodi di assenza di luce chiamati notti polari, a periodi di non tramonto del Sole. Questa relazione tra il clima e l'inclinazione dell'asse terrestre viene definita tramite le quattro stagioni. Esse, dal punto di vista astronomico, sono determinate dai solstizi i punti di massima inclinazione verso e contro il Sole e dagli equinozi punti in cui l'inclinazione è perpendicolare alla direzione del Sole. Il solstizio invernale cade il 21 dicembre, quello estivo il 21 giugno; mentre i due equinozi cadono, quello primaverile il 21 marzo e quello autunnale il 23 settembre. L'alternanza delle stagioni è opposta da un emisfero terrestre all'altro, data l'opposta inclinazione dell'asse, comportando ad esempio, la presenza in quello nord dell'estate e in quello sud dell'inverno. L'angolo di inclinazione è relativamente stabile se considerato su lunghi periodi; tuttavia, esso compie un lento e irregolare moto conosciuto come nutazione, con un periodo di 18,6 anni. L'orientazione dell'asse varia secondo una precessione intorno a un cerchio completo in un ciclo di poco più di 25 800 anni. La presenza di una precessione è la causa dello sfasamento tra un anno siderale e un anno tropico. Entrambe le variazioni del movimento dell'asse derivano dalla mutevole attrazione del Sole e della Luna sulla parte equatoriale del pianeta. Anche la velocità di rotazione del pianeta non è costante, ma varia nel tempo secondo un fenomeno noto come variazione della lunghezza del giorno. In tempi moderni il perielio cade il 3 gennaio, mentre l'afelio circa il 4 luglio, per informazioni circa altre ere, controlla precessione e cicli di Milanković. La differenza in termini energetici ricevuti dal Sole tra la posizione di perielio e quella di afelio è del 6,9% a favore del primo; inoltre, dal momento in cui l'emisfero meridionale è orientato verso il Sole, a quello in cui il pianeta raggiunge il punto di perielio, questo emisfero percepisce una leggera maggiore energia rispetto all'emisfero nord durante l'intero anno. Questa differenza, seppure presente, è decisamente poco significativa rispetto all'energia totale derivante dal cambiamento di orientazione dell'asse, e, nella sua parte maggiore, viene assorbita e compensata dalla più alta presenza di masse acquee dell'emisfero meridionale. La sfera di Hill sfera gravitazionale di influenza della Terra è di circa 1,5 Gm 1 496 620 km circa di raggio. Questa è la massima distanza a cui l'influenza gravitazionale del pianeta è più forte di quella solare e dei pianeti. Gli oggetti in orbita attorno alla Terra devono rimanere all'interno di questo raggio in ogni punto della loro orbita per non venire strappati alla presa gravitazionale della Terra ed essere immessi in un'orbita eliocentrica: la sfera di Hill cambia leggermente di dimensioni lungo l'orbita della Terra aumentando gradualmente fino all'afelio e diminuendo gradualmente fino al perielio.



## **Cenni di teoria geocentrica e di non sfericità della Terra**

Poiché la Terra è molto grande, osservando dalla superficie non è immediatamente evidente che abbia forma geoidale, leggermente appiattita, schiacciata ai poli e con un lieve rigonfiamento all'equatore. Per questa ragione le antiche civiltà, come quella mesopotamica, e i primi filosofi greci, come Talete, ritennero che la Terra fosse piatta. Un primo passo verso il riconoscimento della forma reale fu compiuto da Anassimandro, che concepì la Terra come un cilindro sospeso nello spazio, immaginando quindi di avere cielo non solo sopra la propria testa ma anche al di sotto dei propri piedi. La forma sferica fu infine riconosciuta sulla base di deduzioni basate su osservazioni, quali il variare delle osservazioni astronomiche con la latitudine, l'osservazione delle eclissi di Luna e il confronto con la forma della Luna e del Sole. I Greci, circa 2.500 anni fa, cominciarono per primi a sostenere che la Terra fosse una sfera. Le prime testimonianze della sfericità terrestre ci arrivano da Pitagora VI-V secolo a.C. e da Parmenide V secolo a.C.; poi Aristotele 384 a.C.-322 a.C. portò le prime dimostrazioni e infine Eratostene 274 a.C.-196 a.C. fece le prime misurazioni. Gli studiosi del Basso Medioevo, poi, come Guglielmo di Conches, Giovanni di Sacrobosco, Ruggero Bacone, Tommaso d'Aquino, Brunetto Latini, Dante Alighieri, Giovanni Buridano e altri sostennero la sfericità del nostro pianeta con argomenti, per lo più di questo genere:

- 1. Il Sole, a mezzogiorno, indica il sud qualunque sia il punto di osservazione: se la Terra fosse piatta, non sarebbe così;**
- 2. l'ombra proiettata dalla Terra sulla Luna, durante un'eclissi parziale, è un arco di cerchio;**
- 3. la parte che per prima scompare di una nave all'orizzonte è la chiglia.**

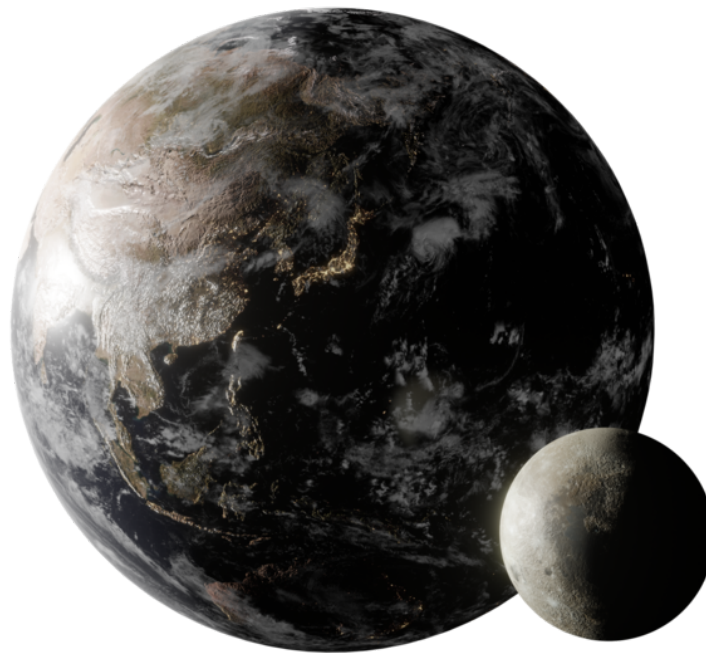
È da considerarsi infondata la moderna credenza che nel Medioevo la Terra fosse comunemente ritenuta piatta. Ancora oggi non mancano tuttavia i sostenitori della forma piatta della Terra, molti dei quali aderiscono alla Flat Earth Society Società della Terra Piatta. L'errata supposizione della piattezza della Terra nelle civiltà più antiche, era dovuta alla mancata conoscenza della natura centrale della forza di gravità, che permette di avere il cielo sempre come alto e il centro della Terra sempre come basso e quindi superare l'apparente paradosso che si dovesse camminare con la testa rivolta verso il "basso" dall'altra parte della Terra, paradosso che però già Anassimandro aveva saputo superare. Si ritenne molto più a lungo che la Terra fosse al centro dell'universo perché si ha l'impressione che siano tutti gli altri corpi celesti a girare intorno a essa; inoltre osservando il cielo di notte si ha l'impressione che sia una volta incurvata sulla Terra, illusione dovuta all'immensità dello spazio. Anche se la teoria eliocentrica fu proposta per primo da Aristarco di Samo nel III secolo a.C., la teoria geocentrica, anche a causa della precisione di misurazione astronomica necessaria a confutarla, fu quella dominante fino alla fine del Medioevo.

## **Luna e sua influenza**

La Luna è un satellite relativamente grande, simile a un pianeta terrestre, con un diametro pari a un quarto di quello terrestre e una massa pari a  $1/81$ . Rispetto al suo pianeta madre, è il più grande del sistema solare, ma non in senso assoluto. L'attrazione gravitazionale della Luna causa la maggior parte delle maree terrestri. La stessa azione porta a un lentissimo rallentamento della rotazione della Terra su sé stessa, dell'ordine di un'ora ogni parecchie centinaia di milioni di anni, più precisamente, la lunghezza del giorno terrestre aumenta di 0,0016 secondi ogni secolo. Terra e Luna, a causa delle forze gravitazionali reciproche sono in rotazione sincrona. Infatti, la Luna ruota attorno al proprio asse in un periodo identico a quello di rivoluzione attorno alla Terra presentando quindi sempre la stessa faccia verso il pianeta. Inoltre, a causa dell'interazione tra i due campi gravitazionali la Luna si allontana di circa 38 mm ogni anno. L'insieme di queste piccole modifiche, rapportate su tempi geologici di milioni di anni, sono causa di importanti cambiamenti; infatti, basta pensare che durante il Devoniano circa 410 milioni di anni fa, per esempio, vi erano 400 giorni in un anno terrestre, ed essi duravano circa 21,8 ore l'uno. La Luna potrebbe essere stata fondamentale per la comparsa della vita sulla Terra, causando un clima più moderato di quanto altrimenti sarebbe avvenuto. Alcune evidenze paleontologiche e simulazioni computerizzate mostrano che l'inclinazione assiale della Terra è stabilizzata dalle interazioni

mareali con la Luna. Senza questa stabilizzazione, l'asse di rotazione potrebbe essere caoticamente instabile, come accade per una sfera. Se l'asse di rotazione terrestre si avvicinasse al piano dell'eclittica, ne risulterebbe un clima molto severo, dove un polo sarebbe continuamente riscaldato e l'altro congelato, causando grandi trasferimenti di energia tra un polo e l'altro che si manifesterebbero in bruschi fenomeni atmosferici. Alcuni paleontologi che hanno studiato l'effetto sostengono che potrebbe uccidere tutti gli animali e piante superiori. Questo effetto rimane tuttavia controverso, e gli studi su Marte, che ha circa lo stesso giorno e inclinazione assiale della Terra, ma non un grande satellite o un nucleo liquido, potrebbero dare altre informazioni. L'origine della Luna è sconosciuta, ma la teoria più quotata è che si sia formata dalla collisione di un proto pianeta, chiamato Theia, della grandezza di Marte, con la Terra primitiva. Questa teoria spiega, oltre ad altre cose, la relativa scarsità di ferro e di elementi volatili sulla Luna e la somiglianza della composizione chimica lunare con quella della crosta terrestre. Un'altra teoria molto quotata è quella secondo cui la Luna si è formata da polveri che erano intorno alla Terra, che sono collassate in un unico punto, formando il nostro satellite. La Terra ha anche almeno due asteroidi co-orbitali conosciuti, 3753 Cruithne e 2002 AA<sub>29</sub>, e un asteroide troiano, 2010 TK<sub>7</sub>.

Nome	Diametro	Massa	Semiasse maggiore	Periodo orbitale
Luna	3.474,8 km	7,349×10 <sup>22</sup> kg	384.400 km	27 giorni 7 ore 43,7 minuti



## Geografia



La Terra è l'unico pianeta del sistema solare in cui è nota la presenza di acqua allo stato liquido in superficie e in grande quantità, tanto da farle attribuire l'appellativo di pianeta blu. Le masse d'acqua coprono circa i tre quarti della superficie totale, per un volume totale di circa 1 332 miliardi di chilometri cubi, mentre la restante parte è composta da terre emerse, sia sopra sia sotto il livello medio del mare; più precisamente:

- a) superficie totale 510.065.285 km<sup>2</sup>
- b) superficie acque 361.126.222 km<sup>2</sup> ----- 70,8 %
- c) terre emerse 148.939.063 km<sup>2</sup> ----- 29,2 %

Le masse acququee possono essere suddivise in oceani Oceano Atlantico, Oceano Indiano, Oceano Pacifico, mari, laghi e fiumi. Quelle continentali, invece, dapprima in sette grandi continenti: America del Nord, America del Sud, Africa, Antartide, Asia, Europa e Oceania, e, successivamente, nelle loro suddivisioni in subcontinenti, macroregioni, penisole, arcipelaghi ed isole.

Oceani			
<i><b>Dati fisici</b></i>	<i><b>Atlantico</b></i>	<i><b>Indiano</b></i>	<i><b>Pacifico</b></i>
Superficie km <sup>2</sup>	106.100.000 29,38 %	74.900.000 20,74 %	179.700.000 47,76 %
Profondità max m.	9212 fossa di Porto Rico	7450 fossa di Giava	10911 fossa Marianne
Profondità med.m.	3314	3900	4049
Salinità	3,6 %	2,5 %	3,5 %
Temp. media superf.	17 °C	17 °C	16 °C
Valore risp. Sup. terre	18 %	17,8 %	26 %
Valore risp. Sup. ocea	25,4 %	25,5 %	49,4 %



## Continenti

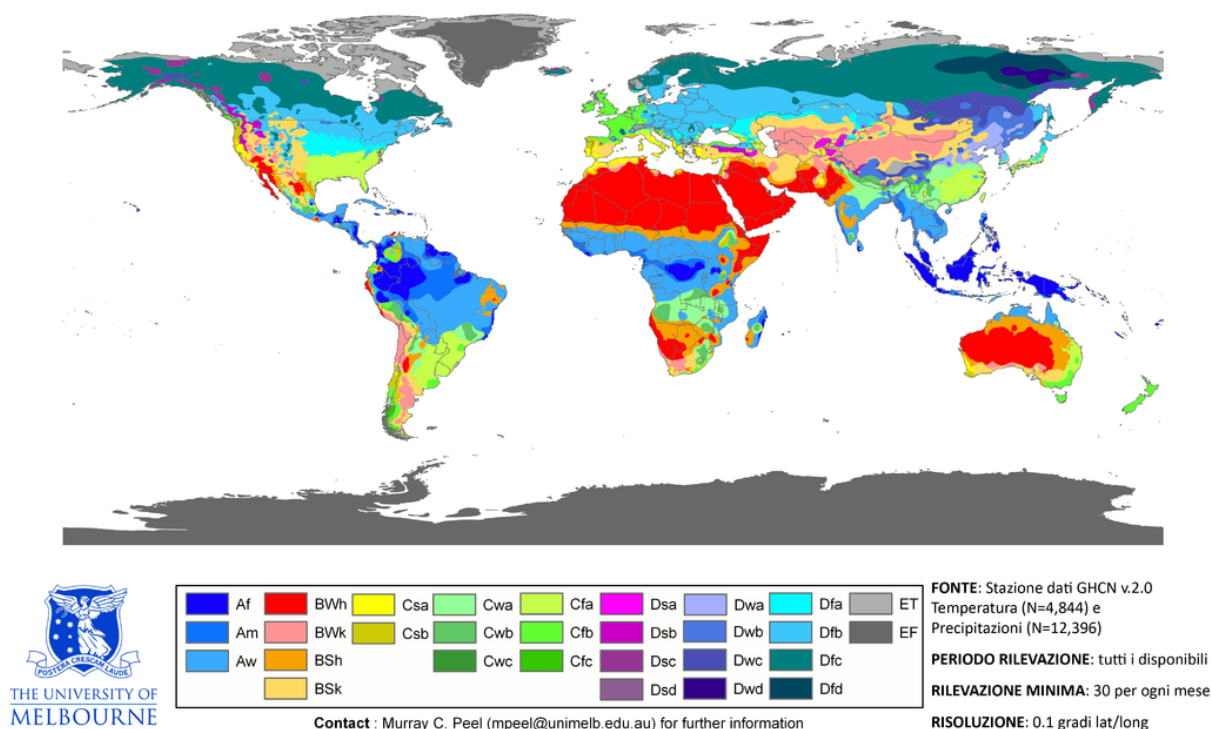
Dati fisici	Africa	America sett e centr.	America meridionale	Asia	Europa	Oceania
Superficie km <sup>2</sup>	30.309.677 20,35 %	24.244.643 16,27 %	17.846.012 11,98 %	43.869.576 29,45%	10.522.176 7,06 %	8.945.724 6,00 %
Altitudine massima m	5895 Kilimangiaro	6194 Monte Denali	6962 Monte Aconcagua	8848 Monte Everest	4810 Monte Bianco	4884 Monte Puncat Jav
Altitudine media m	750	720	590	960	340	340
Depressione max m.	-150 lago Assal Gibuti	-86 Valle della morte	-42 Salinas Chicas (Arg)	-395 Mar Morto	-28 Mar Caspio	-12 Lago Eyre
Sviluppo costiero km	30.500	72.500	28.700	73.000	38.000	19.500
Superficie deserta	9.200.000	100.000	900.000	3.300.000	-	1.500.000

### Clima e Tempo Atmosferici

L'atmosfera terrestre non ha limiti definiti, ma diviene lentamente sempre più rarefatta e sottile procedendo verso lo spazio esterno. Circa il 75% della sua intera massa è contenuta all'interno dei primi 11 km circa 7 mi a partire dalla superficie del pianeta, nello strato denominato come troposfera. L'irraggiamento solare, riscalda questa parte atmosferica, sia direttamente, sia indirettamente, tramite il calore ceduto alla superficie terrestre e provoca la dilatazione dell'aria in essa contenuta. La perdita di densità conseguente all'aumento di temperatura, pone in risalita la massa d'aria, richiamandone altra al suo posto, più fredda e densa, sia da luoghi adiacenti, sia soprastanti. Il risultato di questo processo è la circolazione atmosferica, la quale controlla, tramite la ridistribuzione dell'energia termica, sia il clima sia il tempo atmosferico. Le zone di circolazione atmosferica principali sono situate nella zona equatoriale al di sotto dei 30° di latitudine, tramite l'azione delle correnti occidentali, e nelle medie latitudini, tra i 30° e i 60°, tramite gli alisei. Inoltre, le correnti oceaniche rappresentano un importante fattore di influenza sul clima; particolarmente la circolazione termoalina, che ridistribuisce l'energia termica catturata dall'acqua, dalle zone oceaniche equatoriali verso quelle polari. Il vapore acqueo generato tramite l'evaporazione superficiale della massa d'acqua per contrasto di umidità e/o temperatura con l'aria viene trasportato nell'atmosfera. In presenza di determinate condizioni atmosferiche, favorevoli la risalita di aria umida e calda, il vapore acqueo presente inizia un processo di condensazione e, in seguito, dà origine a precipitazioni, che, in base alle condizioni termiche presenti nella zona atmosferica di condensa, a quelle del tragitto percorso e del suolo, potranno essere di pioggia, nevose o sotto forma di grandine. Per completare il ciclo dell'acqua, essa viene riconvogliata verso basse quote e verso gli oceani o verso i laghi in prevalenza dai corsi d'acqua. Questo processo è un meccanismo fondamentale per sostenere e sviluppare la vita, nonché il primario fattore di erosione, modellazione e trasformazione della superficie terrestre nel corso dei vari periodi geologici. L'entità delle precipitazioni varia considerevolmente da regione a regione, in base alla stagione di riferimento, alla latitudine e alla geografia del territorio, da diversi metri di acqua all'anno, a meno

di un millimetro nelle zone desertiche o polari. Il clima terrestre può esser suddiviso in alcune macro regioni a clima approssimativamente omogeneo in base alla latitudine: spostandoci dall'equatore al polo si possono rilevare: una regione equatoriale, una tropicale, una subtropicale, una temperata e una regione polare. Un'altra classificazione climatica può essere basata sulle temperature e sulle precipitazioni, con una suddivisione delle regioni caratterizzate da abbastanza simili e uniformi masse d'aria. Quella maggiormente utilizzata è la classificazione climatica di Köppen nella versione modificata dallo studente di Wladimir Köppen, Rudolph Geiger, che suddivide il mondo in cinque vaste aree: tropicale umida, area desertica arida, area umida delle medie latitudini, area a clima continentale e area di freddo polare; le quali sono poi ulteriormente suddivise in molti altri sottotipi più specifici.

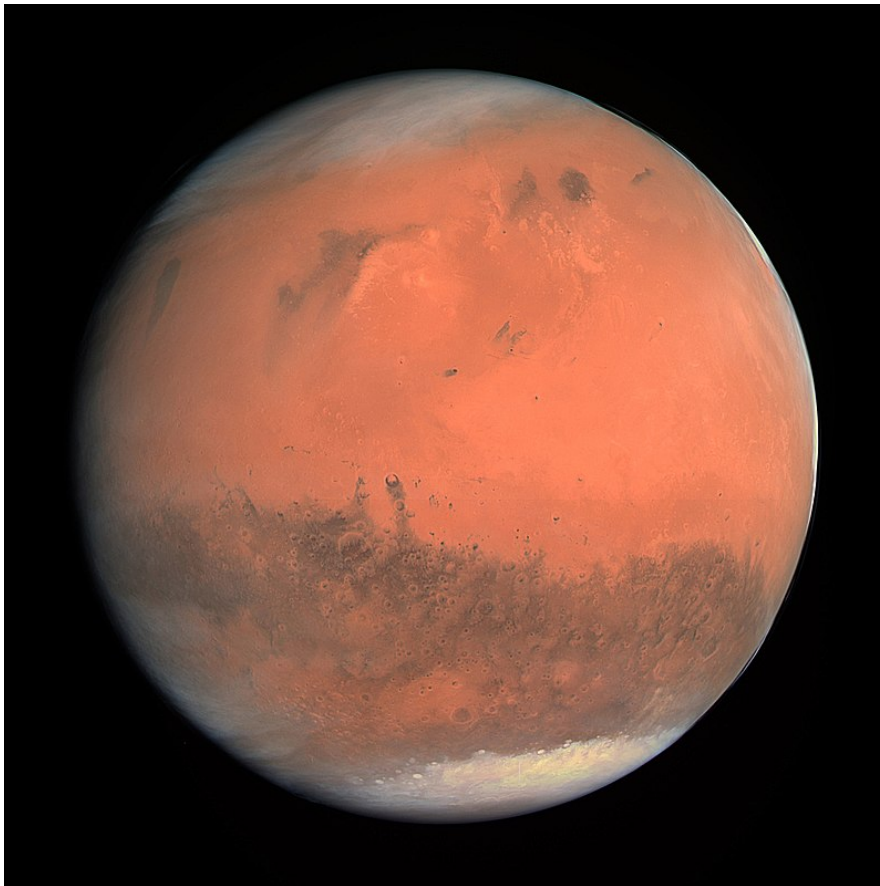
Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen–Geiger



## Rischi naturali e ambiente

Vaste aree sono sottoposte a fenomeni climatici molto violenti come i cicloni, gli uragani e i tifoni. Molte zone sono soggette a terremoti, frane, tsunami, eruzioni vulcaniche, tornado, inondazioni, siccità e altre calamità e disastri. L'attività umana, direttamente, o tramite le sostanze tossiche da lei prodotte, ha inquinato numerose zone del pianeta, comprese atmosfera e masse d'acqua. A causa di questo in diverse zone si verificano piogge acide, impoverimento e alterazione del suolo, deforestazione, estinzioni di specie viventi animali e/o vegetali, desertificazione, migrazione o scomparsa di fauna e flora autoctone, erosione e introduzione di specie invasive o alloctone. Vi è un consenso scientifico abbastanza vasto circa una correlazione tra le attività umane e il riscaldamento globale, soprattutto a causa delle emissioni di diossido di carbonio. L'effetto principale si riscontrerebbe nell'aumentata velocità dello scioglimento dei ghiacciai e della calotta polare, nell'aumento del livello medio marino, in variazioni termiche estreme e in cambiamenti significativi delle condizioni meteorologiche rispetto a quelle storicamente documentate. Dal punto di vista astronomico la Terra non è esente da rischi legati ad impatto meteoritico, di asteroidi e comete, che nel passato geologico, secondo alcune teorie e studi sperimentali, hanno segnato la storia della Terra a livello climatico, le cui tracce sono state lentamente cancellate nel tempo.

## ***Quarto Pianeta Marte***



**Un'immagine a colori del pianeta Marte scattata dalla sonda Rosetta nel 2007**

Marte è il quarto pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole; è visibile a occhio nudo ed è l'ultimo dei pianeti di tipo terrestre dopo Mercurio, Venere e la Terra. Chiamato pianeta rosso per via del suo colore caratteristico causato dalla grande quantità di ossido di ferro che lo ricopre, Marte prende il nome dall'omonima divinità della mitologia romana e il suo simbolo astronomico è la **rappresentazione stilizzata dello scudo e della lancia del dio** ♂.

Pur presentando temperature medie superficiali piuttosto basse tra  $-120$  e  $-14$  °C e un'atmosfera molto rarefatta, è il pianeta più simile alla Terra tra quelli del sistema solare. Le sue dimensioni sono intermedie tra quelle del nostro pianeta e quelle della Luna, e ha l'inclinazione dell'asse di rotazione e la durata del giorno simili a quelle terrestri. La sua superficie presenta formazioni vulcaniche, valli, calotte polari e deserti sabbiosi, e formazioni geologiche che vi suggeriscono la presenza di un'idrosfera in un lontano passato. La superficie del pianeta appare fortemente craterizzata, a causa della quasi totale assenza di agenti erosivi principalmente, l'attività geologica, atmosferica e idro sferica e dalla totale assenza di attività tettonica delle placche capace di formare e poi modellare le strutture tettoniche. La bassissima densità dell'atmosfera non è poi in grado di consumare buona parte delle meteore, che pertanto raggiungono il suolo con maggior frequenza che non sulla Terra. Tra le formazioni geologiche più notevoli di Marte si segnalano: l'Olympus Mons, o monte Olimpo, il vulcano più grande del sistema solare alto 27 km; le Valles Marineris, un lungo canyon notevolmente più esteso di quelli terrestri; e un enorme cratere sull'emisfero boreale, ampio circa il 40% dell'intera superficie marziana. All'osservazione diretta, Marte presenta variazioni di colore, imputate storicamente alla presenza di vegetazione stagionale, che si modificano al variare dei periodi

dell'anno; ma successive osservazioni spettroscopiche dell'atmosfera hanno da tempo fatto abbandonare l'ipotesi che vi potessero essere mari, canali e fiumi oppure un'atmosfera sufficientemente densa. La smentita finale arrivò dalla missione Mariner 4, che nel 1965 mostrò un pianeta desertico e arido, animato da tempeste di sabbia periodiche e particolarmente violente. Le missioni più recenti hanno evidenziato la presenza di acqua ghiacciata. Intorno al pianeta orbitano due satelliti naturali, Fobos e Deimos, di piccole dimensioni e dalla forma irregolare.

<b>Parametri Orbitali, Dati Fisici e Osservativi</b>					
<b>Orbitali</b>		<b>Fisici</b>		<b>Osservativi</b>	
<i>Semiasse</i>	1,52 UA	<i>Diamet. equat.</i>	6.805 km	<i>Magn. app. min</i>	
<i>Perielio</i>	1,38 UA	<i>Superficie</i>	1,45x10 <sup>14</sup> m <sup>2</sup>	<i>Magn. app med</i>	-2,00
<i>Afelio</i>	1,67 UA	<i>Period. Rotaz.</i>	24,37 ore	<i>Magn. app max</i>	-2,91
<i>CRF orbitale</i>	9,55 UA	<i>Period. Orbit.</i>	687 gg		
<i>Inclinazione</i>	1,85°	<i>Incl su Eclittica</i>	5,65°		
<i>Satelliti</i>	2	<i>Temp. max</i>	20 °C		
<i>Anelli</i>	0	<i>Temp. med.</i>	-63 °C		
		<i>Temp. min.</i>	-140 °C		
		<i>Press. Atmosf</i>	6,36 mbar		

**UA = distanza Terra/Sole media pari a km149.597.870.**

## Osservazioni

A occhio nudo Marte solitamente appare di un marcato colore giallo, arancione o rossastro e per luminosità è il più variabile nel corso della sua orbita tra tutti i pianeti esterni: la sua magnitudine apparente infatti passa da un minimo +1,8 fino a un massimo di -2,91 all'opposizione perielica anche chiamata grande opposizione. A causa dell'eccentricità orbitale la sua distanza relativa varia a ogni opposizione determinando piccole e grandi opposizioni, con un diametro apparente da 3,5 a 25,1 secondi d'arco. Il 27 agosto 2003 alle 9:51:13 UT Marte si è trovato vicino alla Terra come mai in quasi 60.000 anni: 55 758 006 km 0,37271925 UA. Ciò è stato possibile perché Marte si trovava a un giorno dall'opposizione e circa a tre giorni dal suo perielio, cosa che lo rese particolarmente visibile dalla Terra. Tuttavia, questo avvicinamento è solo di poco inferiore ad altri. Ad esempio, il 22 agosto 1924 la distanza minima fu di 0,372846 unità astronomiche 55.777.000 km e si prevede che il 24 agosto 2208 sarà di 0,37279 unità astronomiche 55 769 000 km. Il massimo avvicinamento di questo millennio avverrà invece l'8 settembre 2729, quando Marte si troverà a 0,372004 unità astronomiche 55.651.000 km dalla Terra. Con l'osservazione al telescopio sono visibili alcuni dettagli caratteristici della superficie, che permisero agli astronomi dal sedicesimo al ventesimo secolo di speculare sull'esistenza di una civiltà organizzata sul pianeta. Basta un piccolo obiettivo da 70-80 mm per risolvere macchie chiare e scure sulla superficie e le calotte polari; già con un 100 millimetri si può riconoscere il Syrtis Major Planum. L'aiuto di filtri colorati permette inoltre di delineare meglio i bordi tra regioni di diversa natura geologica. Con un obiettivo da 250 mm e condizioni di visibilità ottimali sono visibili i caratteri principali della superficie, i rilievi e i canali. La visione di questi dettagli può essere parzialmente oscurata da tempeste di sabbia su Marte che possono estendersi fino a coprire tutto il pianeta. L'avvicinarsi di Marte all'opposizione comporta l'inizio di un periodo di moto retrogrado apparente, durante il quale, se ci si riferisce alla volta celeste, il pianeta appare in moto nel verso opposto all'ordinario quindi da est verso ovest anziché da ovest verso est con la sua orbita che sembra formare un 'cappio' in inglese loop; il moto retrogrado di Marte dura mediamente 72 giorni.

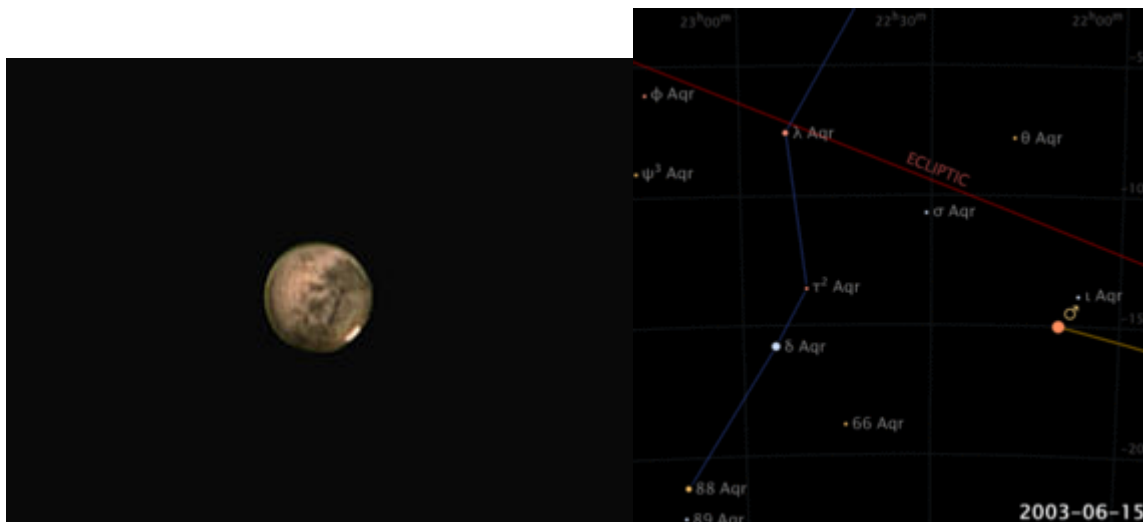


Immagine di Marte ripresa da un telescopio amatoriale  
alla Terra simulazione realizzata con Stellarium

Moto retrogrado apparente di Marte nel 2003 visto

## Storia delle osservazioni

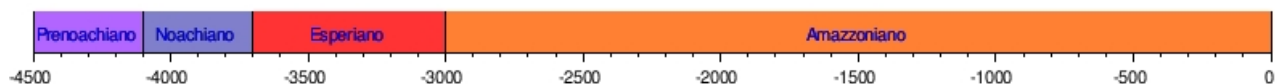
Dopo Venere e Giove, Marte è il pianeta più facilmente individuabile dalla Terra per via della grande luminosità relativa e del caratteristico colore rosso. Nonostante non si consideri la notte dei tempi, i primi a osservare dettagliatamente Marte furono gli Egizi. Informazioni dettagliate su Marte ci arrivano dai Babilonesi. Indiani e Cinesi fecero altrettanti dettagliati studi. Le popolazioni di cultura etrusco-greco-romana lo associavano all'immagine di Maris/Ares/Marte, dio della guerra. Tra i primi a descrivere delle osservazioni di Marte si ricorda Aristotele, il quale ne notò anche il passaggio dietro alla Luna ottenendo così una prova empirica della concezione di un universo geocentrico con la terra al centro del sistema al posto del sole. Il 13 ottobre 1590 Michael Maestlin osservò l'unica occultazione documentata di Marte da Venere presso la città tedesca di Heidelberg. Nel 1609 Galileo fu il primo uomo a puntare un telescopio verso Marte. Fu solo sul finire del XIX secolo che attente osservazioni e il miglioramento della tecnologia permisero di ottenere una visione sufficientemente nitida da distinguere le caratteristiche del suolo marziano. Il 5 settembre 1877 si verificò un'opposizione perielica e in quell'anno l'astronomo italiano Giovanni Schiaparelli, in quel momento a Milano, utilizzò un telescopio di 22 cm per disegnare la prima mappa dettagliata di Marte la cui nomenclatura è ancora quella ufficiale. Ne risultarono strutture che l'astronomo definì Canali, successivamente fu dimostrato che si trattava di illusioni ottiche, in quanto la superficie del pianeta presentava diverse lunghe linee alle quali egli attribuì nomi di celebri fiumi terrestri. L'errata traduzione in inglese del termine canali usato nei lavori di Schiaparelli, venne usato il termine canal, ovvero canale artificiale, piuttosto che il generico channel portò il mondo scientifico a credere che su Marte vi fossero canali irrigui artificiali, mentre effettivamente lo scienziato aveva solo parlato di grandi solchi sulla superficie. Influenzato da queste traduzioni l'astronomo statunitense Percival Lowell fondò un osservatorio, l'osservatorio Lowell, dotato di un telescopio di 300 e 450 mm che venne usato nella particolarmente favorevole opposizione del 1894 e nelle successive. Pubblicò diversi libri su Marte e le sue teorie sull'esistenza di vita sul pianeta, basate anche sull'origine artificiale dei canali, ebbero una notevole influenza sull'opinione pubblica. Tra gli astronomi che osservarono gli ormai caratteristici canali marziani si ricordano inoltre Henri Joseph Perrotin e Louis Thollon di Nizza. Nacque in quel periodo l'immagine di un mondo vecchio contrapposto a una Terra di mezza età e a Venere primitiva, dove la siccità aveva costretto la matura civiltà marziana a immense opere di canalizzazione: un topos che avrà notevole successo in fantascienza. Per lungo tempo si ritenne che Marte fosse un pianeta coperto di vegetazione e alcuni mari: i cambiamenti stagionali di Marte, infatti, causavano una riduzione delle calotte polari d'estate e creavano ampie macchie scure sulla sua superficie. Tuttavia le osservazioni al telescopio non erano in grado di confermare tali speculazioni: al progredire della qualità dei



telescopi si assisteva infatti a una riduzione dei canali, finché nel 1909 Camille Flammarion, con un telescopio di 840 mm, osservò disegni irregolari ma nessun canale. La stagionalità marziana fu d'ispirazione, nonostante l'inesistenza di prove, per teorie sulla possibile struttura dell'ecosistema di Marte addirittura fino negli anni sessanta del XX secolo. In rinforzo a tali tesi vennero presentati anche scenari dettagliati riguardanti il metabolismo e i cicli chimici dello stesso. I progressi nell'osservazione spaziale consentirono inoltre la scoperta dei due satelliti naturali, Fobos e Deimos, probabilmente asteroidi catturati dalla gravità del pianeta. L'esistenza di tali satelliti era già stata postulata da tempo, tanto che oltre un secolo e mezzo prima Jonathan Swift ne citava alcuni dati orbitali approssimativi né I viaggi di Gulliver. Le aspettative del grande pubblico vennero disattese quando, nel 1965, la sonda Mariner 4 raggiunse per la prima volta il pianeta non rilevando segni di costruzioni. Il primo atterraggio di sonde automatiche avvenne undici anni dopo, con le missioni Viking I e II, vennero effettivamente rilevate tracce di vita ma non vennero poi rilevati composti organici al carbonio in superficie, e quindi i test sulla vita vennero scartati come errati, dalla successiva scoperta della presenza di composti organici si sono poi aperte discussioni e dubbi. Dal finire dello scorso secolo Marte è stato nuovamente meta di numerose sonde, statunitensi ed europee, che hanno portato a un significativo miglioramento delle conoscenze sul pianeta; grazie alla missione Mars Global Surveyor, terminata verso la fine del 2006, si sono ottenute infatti mappe molto dettagliate dell'intera superficie di Marte. Nel 2005 l'amministrazione statunitense ha infine commissionato alla NASA gli studi per una possibile missione umana fino a Marte.

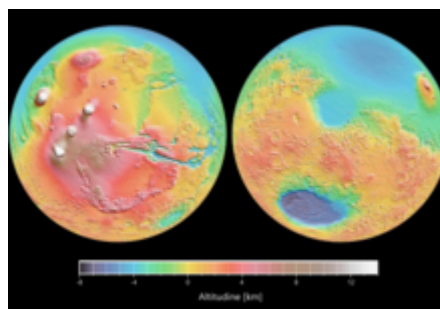
## Formazione

Marte si formò 4,6 miliardi di anni fa, con una storia simile agli altri tre pianeti terrestri e cioè a seguito della condensazione della nebulosa solare, per lo più dei silicati. A causa della distanza superiore dal Sole rispetto alla Terra, durante la fase iniziale della formazione nell'orbita di Marte si trovava una concentrazione maggiore di elementi con basso punto di ebollizione, come cloro, fosforo e zolfo, probabilmente spinti via dalle orbite interne dal forte vento solare del giovane Sole. La storia del pianeta può essere suddivisa in quattro ere geologiche che caratterizzano la sua formazione e evoluzione.



**Noachiano**, *primo dei tre periodi che hanno caratterizzato la storia geologica di Marte.*

Durante la prima era, compresa tra circa 4,1 e 3,7 miliardi di anni fa, il pianeta fu soggetto all'intenso bombardamento tardivo, di cui fu vittima anche la Terra. Circa il 60% della superficie ha dei marcatori risalenti a quell'era, in particolare crateri da impatto. Il più grande di questi si trova nell'emisfero settentrionale e ha un diametro di circa 10.000 km, quasi metà della circonferenza del pianeta. L'ipotesi più accreditata sulla formazione di questo cratere è l'impatto con un planetoidale delle dimensioni di Plutone, che lasciò una profonda traccia sul pianeta, il bacino boreale, che occupa circa il 40% del pianeta, conferendo una dicotomia unica nel sistema solare. Un'altra formazione tipica di questo periodo è la regione di Tharsis, soggetta a un vulcanismo molto attivo e inondata, verso la fine dell'era, da una grande quantità d'acqua, molto abbondante a quei tempi. Questo concatenarsi di eventi potrebbe aver permesso condizioni adatte alla vita microbiologica.



**Mappa altimetrica che evidenzia la dicotomia di Marte, ricostruita a partire dai dati forniti dal Mars Global Surveyor 2001**

## **Esperiano**, *secondo dei periodi che hanno caratterizzato la storia geologica di Marte.*

Lentamente, in poco più di un miliardo e mezzo di anni, Marte passò da una fase calda e umida caratteristica del Noachiano a quella di pianeta freddo e arido osservabile attualmente; questa fase di transizione avvenne durante l'Esperiano, un periodo caratterizzato da un'intensa attività vulcanica e alluvioni catastrofiche che scavarono immensi canali lungo la superficie. Sono tipiche di questo periodo le grandi pianure basaltiche e l'Olympus Mons, il vulcano più alto di tutto il sistema solare. Le continue eruzioni portarono in superficie grosse quantità di anidride solforosa e acido solfidrico, mutando le grandi distese di acqua liquida in piccoli bacini di acqua ad alta acidità per via dell'acido solforico che si andò a formare. Sebbene la scomparsa dei fiumi e dei laghi sia generalmente considerata ascrivibile verso la fine di questa era, un recente modello realizzato da un gruppo di scienziati statunitensi guidati da Edwin Kite sembra aprire la possibilità che l'esistenza dei corsi d'acqua sulla superficie sia stata possibile sino a meno di un miliardo di anni fa.



**Confronto tra le dimensioni della Francia e l'Olympus Mons**

## **Amazzoniano**, *ultimo dei periodi che hanno caratterizzato la storia geologica di Marte.*

L'Amazzoniano, da circa 3 miliardi di anni fa a oggi, è caratterizzato da un periodo povero di bombardamenti meteoritici e da condizioni climatiche fredde e aride simili a quelle attuali. Una formazione tipica di questa era è l'Amazonis Planitia, una vasta pianura poco caratterizzata da crateri. Grazie all'attività geologica relativamente stabile e alla diminuzione degli effetti caotici del sistema solare, lo studio di queste formazioni relativamente recenti è possibile applicando molti principi elementari come la legge della sovrapposizione o il conteggio di crateri in un'area determinata per stimare età e sviluppo geologico della zona interessata.

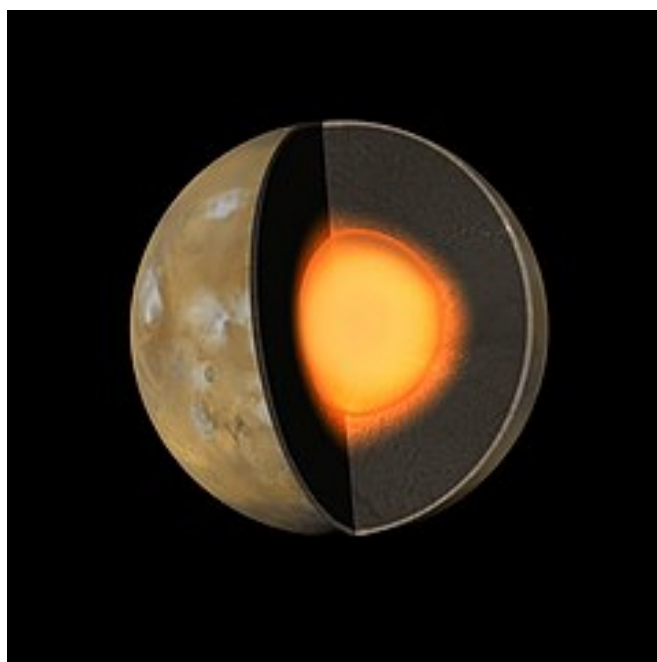
### **Parametri Orbitali**

Marte orbita attorno al Sole a una distanza media di circa  $2,28 \times 10^8$  km 1,52 UA e il suo periodo di rivoluzione è di circa 687 giorni 1 anno, 320 giorni e 18,2 ore terrestri. Il giorno solare di Marte il Sol è poco più lungo del nostro: 24 ore, 37 minuti e 23 secondi. L'inclinazione assiale marziana è di  $25,19^\circ$  che risulta simile a quella della Terra. Per questo motivo le stagioni si assomigliano eccezion fatta per la durata doppia su Marte. Inoltre, il piano dell'orbita si discosta di circa  $1,85^\circ$  da quello dell'eclittica. A causa della discreta eccentricità della sua orbita, pari a 0,093, la sua distanza dalla Terra all'opposizione può oscillare fra circa 100 e circa 56 milioni di chilometri; solo Mercurio ha un'eccentricità superiore nel Sistema Solare. Tuttavia in passato Marte seguiva un'orbita molto più circolare: circa 1,35 milioni di anni fa la sua eccentricità era equivalente a 0,002, che è molto inferiore a quella terrestre attuale. Marte ha un ciclo di eccentricità di 96 000 anni terrestri paragonati ai 100.000 della Terra; negli ultimi 35.000 anni l'orbita marziana è diventata sempre più eccentrica a causa delle influenze gravitazionali degli altri pianeti e il punto di maggior vicinanza tra Terra e Marte continuerà a diminuire nei prossimi 25.000 anni.

## ***Caratteristiche Fisiche***

### **Struttura Interna**

La crosta, il mantello e il nucleo di Marte si formarono entro circa 50 milioni di anni dalla nascita del Sistema solare e rimasero attivi per il primo miliardo. Il mantello fu la regione rocciosa interna che trasferiva il calore generato durante l'accrescimento e formazione del nucleo. Si ritiene che la crosta sia stata creata dalla fusione della parte superiore del mantello mutando nel corso del tempo a causa di impatti con oggetti estranei, vulcanismo, movimenti successivi del mantello stesso ed erosione. Grazie alle osservazioni della sua orbita attraverso lo spettrometro TES del Mars Global Surveyor e l'analisi dei meteoriti, è possibile sapere che Marte ha una superficie ricca di basalto. Alcune zone però mostrano quantità predominanti di silicio che potrebbe essere simile all'andesite sulla Terra. Gran parte della superficie è coperta da ossido ferrico che gli conferisce il suo peculiare colore rosso intenso. La crosta ha uno spessore medio di 50 km con un picco di 125 km. Per fare un confronto con quella terrestre, che ha uno spessore di circa 40 km, si potrebbe dire che la crosta marziana è tre volte più spessa, considerando le dimensioni doppie del nostro pianeta. Il mantello, più denso di quello terrestre di circa 2,35 volte, è composto soprattutto da silicati e, benché sia inattivo, è all'origine di tutte le testimonianze di fenomeni tettonici e vulcanici sul pianeta. È stato possibile identificare la composizione del mantello fino a una pressione di 23,5 GPa e il modello di Dreibus e Wänke indica che la sua composizione include olivina, clinopirosseno, ortopirosseno e granato. Il nucleo è composto principalmente da ferro e nichel, con una percentuale intorno al 16% di zolfo e si estende per un raggio di circa 1.800 km. Molto probabilmente il nucleo è solido, ma allo stato viscoso; di conseguenza Marte non presenta un campo magnetico apprezzabile, massimo 1.500 nT né attività geologica di rilievo. Questo comporta la mancanza di protezione del suolo del pianeta dall'attività di particelle cosmiche ad alta energia; tuttavia, la maggiore distanza dal Sole rende meno violente le conseguenze della sua attività. Anche se Marte non dispone di un campo magnetico intrinseco, lo studio del paleomagnetismo ha provato che si sia avuta una polarità alternata attorno ai suoi due poli grazie al ritrovamento di rocce magnetizzate: le rocce formatesi prima della scomparsa della magnetosfera sono magnetizzate, a differenza di quelle formatesi dopo.



**La struttura interna del pianeta, ricostruzione artistica a cura della NASA**

## Idrologia

La presenza di acqua allo stato liquido in superficie è possibile su Marte in quanto per l'equazione di Clapeyron, con la quale si calcola il rapporto di sublimazione di una sostanza tra pressione e temperatura alla pressione atmosferica marziana media nominale, l'acqua è liquida all'incirca sotto i -40 C dipendentemente dall'esatta pressione locale per un piccolo intervallo, al di sotto del quale ghiaccia e al di sopra del quale evapora. Alcuni ritengono che la pressione atmosferica sia comunque eccessivamente bassa, salvo in zone di elevata depressione e per brevi periodi di tempo. Il ghiaccio d'acqua però è abbondante: i poli marziani infatti ne sono ricoperti e lo strato di permafrost si estende fino a latitudini di circa 60°. La NASA nel marzo del 2007 annunciò che se si ipotizzasse lo scioglimento totale delle calotte polari, l'intero pianeta verrebbe sommerso da uno strato d'acqua profondo 11 metri. Si ritiene che grandi quantità di acqua siano intrappolate sotto la spessa criosfera marziana. La formazione della Valles Marineris e dei suoi canali di fuoriuscita dimostrano che durante le fasi iniziali della storia di Marte fosse presente una grande quantità di acqua allo stato liquido. Una testimonianza la si può ritrovare nella Cerberus Fossae, una frattura della crosta risalente a 5 milioni di anni fa, dalla quale proviene il mare ghiacciato visibile sulla Elysium Planitia con al centro la Cerberus Palus. Tuttavia, è ragionevole ritenere che la morfologia di questi territori possa essere dovuta alla stagnazione di correnti laviche anziché all'acqua. La struttura del terreno e sua inerzia termica paragonabile a quella delle pianure di Gusev, assieme alla presenza di formazioni coniche simili a vulcani, avvalorano la seconda tesi. In più la stechiometria molare frazionaria dell'acqua in quelle aree è solamente del 4% circa, fatto attribuibile più a minerali idrati che alla presenza di ghiaccio superficiale. Grazie alle fotografie ad alta risoluzione del Mars Global Surveyor, è stata riscontrata la presenza di complesse reti naturali di drenaggio, apparentemente dotate di affluenti e corsi principali. Sono inoltre piuttosto frequenti elementi morfologici interpretabili come conoidi di deiezione e delta fluviali, che implicano un agente allo stato liquido con caratteristiche reologiche simili a quelle dell'acqua e non presentano differenze significative rispetto agli analoghi terrestri. La missione del Rover Mars Science Laboratory noto come Curiosity ha consentito per la prima volta la ripresa di immagini ravvicinate di sedimenti marziani interpretabili senza ambiguità come depositi alluvionali e deltizi originati da corsi d'acqua, con caratteri sedimentologici del tutto assimilabili a quelli terrestri. Mars Global Surveyor tuttavia ha anche fotografato alcune centinaia di esempi simili a canali di trasudamento presso crateri e canyon. Questi burroni gully sono maggiormente presenti su altipiani dell'emisfero australe e tutti hanno un orientamento di 30° rispetto al polo meridionale. Non sono state riscontrate erosioni o crateri lasciando supporre una loro formazione piuttosto recente. Altre prove dell'esistenza passata di acqua allo stato liquido su Marte provengono dalla scoperta di specifici minerali come ematite e goethite che in certi casi si formano in presenza di acqua. A ogni modo, contemporaneamente alla scoperta di nuove prove dell'esistenza di acqua, vengono confutate precedenti ipotesi errate grazie agli studi di immagini ad alta risoluzione circa 30 cm inviate dal **Mars Reconnaissance Orbiter** MRO. Ad agosto del 2008 venne trovato del ghiaccio d'acqua sotto il suolo marziano, grazie alla sonda Phoenix che con i suoi strumenti ha rimosso il terreno che lo ricopriva; nei sol successivi il sottile strato di ghiaccio scoperto è sublimato lentamente. La sonda a ottobre dello stesso anno fu in grado di rilevare una leggera formazione di neve che si è sciolta prima di arrivare al suolo.

### Acqua allo stato liquido

Nell'esplorazione moderna la NASA si è concentrata nella ricerca di acqua sul pianeta quale elemento base per lo sviluppo della vita. In passato erano stati osservati i segni della passata presenza di acqua: sono stati osservati canali simili ai letti dei fiumi sulla terra. È tuttora oggetto di molti dibattiti l'origine dell'acqua liquida che un tempo scorreva sul pianeta; l'acqua, sotto forma di ghiaccio, costituisce una piccola parte delle calotte polari il resto è formato da anidride carbonica solida. Altra acqua si trova sotto il suolo del pianeta, ma in quantità ancora sconosciuta. La presenza di acqua nel sottosuolo del polo sud di Marte è stata confermata dalla sonda europea Mars Express nel gennaio del 2004; nel 2005 il radar MARSIS ha individuato un deposito di ghiaccio dello spessore maggiore di un chilometro tra gli 1,5 e i 2,5 km di profondità, nei pressi della regione di Chryse Planitia. Nel luglio 2008 annunciò le prove della presenza dell'acqua su Marte. Nel settembre 2015, su un articolo su Nature Geo Science, è stata annunciata, sulla base delle ricognizioni del MRO, la scoperta di acqua liquida sul pianeta, confermando le teorie di molti studiosi e astronomi; si tratta di piccoli rigagnoli di acqua salata, che si generano periodicamente. Il 28 settembre 2015, la NASA ha annunciato di avere



delle prove concrete che sulla superficie di Marte scorra acqua salata allo stato liquido sotto forma di piccoli ruscelli ma si tratta comunque di speculazione e non di osservazione diretta. Invece le analisi radar condotte dal 2012 al 2015 dalla sonda Mars Express hanno permesso di rilevare senza alcun dubbio una distesa di acqua salata allo stato liquido sotto la calotta polare australe.

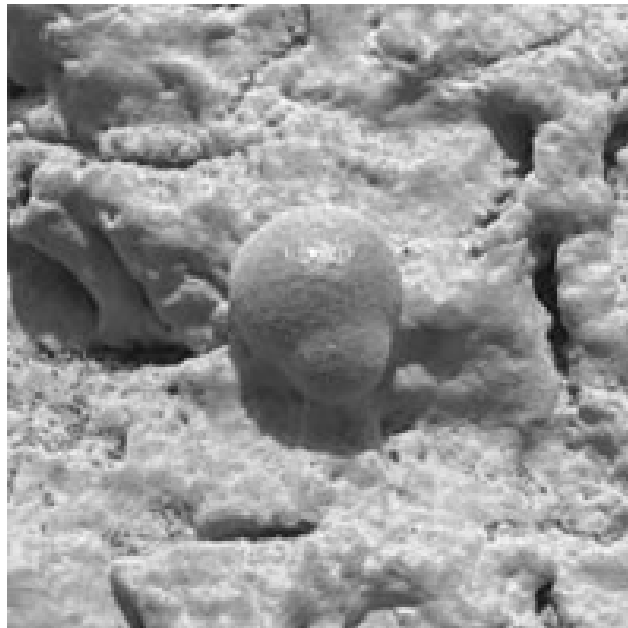
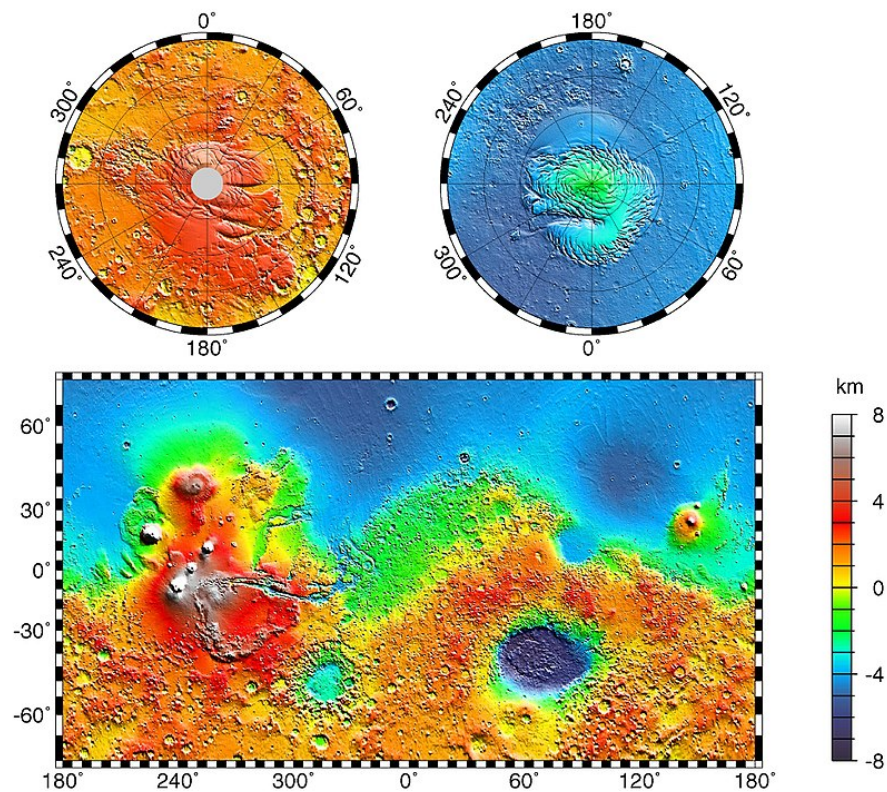


Foto di una microscopica formazione rocciosa originata da interazione con acqua ripresa da Opportunity 2004

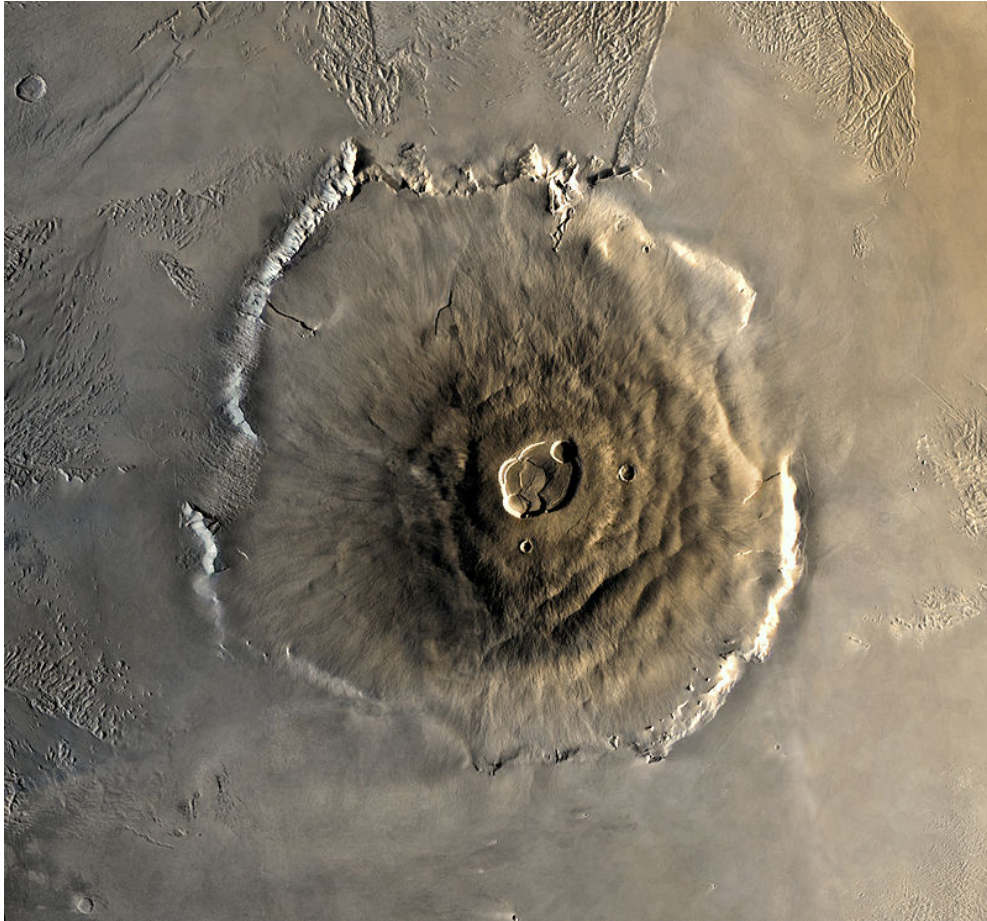
## Superficie



Mapa topografica di Marte. Sono evidenti gli imponenti altipiani vulcanici in rosso e i profondi crateri in blu



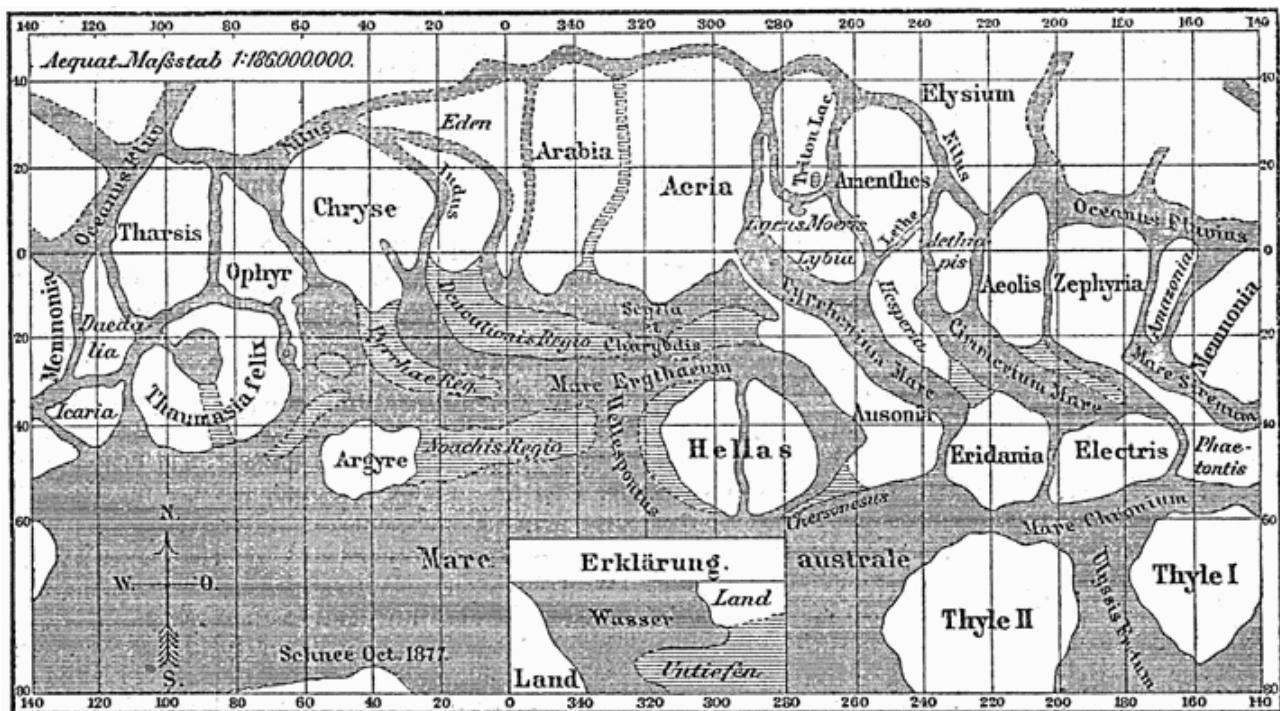
La topografia di Marte presenta una dicotomia netta tra i due emisferi: a nord dell'equatore si trovano enormi pianure coperte da colate laviche mentre a sud la superficie è caratterizzata da grandi altipiani segnati da migliaia di crateri. Una teoria proposta nel 1980, e avvalorata da prove scientifiche nel 2008, giustifica questa situazione attribuendone l'origine a una collisione del pianeta con un oggetto con dimensioni pari a quelle di Plutone, avvenuta circa 4 miliardi di anni fa. Se tale teoria venisse confermata, l'emisfero boreale marziano, che ricopre circa il 40% del pianeta, diventerebbe il sito d'impatto più vasto del Sistema Solare con 10.600 km di lunghezza e 8.500 km di larghezza strappando il primato al Bacino Polo Sud-Aitken. La superficie di Marte non pare movimentata dall'energia che caratterizza quella terrestre. In sostanza, Marte non ha una crosta suddivisa in placche, e quindi la tettonica a zolle del modello terrestre risulta inapplicabile a tale pianeta. L'attività vulcanica è stata molto intensa, come testimonia la presenza di imponenti vulcani. Il maggiore di essi è l'Olympus Mons, che, con una base di 600 km e un'elevazione pari a circa 24 km rispetto alle pianure circostanti, è il maggior vulcano del sistema solare. Esso è molto simile ai vulcani a scudo delle isole Hawaii, originatisi dall'emissione per lunghissimi tempi di lava molto fluida. Uno dei motivi per i quali tali giganteschi edifici vulcanici sono presenti è che, per l'appunto, la crosta marziana è priva della mobilità delle placche tettoniche. Questo significa che i punti caldi da cui sale in superficie il magma battono sempre le stesse zone del pianeta, senza spostamenti nel corso di milioni di anni di attività. La ridotta forza di gravità ha certamente agevolato la lava, che su Marte ha un peso di poco superiore a quello dell'acqua sulla Terra. Questo rende possibile una più facile risalita dal sottosuolo e una più ampia e massiva diffusione sulla superficie. Un gigantesco canyon, lungo 5.000 km, largo 500 km e profondo 5–6 km attraversa il pianeta all'altezza dell'equatore e prende il nome di Valles Marineris, ed è l'unica struttura vagamente simile a quelle osservate nel XIX secolo e considerate poi uno dei più grandi sbagli della moderna astronomia. La sua presenza costituisce un vero e proprio sfregio sulla superficie marziana, e data la sua enorme struttura, non è chiaro cosa possa averla prodotta: certamente non l'erosione data da agenti atmosferici o acqua. La struttura di questo canyon è tale da far sembrare minuscolo il Grand Canyon americano. L'equivalente terrestre sarebbe un canyon che partendo da Londra arriva a Città del Capo, con profondità dell'ordine dei 10 km. Questo consente di capire come tale canyon abbia una considerevole importanza per la struttura di Marte, e come esso non sia classificabile con casi noti sulla Terra. Un altro importante canyon è la Ma'adim Vallis dal termine ebraico che indica appunto Marte. La sua lunghezza è di 700 km, la larghezza 20 km e raggiunge in alcuni punti una profondità di 2 km. Durante l'epoca Noachiana la Ma'adim Vallis appariva come un enorme bacino di drenaggio di circa 3 milioni di chilometri quadrati. Marte presenta inoltre approssimativamente 43.000 crateri d'impatto con un diametro superiore a 5 km; il maggiore tra questi risulta essere il Bacino Hellas, una struttura con albedo chiara visibile anche dalla Terra. Marte, per le sue dimensioni, ha una probabilità inferiore della Terra di entrare in collisione con un oggetto esterno; tuttavia, il pianeta si trova più prossimo alla cintura degli asteroidi ed esiste la possibilità che entri addirittura in contatto con oggetti intrappolati nell'orbita gioviana. A ogni modo l'atmosfera marziana fornisce una protezione dai corpi più piccoli: paragonata a quella lunare, la superficie di Marte è meno craterizzata. Il Thermal Emission Imaging System THEMIS montato sul Mars Odyssey ha rilevato sette possibili ingressi di caverne sui fianchi del vulcano Arsia Mons. Ogni caverna porta il nome delle persone amate degli scopritori. Le dimensioni di questi ingressi vanno da 100 a 252 m in larghezza e si ritiene che la loro profondità possa essere compresa tra 73 e 96 m. A parte la caverna Dena, tutte le caverne non lasciano penetrare la luce rendendo impossibile stabilirne le esatte dimensioni interne. Il 19 febbraio 2008 il Mars Reconnaissance Orbiter ha immortalato un importante fenomeno geologico: le immagini hanno ripreso una frana spettacolare che si ritiene composta da ghiaccio frantumato, polvere e grandi blocchi di roccia che si sono distaccati da una scogliera alta circa 700 metri. Prove di tale valanga si sono riscontrate anche attraverso le nubi di polvere appunto sopra le stesse scogliere.



**L'Olympus Mons, il vulcano più alto del sistema solare in un'immagine del 1978 dalla sonda Viking 1**

## **Nomenclatura**

La nomenclatura marziana segue le mappe create dai primi osservatori del pianeta. Johann Heinrich Mädler e Wilhelm Beer furono i primi a stabilire che la maggior parte delle caratteristiche della superficie di Marte fossero permanenti e calcolarono inoltre anche la durata del periodo di rotazione. Nel 1840 Mädler tracciò la prima mappa del pianeta sulla base di dieci anni di osservazioni. I due scienziati anziché attribuire un nome alle singole caratteristiche, assegnarono a ognuna di esse una lettera. Tra le prime mappe in cui furono definiti i nomi della superficie del pianeta si ricordi quella del 1877 a opera di Giovanni Schiaparelli, il quale determinò e descrisse le principali conformazioni ricavando i nomi da termini indicanti antichi popoli Ausonia, dei, luoghi geografici Syrtis Major, Benacus Lacus, esseri mitologici Cerberus, Gorgonium Sinus, ecc. Sono poi seguite altre mappe come quelle di Lowell 1894, Antoniadi 1909, De Mottoni 1957. Generalmente la superficie di Marte è classificata in base alle differenze di albedo. Le piane più chiare, coperte di polveri e sabbie ricche di ossido di ferro, portano nomi di vaste aree geografiche come ad esempio l'Arabia Terra o l'Amazonis Planitia. Le strutture più scure invece, che un tempo vennero considerate dei mari, portano nomi come Mare Erythraeum, Mare Sirenum e Aurorae Sinus. La struttura più scura visibile dalla Terra è Syrtis Major. Successivamente l'IAU ha introdotto la cartografia di Marte per identificare i luoghi marziani, suddividendo la superficie del pianeta secondo un reticolato, adatto a una rappresentazione in scala 1:5.000.000, che definisce 30 maglie.



Mapa di Marte disegnata da Schiaparelli nel 1877; si notino i nomi assegnati dall'astronomo italiano alle principali formazioni marziane, ancora in uso

## La Gravità su Marte

Marte ha una massa pari ad appena l'11% di quella terrestre, mentre il suo raggio equatoriale misura 3392,8 km. Sulla superficie di Marte l'accelerazione di gravità è mediamente pari a 0,376 volte quella terrestre. A titolo d'esempio, un uomo con una massa di 70 kg che misurasse il proprio peso su Marte facendo uso di una bilancia tarata sull'accelerazione di gravità terrestre registrerebbe un valore pari a circa 26,3 kg.

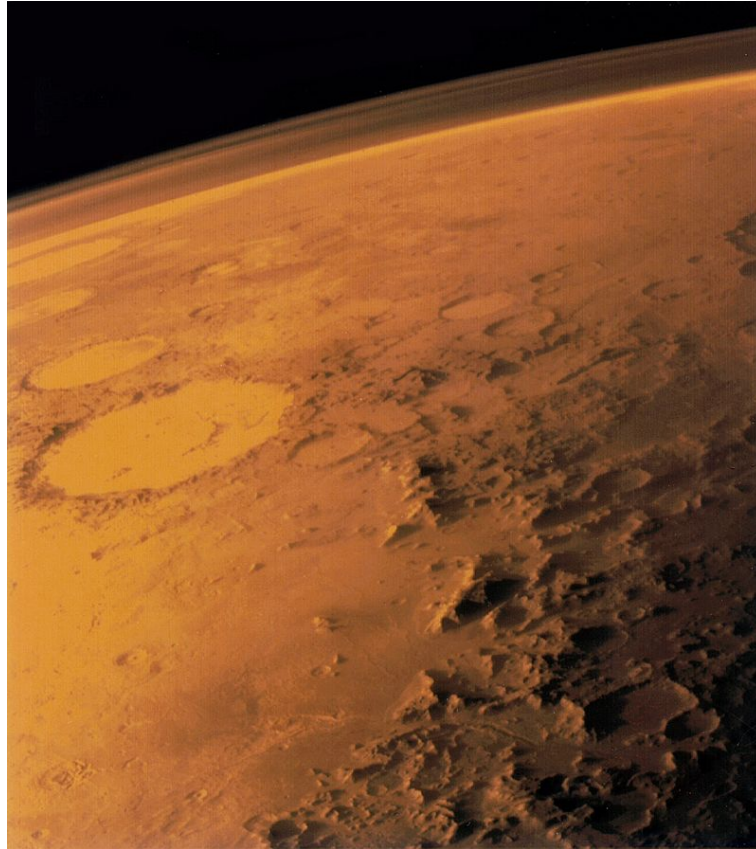
## Atmosfera

La magnetosfera di Marte è assente a livello globale e, in seguito alle rilevazioni del magnetometro MAG/ER del Mars Global Surveyor e considerando che è stata constatata l'assenza di magnetismo sopra i crateri Argyre e Hellas Planitia, si presume sia scomparsa da circa 4 miliardi di anni; i venti solari colpiscono quindi direttamente la ionosfera. Questo mantiene l'atmosfera del pianeta piuttosto sottile per via della continua asportazione di atomi dalla parte più esterna della stessa. A riprova di questo fatto sia il Mars Global Surveyor sia il Mars Express hanno individuato queste particelle atmosferiche ionizzate allontanarsi dietro il pianeta. La pressione atmosferica media è di 700 Pa ma varia da un minimo di 30 Pa sull'Olympus Mons a oltre 1155 Pa nella depressione di Hellas Planitia. Per un paragone Marte ha una pressione atmosferica che è meno dell'1% rispetto a quella della Terra. L'atmosfera marziana si compone principalmente di anidride carbonica 95%, azoto 2,7%, argon 1,6%, vapore acqueo, ossigeno e monossido di carbonio. È stato definitivamente provato che è presente anche metano nell'atmosfera marziana e in certe zone anche in grandi quantità; la concentrazione media si aggirerebbe comunque sulle 10 ppb per unità di volume. Dato che il metano è un gas instabile che viene scomposto dalla radiazione ultravioletta solitamente in un periodo di 340 anni nelle condizioni atmosferiche marziane, la sua presenza indica l'esistenza di una fonte relativamente recente del gas. Tra le possibili cause vi possono essere l'attività vulcanica, l'impatto di una cometa e la presenza di forme di vita microbiche generanti metano. Un'altra possibile causa potrebbe essere un processo non biologico dovuto alle proprietà

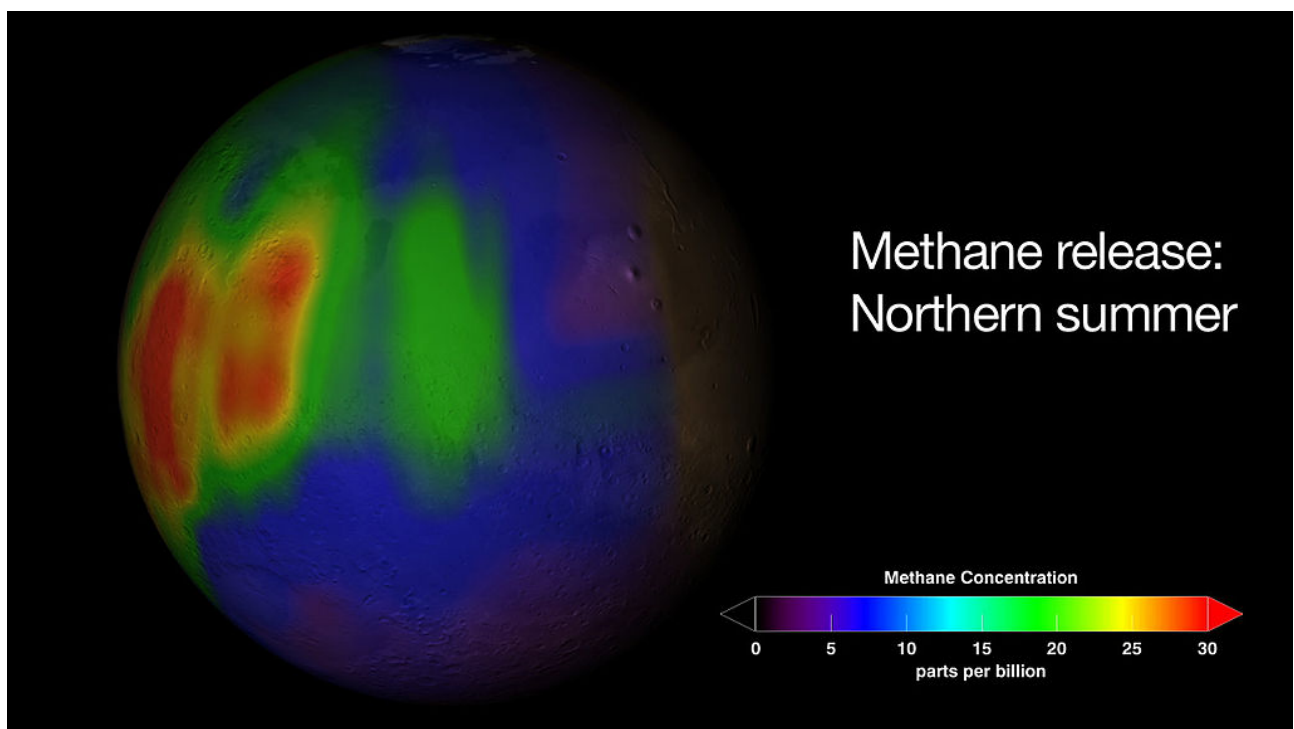


della serpentinite di interagire con acqua, anidride carbonica e l'olivina, un minerale comune sul suolo di Marte. Durante l'inverno l'abbassamento della temperatura provoca la condensa del 25-30% dell'atmosfera che forma spessi strati di ghiaccio d'acqua o di anidride carbonica solida ghiaccio secco. Con l'estate il ghiaccio sublima causando grandi sbalzi di pressione e conseguenti tempeste con venti che raggiungono i 400 km/h. Questi fenomeni stagionali trasportano grandi quantità di polveri e vapore d'acqua che generano grandi cirri. Queste nuvole vennero fotografate dal Rover Opportunity nel 2004.

Composizione Atmosferica		
Anidrite Carbonica	CO <sub>2</sub>	95,32%
Azoto	N <sub>2</sub>	2,7 %
Argon	Ar	1,6 %
Ossigeno	O <sub>2</sub>	0,13 %
Monossido di carbonio	CO	0,08 %
Acqua	H <sub>2</sub> O	0,02 %
Monossido di azoto	NO <sub>x</sub>	0,01 %
Neon	Ne	tracce
Krypton	Kr	tracce
Xeno	Xe	tracce
Ozono	O <sub>3</sub>	tracce
Metano	CH <sub>4</sub>	tracce



Il sottile strato atmosferico di Marte è visibile sull'orizzonte dell'area di Argyre Planitia. A sinistra è visibile il cratere Galle. Viking 1, 1976

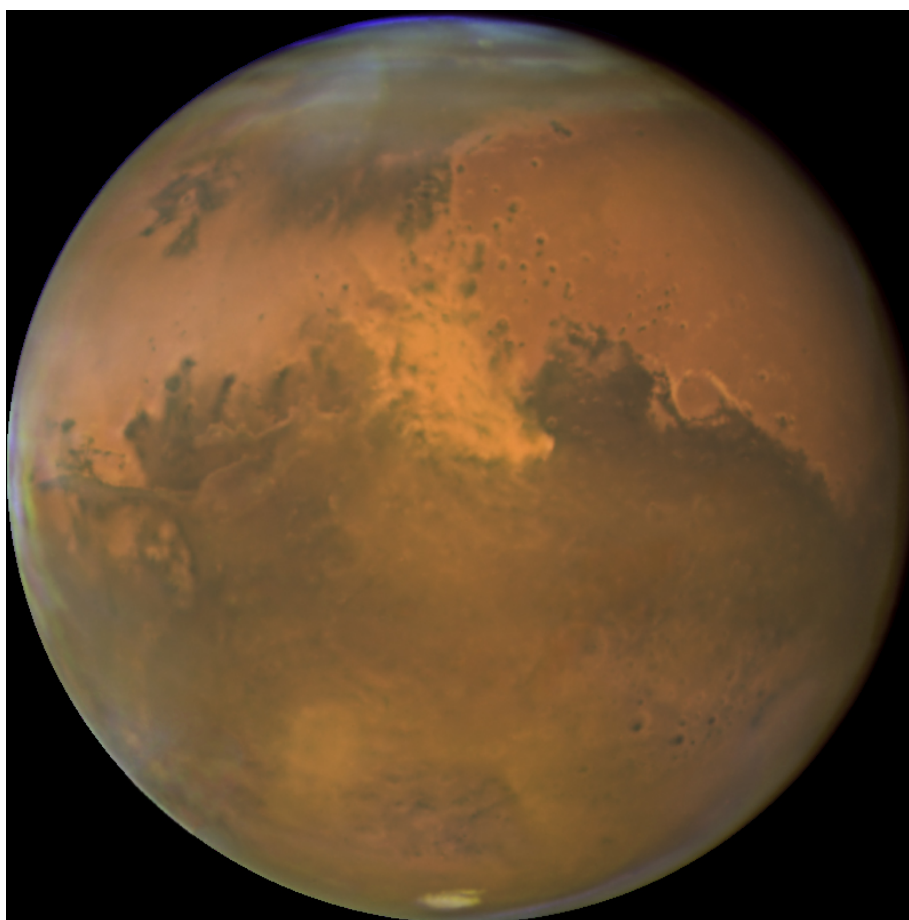


Tracce di metano rilasciate nell'atmosfera durante l'estate dell'emisfero nord, elaborazione a cura della NASA 2009



## Clima

Tra tutti i pianeti del sistema solare Marte è quello con il clima più simile a quello terrestre per via dell'inclinazione del suo asse di rotazione. Le stagioni, tuttavia, durano circa il doppio dato che la distanza dal Sole lo porta ad avere una rivoluzione di poco meno di 2 anni. Le temperature variano dai  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$  degli inverni polari a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dell'estate. La forte escursione termica è dovuta anche al fatto che Marte ha un'atmosfera sottile e quindi una bassa pressione atmosferica e una bassa capacità di trattenere il calore del suolo. Una differenza interessante rispetto al clima terrestre è dovuta alla sua orbita molto eccentrica. Infatti, Marte è prossimo al periastro quando è estate nell'emisfero meridionale e l'inverno in quello settentrionale e vicino all'afastro nella situazione opposta. La conseguenza è un clima con una maggiore escursione termica nell'emisfero sud rispetto a quello nord che è costantemente più freddo. Infatti, le temperature estive dell'emisfero meridionale possono essere fino a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  più calde di quelle di un'equivalente estate in quello nord. Rilevanti sono anche le tempeste di sabbia che possono estendersi su una piccola zona così come sull'intero pianeta. Solitamente si verificano quando Marte si trova prossimo al Sole ed è stato dimostrato che aumentano la temperatura atmosferica del pianeta, per una sorta di effetto serra. In particolare la tempesta di sabbia del 2018 è stata una delle più studiate con due Rover sul suolo marziano a effettuare misurazioni a terra Opportunity e Curiosity e cinque sonde attive in orbita 2001 Mars Odyssey, Mars Express, Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Orbiter Mission e MAVEN. Entrambe le calotte polari sono composte principalmente da ghiaccio ricoperto da uno strato di circa un metro di anidride carbonica solida ghiaccio secco al polo nord, mentre lo stesso strato raggiunge gli otto metri in quello sud, la sovrapposizione del ghiaccio secco sopra a quello d'acqua è dovuto al fatto che il primo condensa a temperature molto più basse e quindi successivamente a quello d'acqua in epoca di raffreddamento. Entrambi i poli presentano dei disegni a spirale causati dall'interazione tra il calore solare disomogeneo e la sublimazione e condensazione del ghiaccio. Le loro dimensioni variano inoltre a seconda della stagione.



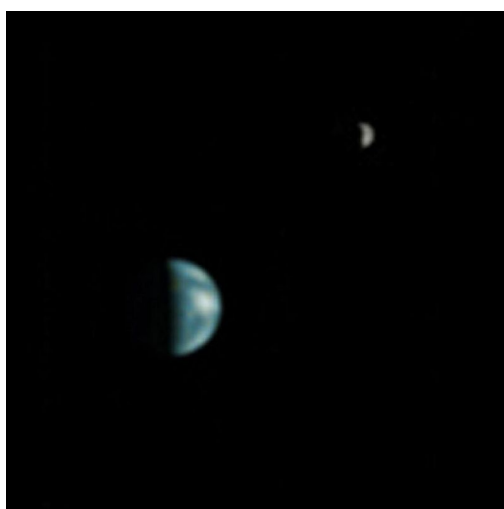
**Immagine ripresa dal telescopio spaziale Hubble il 28 ottobre 2005 che mostra una vasta tempesta di sabbia in prossimità dell'equatore del pianeta**

## Astronomia su Marte



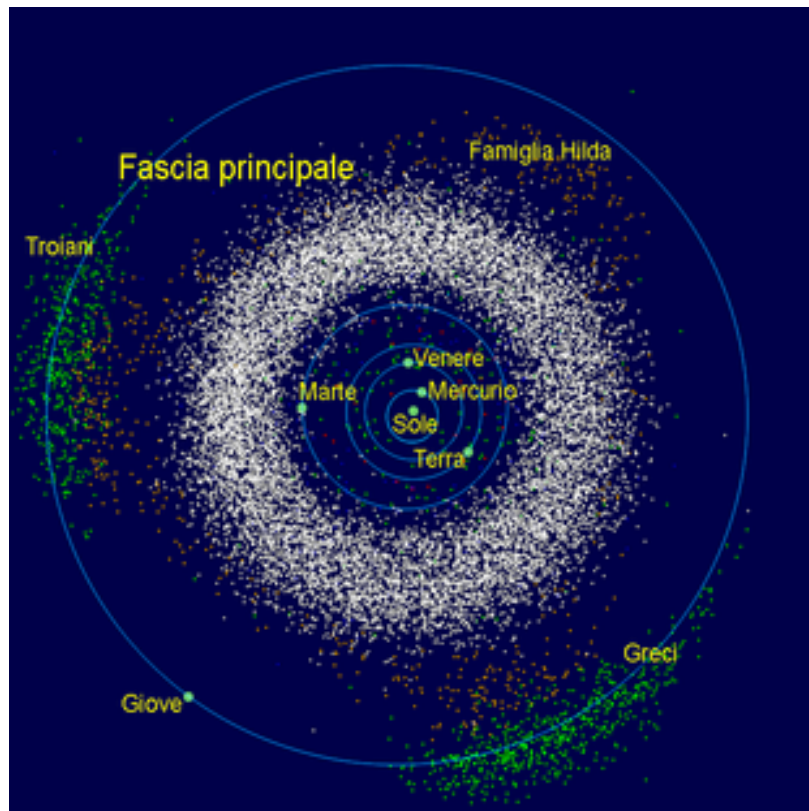
**Tramonto su Marte ripreso dal Cratere Gusev il 19 maggio 2005 da Spirit**

Grazie alla presenza di diversi satelliti, sonde e Rover, è possibile studiare l'astronomia da Marte. Confrontata con le dimensioni dell'universo, la distanza tra la Terra e Marte è veramente esigua, tuttavia si possono notare delle differenze nell'osservazione astronomica del nostro sistema solare come, per esempio, un nuovo punto di vista del nostro pianeta e della Luna, dei satelliti Fobos e Deimos oltre ai fenomeni analoghi a quelli terrestri come le aurore e le meteore. L'8 maggio 2003 alle 13:00 UTC il Mars Global Surveyor fotografò la Terra e la Luna in quel momento molto vicine all'elongazione angolare massima dal Sole e a una distanza di 0,930 au da Marte. Le magnitudini apparenti ricavate risultarono essere  $-2,5$  e  $+0,9$ . Tali magnitudini, tuttavia, sono soggette a notevoli variazioni dovute alla distanza e alla posizione di Terra e Luna. Da Marte inoltre è possibile vedere il transito della Terra davanti al Sole. Il più recente si è verificato l'11 maggio 1984 mentre il prossimo è previsto per il 10 novembre 2084. Fobos appare da Marte con un diametro angolare ampio circa un terzo rispetto a quello della Luna vista dalla Terra mentre Deimos, per le sue dimensioni, appare come una stella. Un osservatore potrebbe vedere il transito dei due satelliti davanti al Sole anche se per Fobos si dovrebbe parlare di un'eclissi parziale della stella, mentre Deimos risulterebbe come un punto sul disco solare. Venere e Giove sarebbero un po' più luminosi della Terra visti da Marte; Venere, nonostante una distanza maggiore e un conseguente minor diametro angolare rispetto al nostro pianeta, ha un'albedo notevolmente più alta causata dalla sua perenne e densa coltre nuvolosa. Seppur privo di dettagli, così come visto dalla Terra, brillerebbe nel cielo marziano con una magnitudine all'incirca di  $-3,2$ . Giove sarebbe leggermente più luminoso che visto dalla Terra, quando si trova in opposizione, per la minor distanza che lo divide da Marte, e brillerebbe di magnitudine  $-2,8$ .



**La Terra e la Luna fotografate dal Mars Global Surveyor l'8 maggio 2003 è visibile il Sud America**

## ***Fascia Principale***



**La fascia principale degli asteroidi in bianco si trova tra le orbite di Marte e Giove.**

La fascia principale degli asteroidi è la regione del sistema solare situata grossomodo tra le orbite di Marte e di Giove. È occupata da numerosi corpi di forma irregolare chiamati asteroidi o pianeti minori. Circa metà della massa della fascia è contenuta nei quattro asteroidi più grandi, Cerere, Vesta, Pallade, e Igea. Gli ultimi tre hanno diametri medi di oltre 400 km, mentre Cerere, l'unico pianeta nano della fascia, ha un diametro medio di circa 950 km. I restanti corpi hanno dimensioni più ridotte, fino a quelle di un granello di polvere. Il materiale asteroidale è distribuito in modo estremamente diradato; numerosi veicoli spaziali senza equipaggio l'hanno attraversato senza incidenti.

### **Generalità**

Tra gli asteroidi più grandi possono verificarsi collisioni che possono formare una famiglia di asteroidi i cui membri hanno caratteristiche orbitali e composizioni simili. Un tempo si riteneva che fossero le collisioni tra gli asteroidi a produrre quella polvere fine che contribuisce maggiormente a formare la luce zodiacale. Nesvorny e Jenniskens 2010 *Astrophysical Journal*, però, hanno attribuito l'85% della polvere della luce zodiacale a frammentazioni di comete della famiglia di Giove piuttosto che a collisioni tra asteroidi. I singoli asteroidi della fascia sono classificati in base al loro spettro. La maggior parte rientra in tre gruppi fondamentali: a base di carbonio tipo C, a base di silicati tipo S, a base di metalli tipo M. Secondo la teoria di Viktor Safronov della cosiddetta ipotesi planetesimale, la fascia degli asteroidi si è formata dalla nebulosa solare primordiale come aggregazione di planetesimi, che a loro volta hanno formato i proto pianeti. Tra Marte e Giove, tuttavia, le perturbazioni gravitazionali causate da Giove avevano dotato i proto pianeti di troppa energia orbitale perché potessero accrescersi in pianeti. Le collisioni divennero troppo violente, così, invece di aggregarsi, i planetesimi e la maggior parte dei proto pianeti si frantumarono. Di conseguenza, il 99,9% della massa iniziale della fascia degli asteroidi andò persa nei primi 100 milioni di anni di vita del Sistema Solare. Alla fine, alcuni frammenti si fecero strada verso il Sistema Solare interno, causando impatti meteoritici con i pianeti interni. Le orbite degli asteroidi

continuano ad essere sensibilmente perturbate ogni volta che il loro periodo di rivoluzione attorno al Sole entra in risonanza orbitale con Giove. Alle distanze orbitali a cui si trovano, quando essi vengono spinti in altre orbite, si forma una lacuna di Kirkwood. In altre regioni del Sistema Solare esistono altri corpi minori, tra cui: i centauri, gli oggetti della fascia di Kuiper e del disco diffuso, le comete della nube di Oort.

## Cenni Storici

In una nota anonima alla sua traduzione di *Contemplazione de la Nature* di Charles Bonnet nel 1766, l'astronomo Johann Daniel Titius di Wittenberg aveva notato un'apparente schema nella disposizione dei pianeti. Iniziando una sequenza numerica da 0, poi 3, 6, 12, 24, 48, ecc, raddoppiando ogni volta, sommando quattro a ciascun numero e dividendo per 10, si otteneva con buona approssimazione i raggi delle orbite dei pianeti allora conosciuti, misurati in unità astronomiche. Questo modello, oggi conosciuto come legge di Titius-Bode, prediceva il semiasse maggiore dei sei pianeti dell'epoca Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno con l'inserimento di un vuoto tra le orbite di Marte e Giove. Nella sua nota, Titius si chiedeva: avrebbe mai il Signore Architetto lasciato quello spazio vuoto? Di certo no. Nel 1768, l'astronomo Johann Elert Bode accennò alle relazioni di Titius nel suo *Anleitung zur Kenntniss des gestirnten Himmels* Istruzioni per la conoscenza del cielo stellato, senza accreditare Titius se non nelle edizioni successive. Divenne nota come legge di Bode. Quando William Herschel scoprì Urano nel 1781, l'orbita del pianeta si adattava quasi perfettamente alla legge, portando gli astronomi a concludere che ci doveva essere un pianeta tra le orbite di Marte e Giove. Nel 1800 l'astronomo barone Franz Xaver von Zach radunò in un club 24 suoi compagni, la Vereinigte Astronomische Gesellschaft Società Astronomica Unita, che egli informalmente chiamò la Società Lilienthal per le sue riunioni a Lilienthal, una cittadina nei pressi di Brema. Determinato a portare ordine nel Sistema Solare, il gruppo divenne noto come Himmelspolizei, Polizia Celeste. Vi figuravano importanti membri come Herschel, l'astronomo reale britannico Nevil Maskelyne, Charles Messier, e Heinrich Olbers. La Società assegnò a ciascun astronomo una regione di 15° dello zodiaco per cercare il pianeta mancante. Solo pochi mesi dopo, qualcuno confermò le loro aspettative. Il 1° gennaio 1801, Giuseppe Piazzi, professore di Astronomia all'Università di Palermo, scoprì un minuscolo oggetto in movimento in un'orbita con raggio previsto dalla legge di Titius-Bode. Egli lo chiamò Cerere, in onore della dea romana del raccolto e patrona della Sicilia. Inizialmente Piazzi credeva che fosse una cometa, ma la mancanza della chioma stava ad indicare che era un pianeta. Quindici mesi dopo, Heinrich Wilhelm Olbers scoprì un secondo oggetto nella stessa regione, Pallade. A differenza degli altri pianeti, questi oggetti avevano una luce puntiforme e, anche con il massimo ingrandimento al telescopio, non mostravano un disco. A parte il loro rapido movimento, apparivano indistinguibili dalle stelle. Di conseguenza, nel 1802 William Herschel propose che venissero classificati in una categoria a parte, chiamata asteroidi, dal greco *asteroeides*, che significa "stella-simile". Al termine di una serie di osservazioni di Cerere e Pallade, egli concluse,

*Né l'appellativo di pianeta, né quello di cometa può essere dato con proprietà di linguaggio a queste due stelle... Assomigliano talmente a piccole stelle che difficilmente possono esserne distinte. Quindi, visto l'aspetto asteroidale, se devo dar loro un nome, le chiamo Asteroidi, riservandomi comunque la libertà di cambiarlo, se me ne dovesse venire in mente un altro che esprime meglio la loro natura.*

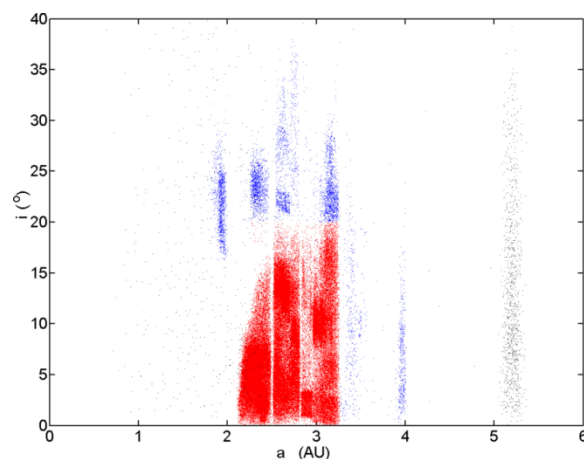
Nonostante il termine coniato da Herschel, per diversi decenni rimase pratica comune riferirsi a questi oggetti come a dei pianeti. Entro il 1807, un'ulteriore indagine rivelò due nuovi oggetti nella regione: Giunone e Vesta. L'incendio di Lilienthal durante le guerre napoleoniche pose termine a questo primo periodo di scoperte, e solo nel 1845 alcuni astronomi scoprirono un altro oggetto, Astrea. Poco dopo nuovi oggetti vennero trovati ad un ritmo accelerato, e annoverarli tra i pianeti divenne sempre più macchinoso. Alla fine, furono eliminati dalla lista dei pianeti, come suggerito da Alexander von Humboldt nei primi anni 1850, e la nomenclatura scelta da William Herschel, asteroidi, a poco a poco entrò nell'uso comune. La scoperta di Nettuno nel 1846 portò al discredito della legge Titius-Bode agli occhi degli scienziati, in quanto la sua orbita non era in alcun punto vicino alle posizioni previste. Non ci sono spiegazioni scientifiche per la legge e la comunità degli astronomi la considera soltanto una coincidenza.



# Origini

## Formazione

Nel 1802, un paio di mesi dopo aver scoperto Pallade, Heinrich Olbers propose a William Herschel l'ipotesi che Cerere e Pallade fossero dei frammenti di un pianeta molto più grande che aveva subito un'esplosione interna o un impatto con una cometa molti milioni di anni prima. Con il passare del tempo, però, questa ipotesi perse credito. L'enorme quantità di energia necessaria per distruggere un pianeta, oltre alla modesta massa globale della fascia, circa il 4% di quella della Luna, non avvalorano l'ipotesi. Inoltre, le differenze chimiche significative tra gli asteroidi sarebbero difficili da spiegare se provenissero dallo stesso pianeta. Oggi, la maggior parte degli scienziati accetta l'idea che, più che frammenti di un pianeta progenitore, gli asteroidi non abbiano mai formato un pianeta. In generale si ritiene che nel Sistema Solare la formazione dei pianeti sia avvenuta attraverso un processo simile a quello dell'ipotesi nebulari: una nube di polvere e gas interstellari che collassa sotto l'influenza della gravità per formare un disco rotante di materiale che poi si condensa ulteriormente per formare il Sole e i pianeti. Durante i primi milioni di anni del Sistema Solare, un processo di accrescimento causò l'aggregazione di piccole particelle, che gradualmente aumentavano di dimensioni. Una volta raggiunta una massa sufficiente, il materiale aggregato poteva attirare altri corpi per attrazione gravitazionale diventando planetesimi. Questo accrescimento gravitazionale portò alla formazione dei pianeti rocciosi e dei giganti gassosi. All'interno della regione che sarebbe poi diventata la fascia degli asteroidi, i planetesimi erano perturbati troppo intensamente dalla gravità di Giove perché potessero formare un pianeta. Continuarono invece a orbitare intorno al Sole, urtandosi di tanto in tanto. In regioni dove la velocità media delle collisioni era troppo elevata, la frantumazione dei planetesimi tendeva a dominare sull'accrescimento, impedendo la formazione di corpi di dimensioni planetarie. Risonanze orbitali si verificavano quando il periodo orbitale di un oggetto della fascia formava una frazione intera con il periodo orbitale di Giove, perturbando l'oggetto in un'orbita diversa; nella regione compresa tra le orbite di Marte e Giove ci sono molte di queste risonanze orbitali. Con la migrazione di Giove verso l'interno del Sistema Solare, queste risonanze avrebbero spazzato la fascia degli asteroidi, eccitando la popolazione dei planetesimi e facendone aumentare le velocità relative. Durante le prime fasi del Sistema Solare gli asteroidi fondevano in una certa misura, permettendo agli elementi al loro interno di essere parzialmente o completamente differenziati per massa. Alcuni dei corpi progenitori potevano anche avere subito periodi di vulcanismo esplosivo con formazione di oceani di magma. Tuttavia, a causa delle dimensioni relativamente ridotte dei corpi, il periodo di fusione era stato necessariamente breve rispetto ai pianeti molto più grandi, ed era avvenuto nelle prime decine di milioni di anni della formazione del Sistema Solare. Uno studio agosto 2007 sui cristalli di zircone di un meteorite antartico, che si ritiene originato da Vesta, fa pensare che quest'ultima, e per estensione il resto della fascia degli asteroidi, si era formata piuttosto rapidamente, nel giro di dieci milioni di anni dall'origine del Sistema Solare.



Distribuzione dell'inclinazione orbitale degli asteroidi della fascia principale



## Evoluzione

Gli asteroidi non sono campioni del Sistema Solare primordiale. Essi hanno subito una notevole evoluzione dal momento della loro formazione, tra cui il riscaldamento interno nelle prime decine di milioni di anni, la fusione della superficie da impatti, l'erosione spaziale da radiazioni, e il bombardamento di micro meteoriti. Anche se alcuni scienziati si riferiscono agli asteroidi come a residui di planetesimi, altri li considerano distinti. Si ritiene che l'attuale fascia degli asteroidi contenga solo una piccola parte della massa di quella primordiale. Simulazioni al computer indicano che la fascia originale poteva essere costituita da una massa equivalente a quella della Terra. Soprattutto a causa delle perturbazioni gravitazionali, la maggior parte del materiale è stato espulso dalla fascia nel giro di un milione di anni circa dalla sua formazione, lasciandosi dietro meno dello 0,1% della massa originaria. Fin dalla loro formazione, le dimensioni degli asteroidi sono rimaste relativamente stabili: non ci sono stati incrementi o decrementi significativi nelle dimensioni tipiche degli asteroidi della fascia principale. La risonanza orbitale 4:1 con Giove, ad un raggio di 2,06 UA, può essere considerata il limite interno della fascia di asteroidi. Le perturbazioni di Giove spingono laggiù i corpi, a vagare in orbite instabili. La maggior parte dei corpi formati all'interno del raggio di questo divario sono stati spazzati da Marte che ha un afelio a 1,67 UA o allontanati dalle sue perturbazioni gravitazionali ai primordi del Sistema Solare. Gli asteroidi del gruppo di Hungaria si trovano più vicino al Sole rispetto ai corpi in risonanza 4:1, ma sono protetti avendo orbite con elevata inclinazione. Quando la fascia di asteroidi si formò, a una distanza di 2,7 UA dal Sole le temperature raggiunsero la frost line, al di sotto del punto di congelamento dell'acqua. Planetesimi formati al di là di questo raggio furono in grado di accumulare ghiaccio. Nel 2006 venne annunciato che era stata scoperta una popolazione di comete all'interno della fascia di asteroidi, al di là della frost line; tali comete potrebbero avere costituito una fonte d'acqua per gli oceani della Terra. Secondo alcune ipotesi, non c'era sufficiente degassamento d'acqua durante il periodo di nascita della Terra perché gli oceani si potessero formare, evento che avrebbe richiesto una sorgente esterna come un bombardamento cometario.

## Caratteristiche

Contrariamente all'immaginario popolare, la fascia degli asteroidi è perlopiù vuota. Gli asteroidi sono distribuiti in un volume così grande che sarebbe poco probabile raggiungerne uno senza un accurato puntamento. Tuttavia, attualmente si conoscono centinaia di migliaia di asteroidi e il numero totale, a seconda del taglio inferiore delle dimensioni, può raggiungere i milioni. Oltre 200 asteroidi hanno un diametro maggiore di 100 km, e un'indagine realizzata tramite lunghezze d'onda infrarosse ha dimostrato che la fascia degli asteroidi ne ha 700.000-1.700.000 con un diametro di 1 km o più. La magnitudine apparente della maggior parte degli asteroidi varia da 11 a 19, con una media di 16 circa. La massa totale della fascia degli asteroidi è stimata essere da  $2,8 \times 10^{21}$  a  $3,2 \times 10^{21}$  kg il 4% della massa della Luna. I quattro oggetti più grandi, Cerere, Vesta, Pallade, e Hygiea rappresentano la metà della massa totale della fascia, mentre Cerere da solo ne rappresenta quasi un terzo.



**Gaspra, il primo asteroide ripreso da una sonda spaziale, Galileo, nel corso del flyby del 1991; i colori non sono reali.**

## Composizione

L'attuale fascia è costituita principalmente da tre categorie di asteroidi: tipo C a base di carbonio, tipo S a base di silicati, tipo M a base di metalli. Gli asteroidi carbonacei, come suggerisce il loro nome, sono ricchi di carbonio e dominano le regioni esterne della fascia. Essi costituiscono oltre il 75% degli asteroidi visibili. Sono di colore più rosso rispetto agli altri e hanno una bassissima albedo. La composizione della loro superficie è simile a quella dei meteoriti di condrite carbonacea. Chimicamente, i loro spettri corrispondono alla composizione primordiale del Sistema Solare, con solo gli elementi più leggeri e gli elementi volatili rimossi. Gli asteroidi ricchi di silicati sono più diffusi verso la regione interna della fascia, entro 2,5 UA dal Sole. Gli spettri delle loro superfici rivelano la presenza di silicati e di alcuni metalli, mentre la presenza di composti carboniosi è modesta. Ciò indica che i materiali sono stati significativamente modificati rispetto alla loro composizione primordiale, probabilmente attraverso la fusione. Hanno un'albedo relativamente alta, e formano circa il 17% dell'intera popolazione di asteroidi. Gli asteroidi ricchi di metalli costituiscono circa il 10% della popolazione totale; i loro spettri assomigliano a quello del ferro-nickel. Si ritiene che alcuni si siano formati dai nuclei metallici di progenitori differenziati che sono stati frantumati in seguito a collisioni. Tuttavia, ci sono anche alcuni composti a base di silicati che possono produrre un aspetto simile. Per esempio, il grande asteroide di tipo M 22 Kalliope non sembra essere composto principalmente di metallo. All'interno della fascia degli asteroidi la distribuzione degli asteroidi di tipo M raggiunge il livello massimo a una distanza di 2,7 UA circa. Un aspetto non ancora chiarito è la relativa rarità degli asteroidi basaltici tipo V. Le teorie della formazione degli asteroidi predicono che gli oggetti delle dimensioni di Vesta o maggiori dovrebbero formare croste e mantelli, composti principalmente di roccia basaltica; più della metà degli asteroidi dovrebbe quindi essere composta di basalto o di olivina. Le osservazioni, tuttavia, indicano che nel 99 per cento dei casi il materiale basaltico non è presente. Fino al 2001, si credeva che molti corpi basaltici scoperti nella fascia degli asteroidi provenissero da Vesta da qui il loro nome di tipo V. Tuttavia, la scoperta dell'asteroide 1459 Magnya rivelò una composizione chimica leggermente diversa dagli altri asteroidi basaltici scoperti fino ad allora, facendo pensare a una diversa origine. Questa ipotesi è stata rafforzata dall'ulteriore scoperta nel 2007 di due asteroidi nella fascia esterna, 7472 Kumakiri e 10537 1991 RY<sub>16</sub>, con diversa composizione basaltica che non poteva aver avuto origine da Vesta. Questi ultimi due sono gli unici asteroidi di tipo V scoperti nella fascia esterna ad oggi. La temperatura della fascia di asteroidi varia con la distanza dal Sole. Per le particelle di polvere all'interno della fascia le temperature variano da 200 K -73 °C a 2,2 AU giù fino a 165 K -108 °C a 3,2 UA. A causa della rotazione, tuttavia, la temperatura superficiale di un asteroide può variare notevolmente, in quanto i lati sono alternativamente esposti all'irraggiamento solare prima e allo sfondo stellare poi.



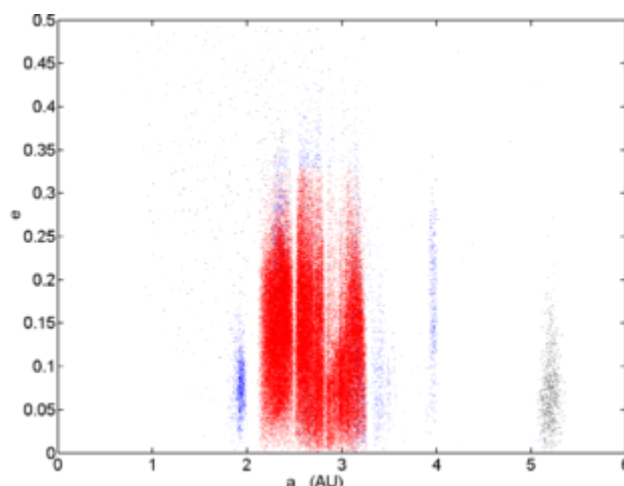
**Frammento del meteorite Allende, una condrite carboniosa caduta in Messico nel 1969**

## Comete della fascia principale

Diversi corpi della fascia esterna mostrano un'attività di tipo cometario. Poiché le loro orbite non possono essere spiegate con la cattura di comete classiche, si pensa che molti degli asteroidi esterni possano essere ghiacciati, con il ghiaccio a volte sottoposto a sublimazione attraverso piccoli urti. Le comete della fascia principale potrebbero essere state una delle fonti principali degli oceani della Terra: le comete classiche hanno un rapporto deuterio-idrogeno troppo basso per esserne considerate la fonte principale.

## Orbite

La maggior parte degli asteroidi della fascia ha un'eccentricità orbitale inferiore a 0,4 e un'inclinazione inferiore a  $30^\circ$ . La loro distribuzione orbitale è massima ad un'eccentricità di 0,07 circa e un'inclinazione inferiore a  $4^\circ$ . Così, mentre un asteroide tipico ha un'orbita quasi circolare e si trova relativamente vicino al piano dell'eclittica, alcuni possono avere orbite molto eccentriche ed estendersi ben al di fuori del piano dell'eclittica. A volte il termine fascia principale è usato per indicare solo la regione centrale, dove si trova la più forte concentrazione di corpi. Questa si trova tra le lacune di Kirkwood 4:1 e 2:1 a 2,06 e 3,27 UA rispettivamente, e ad eccentricità orbitali inferiori a 0,33 circa, con inclinazioni orbitali inferiori a  $20^\circ$  circa. La regione centrale contiene circa il 93,4% di tutti gli asteroidi numerati del Sistema Solare.

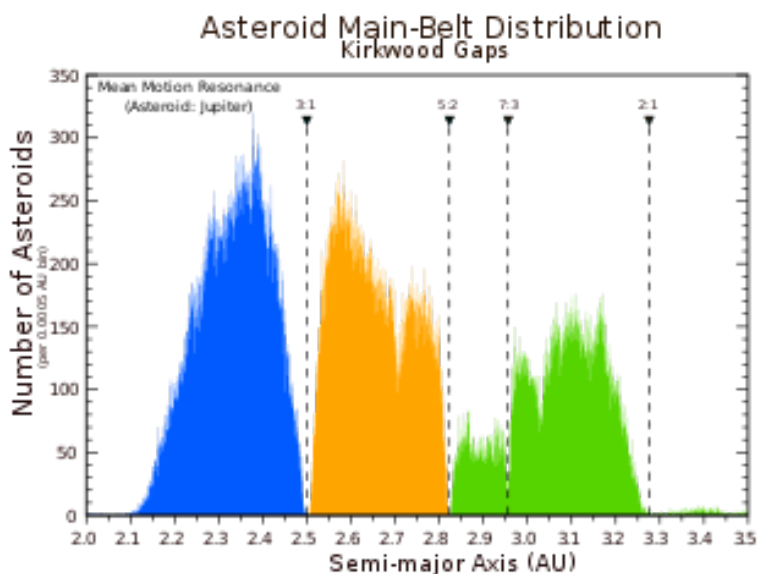


Distribuzione dell'eccentricità degli asteroidi della fascia principale

## Lacune di Kirkwood

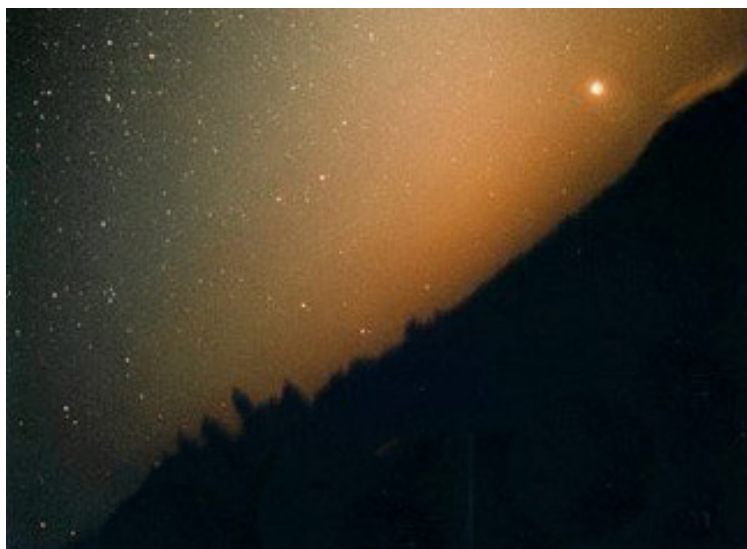
Il semiasse maggiore di un asteroide è usato per descrivere la sua orbita attorno al Sole, e il suo valore determina il periodo orbitale del pianeta minore. Nel 1866 Daniel Kirkwood annunciò la scoperta di lacune nelle distanze delle orbite di questi corpi dal Sole. Esse erano situate in posizioni nelle quali il loro periodo di rivoluzione attorno al Sole era una frazione intera del periodo orbitale di Giove. Kirkwood propose l'ipotesi che le perturbazioni gravitazionali del pianeta causavano l'allontanamento degli asteroidi da queste orbite. Quando il periodo orbitale medio di un asteroide è una frazione intera di quello di Giove, si genera una risonanza di moto medio con il gigante gassoso sufficiente a perturbare gli elementi orbitali dell'asteroide. Gli asteroidi che erano finiti nelle lacune sia originariamente a causa della migrazione dell'orbita di Giove, sia a causa di precedenti perturbazioni o collisioni vengono gradualmente spostati in altre orbite casuali, con un diverso semiasse maggiore. Le lacune non sono visibili in una semplice istantanea delle posizioni degli asteroidi in un certo momento, poiché le orbite degli asteroidi sono ellittiche, e molti asteroidi attraversano ancora i raggi corrispondenti alle lacune. La densità degli asteroidi in queste lacune non si discosta in modo significativo da quella delle regioni vicine. Le principali lacune corrispondono alle seguenti risonanze di moto medio con Giove: 3:1, 5:2, 7:3 e 2:1. Ad esempio, un asteroide nella lacuna di Kirkwood 3:1, per ogni orbita di Giove, orbita tre volte attorno al Sole.

Risonanze più deboli si verificano con altri valori del semiasse maggiore, con un minor numero di asteroidi trovati rispetto alle vicinanze. Ad esempio, una risonanza 8:3 per asteroidi con un semiasse maggiore di 2,71 UA. La popolazione principale o centrale della fascia degli asteroidi è talvolta divisa in tre zone, in base alle lacune più importanti. La prima zona si trova tra le lacune di Kirkwood con risonanza 4:1 2,06 UA e 3:1 2,5 UA. La seconda zona continua a partire dalla fine della prima fino alla lacuna con risonanza 5:2 2,82 UA. La terza zona si estende dal bordo esterno della seconda fino alla lacuna con risonanza 2:1 3,28 UA. La fascia degli asteroidi può anche essere divisa in fascia interna ed esterna, dove la fascia interna è formata da asteroidi orbitanti più vicino a Marte della lacuna 3:1 2,5 UA, e quella esterna formata da quegli asteroidi più vicini all'orbita di Giove. Alcuni autori dividono la fascia interna da quella esterna alla lacuna con risonanza 2:1 3,3 UA, mentre altri suddividono in fascia interna, mediana ed esterna.



## Collisioni

La numerosità della popolazione della fascia principale determina un ambiente molto attivo, dove si verificano spesso collisioni tra asteroidi su scale di tempo astronomiche. Collisioni tra corpi della fascia principale con altri di raggio medio di 10 km si verificano una volta ogni 10 milioni di anni circa. Una collisione può frammentare un asteroide in numerosi pezzi più piccoli portando alla formazione di una nuova famiglia di asteroidi. Per contro, le collisioni che si verificano a velocità relativamente basse possono anche unire due asteroidi. Dopo più di 4 miliardi di anni di tali processi, ora i membri della fascia degli asteroidi assomigliano poco alla popolazione originaria. Oltre agli asteroidi, la fascia principale contiene anche bande di polvere composte da particelle di raggio fino a qualche centinaio di micrometri. Questo fine materiale viene prodotto, almeno in parte, da collisioni tra asteroidi e da impatti di micrometeoriti sugli asteroidi. A causa dell'effetto Poynting-Robertson, la pressione della radiazione solare fa girare lentamente a spirale questa polvere all'interno verso il Sole. La combinazione di questa fine polvere asteroidale, così come il materiale cometario espulso, produce la luce zodiacale. Questo debole bagliore aurorale può essere visto di notte estendersi dalla direzione del Sole lungo il piano dell'eclittica. Le particelle che producono la luce zodiacale visibile hanno un raggio medio di 40 micron circa. La vita media di tali particelle è di 700.000 anni circa; pertanto, per conservare le bande di polvere, devono essere costantemente prodotte nuove particelle all'interno della fascia degli asteroidi.



**La luce zodiacale, creata in parte dalle polveri delle collisioni nella fascia degli asteroidi.**

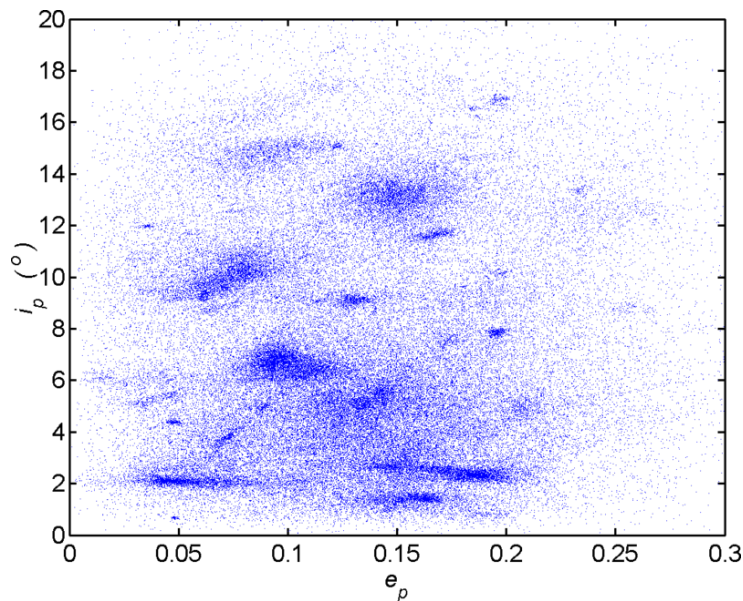
## **Meteoriti**

Alcuni dei detriti prodotti dalle collisioni possono formare dei meteoroidi che entrano nell'atmosfera della Terra. Dei 50.000 meteoriti trovati sulla Terra fino ad oggi, si ritiene che il 99,8 per cento abbia avuto origine nella fascia degli asteroidi. Uno studio del settembre 2007 ha ipotizzato che la collisione tra l'asteroide 298 Baptistina e un corpo di grandi dimensioni fece pervenire nel Sistema solare interno un certo numero di frammenti. Si ritiene che gli impatti di questi frammenti abbiano creato sia il cratere Tycho sulla Luna che il cratere di Chicxulub in Messico, il relitto dell'enorme impatto che ha provocato l'estinzione dei dinosauri 65 milioni di anni fa.

## **Famiglie e Gruppi**

Nel 1918, l'astronomo giapponese Kiyotsugu Hirayama notò che le orbite di alcuni asteroidi avevano parametri simili; si pensò così di classificarli in famiglie e gruppi. Circa un terzo degli asteroidi della fascia principale sono membri di una famiglia di asteroidi. Questi condividono elementi orbitali simili, come il semiasse maggiore, l'eccentricità e l'inclinazione orbitale, così come simili sono le caratteristiche spettrali, ognuna delle quali indica un'origine comune nella frammentazione di un corpo più grande. Diagrammi di questi elementi mostrano concentrazioni di asteroidi che indicano la presenza di una famiglia. Ci sono circa 20-30 associazioni che sono quasi certamente famiglie di asteroidi. Queste possono essere confermate quando i loro membri mostrano caratteristiche spettrali comuni. Le più piccole associazioni di asteroidi sono chiamate gruppi o cluster. Alcune delle famiglie più importanti della fascia degli asteroidi in ordine crescente di semiasse maggiore sono: Flora, Eunomia, Coronide, Eos, e Temi. La famiglia Flora, una delle più grandi con più di 800 membri, potrebbe essersi formata da una collisione meno di un miliardo di anni fa. Il più grande asteroide ad essere un vero membro di una famiglia al contrario dell'intruso Cerere con la Famiglia Gefion è 4 Vesta. Si pensa che la Famiglia Vesta sia stata formata da un impatto con relativa formazione di un cratere su Vesta. Anche i meteoriti HED potrebbero essere il risultato di questa collisione. All'interno della fascia degli asteroidi sono state scoperte tre bande di polvere con inclinazioni orbitali simili a quelle delle famiglie Eos, Koronis e Themis, per cui potrebbero forse essere associate a tali gruppi.





**Diagramma inclinazione orbitale( $i_p$ ) - eccentricità( $e_p$ ) degli asteroidi numerati della fascia principale; mostra chiaramente dei raggruppamenti che rappresentano le famiglie di asteroidi.**

## Periferia

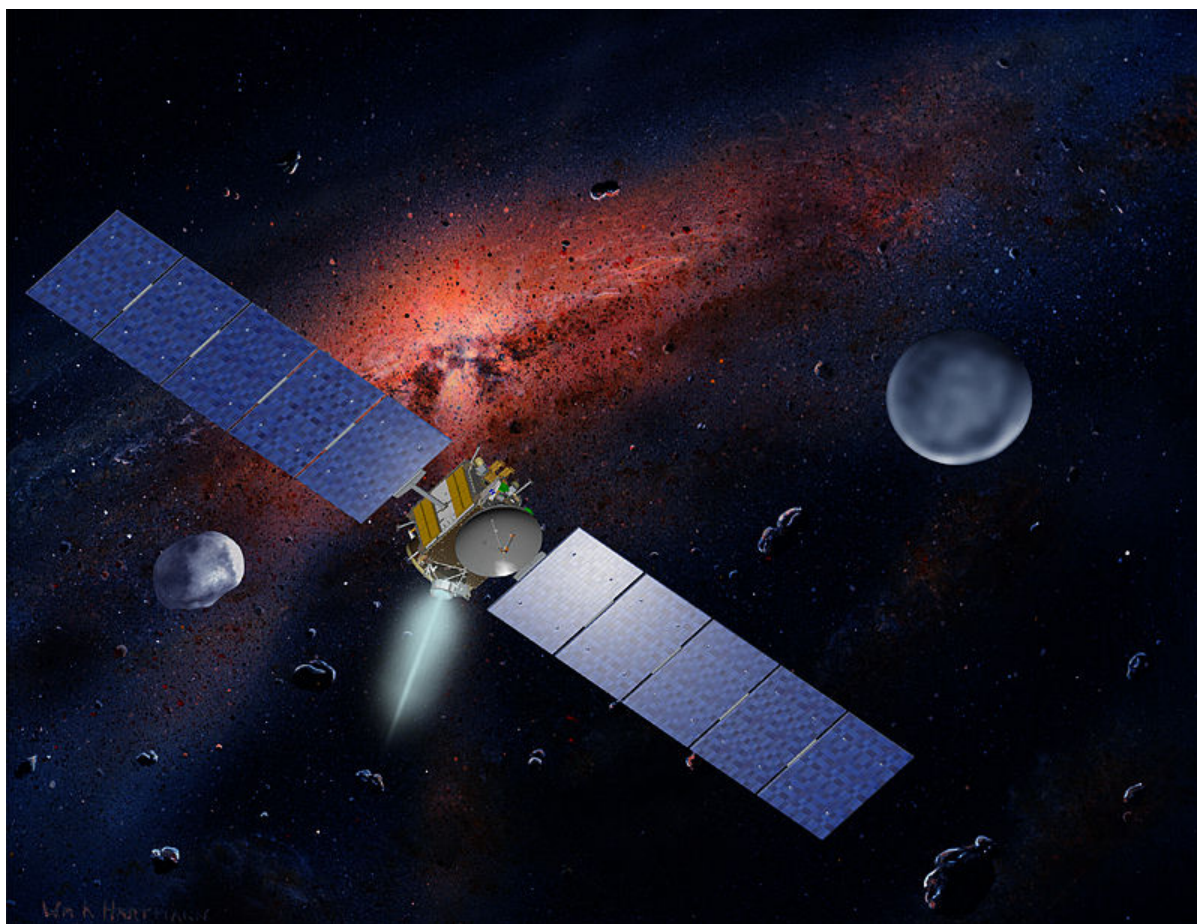
Vicino al bordo interno della fascia a una distanza da 1,78 a 2,0 UA, con un semiasse maggiore medio di 1,9 UA vi è il gruppo di Hungaria. Prende il nome dal membro principale, 434 Hungaria, e contiene almeno 52 asteroidi con orbite fortemente inclinate. Alcuni membri appartengono alla categoria degli asteroidi che intersecano l'orbita di Marte, le cui perturbazioni gravitazionali sono probabilmente un fattore che riduce la popolazione totale di questo gruppo. Un altro gruppo ad alta inclinazione orbitale nella parte interna della fascia degli asteroidi è la famiglia Phocaea. Questi sono composti principalmente da asteroidi di tipo S, mentre la vicina famiglia Hungaria comprende alcuni asteroidi di tipo E. La famiglia Phocaea orbita tra 2,25 e 2,5 UA dal Sole. Vicino al bordo esterno della fascia vi è il gruppo di Cibeles, in orbita tra 3,3 e 3,5 UA, e con una risonanza orbitale 7:4 con Giove. La famiglia Hilda orbita tra 3,5 e 4,2 UA, in orbite relativamente circolari e con una risonanza orbitale stabile 3:2 con Giove. Ci sono pochi asteroidi oltre 4,2 UA, fino all'orbita di Giove. Qui si trovano le due famiglie di asteroidi troiani che, almeno tra oggetti di dimensioni superiori a 1 km, sono numerosi all'incirca quanto gli asteroidi della fascia principale.

## Nuove Famiglie

Alcune famiglie di asteroidi si sono formate di recente, in termini astronomici. La Famiglia Karin apparentemente formata circa 5,7 milioni di anni fa da una collisione con un asteroide progenitore di raggio di 33 km. La famiglia Veritas si formò circa 8,3 milioni di anni fa, e la prova di questa affermazione è costituita da polvere interplanetaria recuperata da sedimenti marini. Più di recente, il gruppo Datura sembra essersi formato circa 450.000 anni fa da una collisione con un asteroide della fascia principale. La stima dell'età si basa sull'ipotesi che, a quel tempo, le orbite dei suoi membri fossero quelle attuali. Questo gruppo e altre formazioni, come ad esempio il gruppo Iannini circa 1,5 milioni di anni fa, potrebbero essere stati una fonte di materiale per la polvere zodiacale.

## Esplorazioni

Il primo veicolo spaziale ad attraversare la fascia degli asteroidi fu Pioneer 10, che entrò nella regione il 16 luglio 1972. A quel tempo si temeva che i detriti della fascia potessero rappresentare un rischio per la navicella, ma da allora è stata attraversata da 11 veicoli partiti dalla Terra senza alcun incidente. Pioneer 11, Voyager 1 e 2 e Ulysses passarono attraverso la fascia senza riprendere alcun'immagine. Galileo riprese immagini dell'asteroide 951 Gaspra nel 1991 e di 243 Ida nel 1993, NEAR, di 253 Mathilde nel 1997, Cassini, di 2685 Masursky nel 2000, Stardust, di 5535 Annefrank nel 2002, New Horizons, di 132524 APL nel 2006, Rosetta, di 2867 Šteins nel 2008. A causa della bassa densità di materiale all'interno della fascia, oggi si stima che, per una sonda, le probabilità di impatto con un asteroide sono meno di una su un miliardo. La maggior parte delle immagini degli asteroidi della fascia provengono da brevi flyby di sonde dirette verso altri obiettivi. Solo le missioni Dawn, NEAR e Hayabusa hanno studiato le orbite e le superfici degli asteroidi per un periodo prolungato. Dawn ha esplorato Vesta dal luglio 2011 al settembre 2012, e per poi osservare Cerere dal 2015 fino a fine missione. Una possibile visita di Pallade della sonda, a missione conclusa, fu pensata marginalmente, ma risultò irrealizzabile per la forte differenza di orbita, mentre la proposta di visitare un altro asteroide fu rifiutata.



**Rappresentazione artistica del veicolo spaziale Dawn con Vesta a sinistra e Cerere a destra.**

## **Quinto Pianeta Giove**



**Giove fotografato dal telescopio spaziale Hubble nel 2014**

Giove dal latino *Iovem*, accusativo di *Juppiter* è il quinto pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole e il più grande di tutto il sistema planetario: la sua massa corrisponde a due volte e mezzo la somma di quelle di tutti gli altri pianeti messi insieme. È classificato, al pari di Saturno, Urano e Nettuno, come gigante gassoso. Giove ha una composizione simile a quella del Sole: infatti è costituito principalmente da idrogeno ed elio con piccole quantità di altri gas composti, quali ammoniaca, metano ed acqua. Si ritiene che il pianeta possieda una struttura pluristratificata, con un nucleo solido, presumibilmente di natura rocciosa e costituito da carbonio e silicati di ferro, sopra il quale gravano un mantello di idrogeno metallico ed una vasta copertura atmosferica che esercitano su di esso altissime pressioni. L'atmosfera esterna è caratterizzata da numerose bande e zone di tonalità variabili dal color crema al marrone, costellate da formazioni cicloniche ed anticicloniche, tra le quali spicca la Grande Macchia Rossa. La rapida rotazione del pianeta gli conferisce l'aspetto di uno sferoide schiacciato ai poli e genera un intenso campo magnetico che dà origine ad un'estesa magnetosfera; inoltre, a causa del meccanismo di Kelvin-Helmholtz, Giove come tutti gli altri giganti gassosi emette una quantità di energia superiore a quella che riceve dal Sole. A causa delle sue dimensioni e della composizione simile a quella solare, Giove è stato considerato per lungo tempo una stella fallita in realtà solamente se avesse avuto l'opportunità di accrescere la propria massa sino a 75-80 volte quella attuale il suo nucleo avrebbe ospitato le condizioni di temperatura e pressione favorevoli all'innesco delle reazioni di fusione dell'idrogeno in elio, il che avrebbe reso il sistema solare un sistema stellare binario. L'intenso campo gravitazionale di Giove influenza il sistema solare nella sua struttura perturbando le orbite degli altri pianeti e lo ripulisce in parte dai detriti che possono colpire i pianeti più interni. Intorno a Giove orbitano numerosi satelliti e un sistema di anelli scarsamente visibili; l'azione combinata dei campi gravitazionali di Giove e del Sole, inoltre, stabilizza le orbite di due gruppi di asteroidi troiani. Il pianeta, conosciuto sin dall'antichità, ha rivestito un ruolo preponderante nel credo religioso di numerose culture, tra cui i Babilonesi, i Greci e i Romani, che lo hanno identificato con il sovrano degli dei. Il simbolo astronomico del pianeta ♃ è una rappresentazione stilizzata del fulmine, principale attributo di quella divinità.



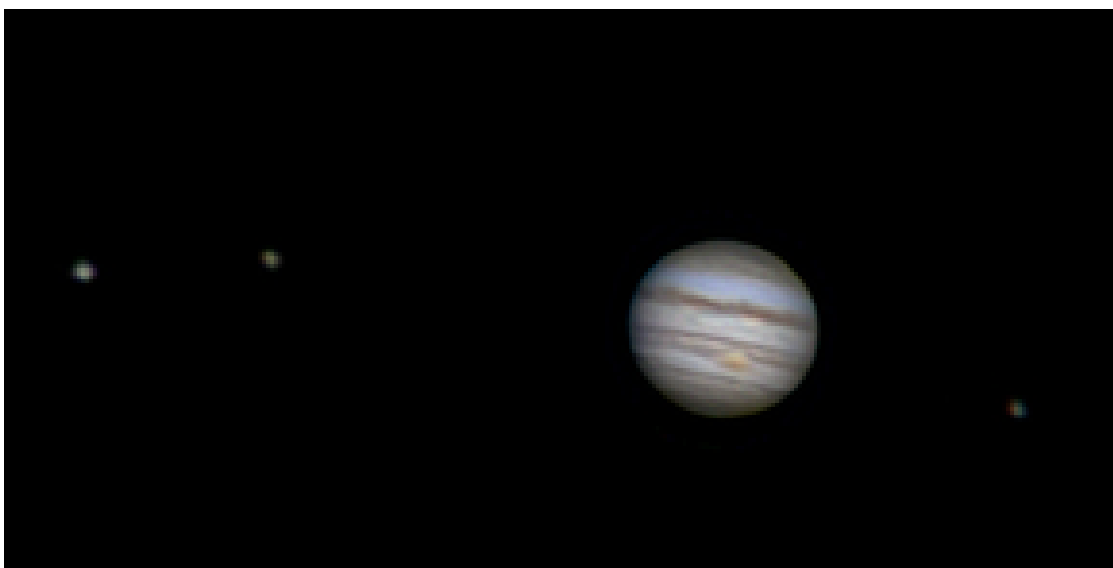
<b>Parametri Orbitali, Dati Fisici e Osservativi</b>					
<b>Orbitali</b>		<b>Fisici</b>		<b>Osservativi</b>	
<i>Semiasse</i>	5,20 UA	<i>Diamet. equat.</i>	142.984 km	<i>Magn. app. min</i>	-1,61
<i>Perielio</i>	4,95 UA	<i>Superficie</i>	6,14x10 <sup>10</sup> km <sup>2</sup>	<i>Magn. app med</i>	-2,60
<i>Afelio</i>	5,46 UA	<i>Period. Rotaz.</i>	9h 55min	<i>Magn. app max</i>	-2,81
<i>CRF orbitale</i>	32,67 UA	<i>Period. Orbit.</i>	11.86anni		
<i>Inclinazione</i>	1,3°	<i>Incl su Eclittica</i>	1,3°		
<i>Satelliti</i>	79	<i>Temp. max</i>	-81 °C		
<i>Anelli</i>	4	<i>Temp. med.</i>	-121 °C		
		<i>Temp. min.</i>	-163 °C		
		<i>Press. Atmosf</i>	20-200 kPa		

**UA = distanza Terra/Sole media pari a km149.597.870.**

## Osservazioni

Giove appare ad occhio nudo come un astro biancastro molto brillante a causa della sua elevata albedo. È il quarto oggetto più brillante nel cielo, dopo il Sole, la Luna e Venere con cui, quando quest'ultimo risulta inosservabile, si spartisce il ruolo di stella del mattino o stella della sera. La sua magnitudine apparente varia, a seconda della posizione durante il suo moto di rivoluzione, da -1,6 a -2,8, mentre il suo diametro apparente varia da 29,8 a 50,1 arco. Il periodo sinodico del pianeta è di 398,88 giorni, al termine dei quali il corpo celeste inizia una fase di moto retrogrado apparente, in cui sembra spostarsi all'indietro nel cielo notturno rispetto allo sfondo delle stelle fisse eseguendo una traiettoria sigmoide. Giove, nei 12 anni circa della propria rivoluzione, attraversa tutte le costellazioni dello zodiaco. Il pianeta è interessante da un punto di vista osservativo in quanto già con piccoli strumenti è possibile apprezzarne alcuni caratteristici dettagli superficiali. I periodi più propizi per osservare il pianeta corrispondono alle opposizioni e in particolare alle grandi opposizioni "che si verificano ogni qual volta Giove transita al perielio. Queste circostanze, in cui l'astro raggiunge le dimensioni apparenti massime, consentono all'osservatore amatoriale, munito delle adeguate attrezzature, di scorgere più facilmente gran parte delle caratteristiche del pianeta. Un binocolo 10x50 o un piccolo telescopio rifrattore consentono già di osservare attorno al pianeta quattro piccoli punti luminosi, disposti lungo il prolungamento dell'equatore del pianeta: si tratta dei satelliti medicei. Poiché essi orbitano abbastanza velocemente intorno al pianeta, è possibile notarne i movimenti già tra una notte e l'altra: il più interno, Io, arriva a compiere tra una notte e la successiva quasi un'orbita completa. Un telescopio da 60 mm permette già di osservare le caratteristiche bande nuvolose e, qualora le condizioni atmosferiche siano perfette, anche la caratteristica più nota del pianeta, la Grande Macchia Rossa che però è maggiormente visibile con un telescopio di 25 cm di apertura che consente di osservare meglio le nubi e le formazioni più fini del pianeta. Il pianeta risulta osservabile non solo nel visibile, ma anche ad altre lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, principalmente nell'infrarosso. L'osservazione a più lunghezze d'onda si rivela utile soprattutto nell'analisi della struttura e della composizione dell'atmosfera e nello studio delle componenti del sistema di Giove.





**Giove fotografato da un telescopio amatoriale. Si notano tre dei quattro satelliti medicei: a destra Io, a sinistra Europa più interno e Ganimede. Si nota anche la sua caratteristica più peculiare: la Grande Macchia Rossa.**

## **Storia delle Osservazioni**

Una delle prime civiltà a studiare i moti di Giove e degli altri pianeti visibili ad occhio nudo Mercurio, Venere, Marte e Saturno fu quella assiro-babilonese. Gli astronomi di corte dei re babilonesi riuscirono a determinare con precisione il periodo sinodico del pianeta; inoltre, si servirono del suo moto attraverso la sfera celeste per delineare le costellazioni zodiacali. La scoperta negli archivi reali di Ninive di tavolette recanti precisi resoconti di osservazioni astronomiche e il frequente rinvenimento di parti di strumentazioni a probabile destinazione astronomica, come lenti di cristallo di rocca e tubi d'oro datati al I millennio a.C., indussero alcuni archeo astronomi a ipotizzare che la civiltà assira fosse già in possesso di un prototipo di cannocchiale, con il quale si ritiene sia stato possibile osservare anche Giove. Anche i cinesi, noti per la raffinatezza delle loro tecniche astronomiche, riuscirono a ricavare in maniera precisa i periodi sinodici ed orbitali dei pianeti visibili ad occhio nudo. Nel 1980 lo storico cinese Xi Zezong ha annunciato che Gan De, astronomo contemporaneo di Shi Shen, sarebbe riuscito ad osservare almeno uno dei satelliti di Giove già nel 362 a.C. a occhio nudo, presumibilmente Ganimede, schermando la vista del pianeta con un albero o qualcosa di analogo. Bisognerà però attendere il XVII secolo prima che l'esistenza dei satelliti di Giove sia appurata da Galileo Galilei, che, nel 1610, scoprì i quattro satelliti medicei: Io, Europa, Ganimede e Callisto; fu però Simon Marius, che si attribuì la paternità della scoperta dei satelliti, alimentando in questo modo una fiera diatriba con Galileo, a conferire nel 1614 i nomi mitologici attualmente in uso a ciascuno di essi. Nell'autunno del 1639 l'ottico napoletano Francesco Fontana, diffusore del telescopio a oculare convergente kepleriano, testando un telescopio di 22 palmi di sua produzione scoprì le caratteristiche bande dell'atmosfera del pianeta. Negli anni sessanta del XVII secolo l'astronomo Gian Domenico Cassini, scoprì la presenza di macchie sulla superficie di Giove e che il pianeta stesso ha la forma di uno sferoide oblato. L'astronomo riuscì poi a determinarne il periodo di rotazione, e nel 1690 scoprì che l'atmosfera è soggetta a una rotazione differenziale; egli è inoltre accreditato come lo scopritore, assieme, ma indipendentemente, a Robert Hooke, della Grande Macchia Rossa. Lo stesso Cassini, assieme a Giovanni Alfonso Borelli, stese precise relazioni sul movimento dei quattro satelliti galileiani, formulando dei modelli matematici che consentissero di prevederne le posizioni. Tuttavia nel trentennio 1670-1700, si osservò che, quando Giove si trova in un punto dell'orbita prossimo alla congiunzione col Sole, si registra nel transito dei satelliti un ritardo di circa 17 minuti rispetto al previsto.

L'astronomo danese Ole Rømer ipotizzò che la visione di Giove non fosse istantanea conclusione che Cassini aveva precedentemente respinto e che dunque la luce avesse una velocità finita indicata con  $c$ . Dopo due secoli privi di significative scoperte, il farmacista Heinrich Schwabe disegnò la prima carta completa di Giove, comprendente anche la Grande Macchia Rossa, e la pubblicò nel 1831. Le osservazioni della tempesta hanno permesso di registrare dei momenti in cui essa appariva più debole come tra il 1665 e il 1708, nel 1883 ed all'inizio del XX secolo, ed altri in cui appariva rinforzata, tanto da risultare molto ben evidente all'osservazione telescopica come nel 1878. Nel 1892 Edward Emerson Barnard scoprì, grazie al telescopio rifrattore da 910 mm dell'Osservatorio Lick, la presenza attorno al pianeta di un quinto satellite, battezzato Amaltea. Nel 1932 Rupert Wildt identificò, analizzando lo spettro del pianeta, delle bande di assorbimento proprie dell'ammoniaca e del metano. Sei anni dopo furono osservate, a sud della Grande Macchia Rossa, tre tempeste anticicloniche che apparivano come dei particolari ovali biancastri. Per diversi decenni le tre tempeste sono rimaste delle entità distinte, non riuscendo mai a fondersi pur avvicinandosi periodicamente; tuttavia, nel 1998, due di questi ovali si sono fusi, assorbendo infine anche il terzo nel 2000 e dando origine a quella tempesta che oggi è nota come Ovale BA. Nel 1955 Bernard Burke e Kenneth Franklin individuarono dei lampi radio provenienti da Giove alla frequenza di 22,2 MHz; si trattava della prima prova dell'esistenza della magnetosfera gioviana. La conferma giunse quattro anni dopo, quando Frank Drake ed Hein Hvatum scoprirono le emissioni radio decimetriche. Nel periodo compreso tra il 16 e il 22 luglio 1994 oltre 20 frammenti provenienti dalla cometa Shoemaker-Levy 9 collisero con Giove in corrispondenza del suo emisfero australe; fu la prima osservazione diretta della collisione tra due oggetti del sistema solare. L'impatto permise di ottenere importanti dati sulla composizione dell'atmosfera gioviana.



**Ritratto di Galileo Galilei dipinto nel 1636 da Justus Sustermans.**

### ***Missioni spaziali***

Sin dal 1973 numerose sonde automatiche hanno visitato il pianeta, sia come obiettivo di studio, sia come tappa intermedia, per sfruttarne il potente effetto fionda per ridurre la durata del volo verso le regioni più esterne del sistema solare. I viaggi interplanetari richiedono un grande dispendio energetico, impiegato per provocare una netta variazione della velocità della sonda nota come  $\Delta v$ . Il raggiungimento di Giove dalla Terra richiede un  $\Delta v$  di 9,2 km/s, confrontabile con il  $\Delta v$  di 9,7 km/s necessario per raggiungere l'orbita terrestre bassa. L'effetto fionda consente di modificare la velocità del veicolo senza consumare combustibile.

### **Missioni con sorvolo ravvicinato *fly-by***

Dal 1973 diverse sonde hanno compiuto sorvoli ravvicinati *fly-by* del pianeta. La prima fu la Pioneer 10, che eseguì un *fly-by* di Giove nel dicembre del 1973, seguita dalla Pioneer 11 un anno più tardi. Le due sonde ottennero le prime immagini ravvicinate dell'atmosfera, delle nubi gioviane e di alcuni suoi satelliti, la prima misura precisa del suo campo magnetico; scoprirono inoltre che la quantità di radiazioni in prossimità del pianeta era assai superiore a quella attesa. Le traiettorie delle sonde furono utilizzate per raffinare la stima della massa del sistema gioviano, mentre l'occultazione delle sonde dietro il disco. Sei anni dopo fu la volta delle missioni Voyager 1 e 2. Le due sonde migliorarono enormemente la comprensione di alcune dinamiche dei satelliti galileiani e dell'atmosfera di Giove, tra cui la conferma della natura anticiclonica della Grande Macchia Rossa e l'individuazione di lampi e formazioni temporalesche; le sonde permisero inoltre di scoprire gli anelli di Giove e otto satelliti naturali, che si andarono ad aggiungere ai cinque già noti. Le Voyager rintracciarono la presenza di un toroide di plasma ed atomi ionizzati in corrispondenza dell'orbita di Io, sulla cui superficie furono scoperti numerosi edifici vulcanici, alcuni dei quali nell'atto di eruttare. Nel febbraio del 1992 raggiunse Giove la sonda solare Ulysses, che sorvolò il pianeta ad una distanza minima di 450 000 km 6,3 raggi gioviani. Il *fly-by* fu programmato per raggiungere un'orbita polare attorno al Sole, ma fu sfruttato per condurre studi sulla magnetosfera di Giove. La sonda non aveva telecamere e non fu ripresa alcuna immagine. del pianeta migliorò le stime del valore del diametro equatoriale e dello schiacciamento polare. Nel 2000 la sonda Cassini, durante la sua rotta verso Saturno, sorvolò Giove e fornì alcune delle immagini più dettagliate mai scattate del pianeta. Sette anni dopo, Giove fu raggiunto dalla sonda New Horizons, diretta verso Plutone e la fascia di Kuiper. Nell'attraversamento del sistema di Giove, la sonda misurò l'energia del plasma emesso dai vulcani di Io e studiò brevemente ma in dettaglio i quattro satelliti medicei, conducendo anche indagini a distanza dei satelliti più esterni Imalia ed Elara.



**Un'immagine del pianeta ripresa dalla Pioneer 10 il 1° dicembre 1973 dalla distanza di 2.557.000 km NASA**

Elenco missioni Fly-By		
Sonda	Data Max avvicinamento	Distanza max
Pioneer 10	3 Dicembre 1973	200.000 km
Pioneer 11	4 Dicembre 1974	34.000 km
Voyager 1	5 marzo 1979	349.000 km
Voyager 2	9 luglio 1979	722.000 km
Ulysses	8 febbraio 1992	450.000 km
Ulysses	4 febbraio 2000	120.000.000 km
Cassini	30 dicembre 2000	10.000.000 km
New Horizons	28 febbraio 2007	2.304.535 km

## Missione Galileo

La prima sonda progettata per lo studio del pianeta è stata la Galileo, entrata in orbita attorno a Giove il 7 dicembre del 1995 e rimastavi oltre 7 anni, compiendo sorvoli ravvicinati di tutti i satelliti galileiani e di Amaltea. Nel 1994, mentre giungeva verso il pianeta gigante, la sonda ha registrato l'impatto della cometa Shoemaker-Levy 9. Nel luglio del 1995 è stato sganciato dalla sonda madre un piccolo modulo-sonda, entrato nell'atmosfera del pianeta il 7 dicembre; il modulo ha raccolto dati per 75 minuti, penetrando per 159 km prima di essere distrutto dalle alte pressioni e temperature dell'atmosfera inferiore circa 28 atmosfere –  $\sim 2,8 \times 10^6$  Pa, e  $185^\circ\text{C}$   $458\text{ K}$ . La stessa sorte è toccata alla sonda madre quando, il 21 settembre 2003, fu deliberatamente spinta verso il pianeta a una velocità di oltre 50 km/s, per evitare qualsiasi possibilità che in futuro potesse collidere con il satellite Europa e contaminarlo.



Rappresentazione artistica della NASA che mostra la sonda Galileo nel sistema di Giove.

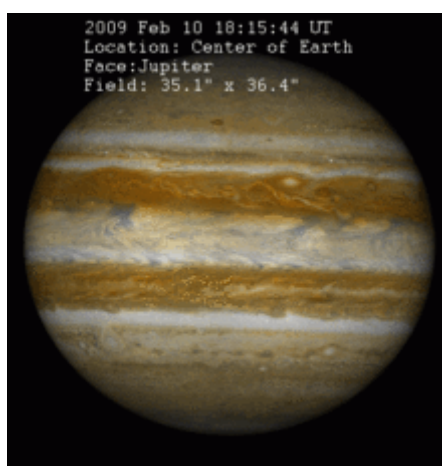
## Missione Juno

La NASA ha progettato una sonda per lo studio di Giove da un'orbita polare; battezzata Juno, fu lanciata nell'agosto 2011 ed è arrivata nei pressi del pianeta a luglio 2016. Juno ha scoperto 8 vortici uguali al polo nord disposti ai vertici di un ottagono l'ottagono di Giove, con al centro un nono vortice, e 5 vortici uguali al polo sud disposti come i vertici di un pentagono con al centro un sesto vortice. In un passaggio successivo nel novembre 2019, la scoperta di un nuovo vortice ha mostrato una nuova forma della disposizione degli stessi, che diversamente da quello precedente che era un pentagono ha assunto la forma di un esagono, similmente all'esagono di Saturno.



## Parametri Orbitali e Rotazione

Giove orbita ad una distanza media dal Sole di 778,33 milioni di chilometri 5,202 UA e completa la sua rivoluzione attorno alla stella ogni 11,86 anni; questo periodo corrisponde esattamente ai due quinti del periodo orbitale di Saturno, con cui si trova dunque in una risonanza di 5:2. L'orbita di Giove è inclinata di  $1,31^\circ$  rispetto al piano dell'eclittica; per via della sua eccentricità pari a 0,048, la distanza tra il pianeta e il Sole varia di circa 75 milioni di chilometri tra i due apsi, il perielio 740.742.598 km e l'afelio 816.081.455 km. La velocità orbitale media di Giove è di 13 056 m/s 47.001 km/h, mentre la circonferenza orbitale misura complessivamente 4.774.000.000 km. L'inclinazione dell'asse di rotazione è relativamente piccola, solamente  $3,13^\circ$ , e precede ogni 12.000 anni; di conseguenza, il pianeta non sperimenta significative variazioni stagionali, contrariamente a quanto accade sulla Terra e su Marte. Poiché Giove non è un corpo solido, la sua atmosfera superiore è soggetta ad una rotazione differenziale: infatti, la rotazione delle regioni polari del pianeta è più lunga di circa 5 minuti rispetto a quella all'equatore. Sono stati adottati tre sistemi di riferimento per monitorare la rotazione delle strutture atmosferiche permanenti. Il sistema I si applica alle latitudini comprese tra  $10^\circ$  N e  $10^\circ$  S; il suo periodo di rotazione è il più breve del pianeta, pari a 9 h 50 min 30,0 s. Il sistema II si applica a tutte le latitudini a nord e a sud di quelle del sistema I; il suo periodo è pari a 9 h 55 min 40,6 s. Il sistema III fu originariamente definito tramite osservazioni radio e corrisponde alla rotazione della magnetosfera del pianeta; la sua durata è presa come il periodo di rotazione ufficiale del pianeta 9 h 55 min 29,685 s; Giove quindi presenta la rotazione più rapida di tutti i pianeti del sistema solare. L'alta velocità di rotazione è all'origine di un marcato rigonfiamento equatoriale, facilmente visibile anche tramite un telescopio amatoriale; questo rigonfiamento è causato dall'alta accelerazione centripeta all'equatore, pari a circa  $1,67 \text{ m/s}^2$ , che, combinata con l'accelerazione di gravità media del pianeta  $24,79 \text{ m/s}^2$ , dà un'accelerazione risultante pari a  $23,12 \text{ m/s}^2$ : di conseguenza, un ipotetico oggetto posto all'equatore del pianeta peserebbe meno rispetto ad un corpo di identica massa posto alle medie latitudini. Queste caratteristiche conferiscono quindi al pianeta l'aspetto di uno sferoide oblatto, il cui diametro equatoriale è maggiore rispetto al diametro polare: il diametro misurato all'equatore supera infatti di 9.275 km il diametro misurato ai poli.



**La rotazione di Giove; lo sulla superficie del pianeta 10 febbraio 2009.**

## Formazione

Dopo la formazione del Sole, avvenuta circa 4,6 miliardi di anni fa, il materiale residuo dal processo, ricco in polveri metalliche, si è disposto in un disco circumstellare da cui hanno avuto origine dapprima i planetesimi, quindi, per aggregazione di questi ultimi, i proto pianeti. La formazione di Giove ha avuto inizio a partire dalla coalescenza di planetesimi di natura ghiacciata poco al di là della cosiddetta frost line, una linea oltre la quale si addensarono i planetesimi costituiti in prevalenza da materiale a basso punto di fusione; la frost line ha agito da barriera, provocando un rapido accumulo di materia a circa 5 au dal Sole. L'embrione planetario così formato, di massa pari ad almeno 10 masse terrestri  $M_{\oplus}$ , ha iniziato ad accrescere materia gassosa a partire dall'idrogeno e dall'elio avanzati dalla formazione del Sole e confinati nelle regioni periferiche del sistema dal vento della stella neoformata. Il tasso di accrescimento dei planetesimi, inizialmente più intenso di quello dei gas, proseguì sino a quando il numero di planetesimi nella fascia orbitale del proto-Giove non andò incontro a una netta diminuzione; a questo punto il tasso di accrescimento dei planetesimi e quello dei gas dapprima raggiunsero valori simili, quindi quest'ultimo iniziò a predominare sul primo, favorito dalla rapida contrazione dell'involucro gassoso in accrescimento e dalla rapida espansione del confine esterno del sistema, proporzionale all'incremento della massa del pianeta. Il proto-Giove cresce a ritmo serrato sottraendo idrogeno dalla nebulosa solare e raggiungendo in circa mille anni le 150  $M_{\oplus}$  e, dopo qualche migliaio di anni, le definitive 318  $M_{\oplus}$ . Il processo di accrescimento del pianeta è stato mediato dalla formazione di un disco circumplanetario all'interno del disco circumsolare; terminato il processo di accrescimento per esaurimento dei materiali volatili, ormai andati a costituire il pianeta, i materiali residui, in prevalenza rocciosi, sono andati a costituire il sistema di satelliti del pianeta, che si è infoltito a seguito della cattura, da parte della grande forza di gravità di Giove, di numerosi altri corpi minori. Conclusa la sua formazione, il pianeta ha subito un processo di migrazione orbitale: il pianeta infatti si sarebbe formato a circa 5,65 UA, circa 0,45 UA 70 milioni di chilometri più esternamente rispetto ad oggi, e nei 100.000 anni successivi, a causa della perdita del momento angolare dovuta all'attrito con il debole disco di polveri residuo dalla formazione della stella e dei pianeti, sarebbe man mano scivolato verso l'attuale orbita, stabilizzandosi ed entrando in risonanza 5:2 con Saturno. Durante questa fase Giove avrebbe catturato i suoi asteroidi troiani, originariamente oggetti della fascia principale o della fascia di Kuiper destabilizzati dalle loro orbite originarie e vincolati in corrispondenza dei punti lagrangiani  $L_4$  ed  $L_5$ .



Giove in formazione all'interno della nebulosa solare.

## Caratteristiche chimico/fisiche

### Composizione

L'atmosfera superiore di Giove è composta in volume da un 88-92% di idrogeno molecolare e da un 8-12% di elio. Queste percentuali cambiano se si tiene in considerazione la proporzione delle masse dei singoli elementi e composti, dal momento che l'atomo di elio è circa quattro volte più massiccio dell'atomo di idrogeno; l'atmosfera gioviana è quindi costituita da un 75% in massa di idrogeno e da un 24% di elio, mentre il restante 1% è costituito da altri elementi e composti presenti in quantità molto più esigue. La composizione varia leggermente man mano che si procede verso le regioni interne del pianeta, date le alte densità in gioco; alla base dell'atmosfera si ha quindi un 71% in massa di idrogeno, un 24% di elio e il restante 5% di elementi più pesanti e composti: vapore acqueo, ammoniaca, composti del silicio, carbonio e idrocarburi soprattutto metano ed etano, acido solfidrico, neon, ossigeno, fosforo e zolfo. Nelle regioni più esterne dell'atmosfera sono inoltre presenti dei consistenti strati di cristalli di ammoniaca solida. Le proporzioni atmosferiche di idrogeno ed elio sono molto vicine a quelle riscontrate nel Sole e teoricamente predette per la nebulosa solare primordiale; tuttavia le abbondanze dell'ossigeno, dell'azoto, dello zolfo e dei gas nobili sono superiori di un fattore tre rispetto ai valori misurati nel Sole; invece la quantità di neon nell'alta atmosfera è pari in massa solamente a 20 parti per milione, circa un decimo rispetto alla sua quantità nella stella. Anche la quantità di elio appare decisamente inferiore, presumibilmente a causa di precipitazioni che, secondo le simulazioni, interessano una porzione abbastanza profonda dell'atmosfera gioviana in cui il gas condensa in goccioline anziché mescolarsi in modo omogeneo con l'idrogeno. Le quantità dei gas nobili di peso atomico maggiore argon, kripton, xeno, radon sono circa due o tre volte quelle della nostra stella.

Composizione Atmosferica	
Idrogeno Molecolare H <sub>2</sub>	89,8 / ± 2,0%
Elio He	10,2 ± 2,0%
Metano CH <sub>4</sub>	~0,3%
Ammoniaca NH <sub>3</sub>	~0,026%
Deuterio di Idrogeno HD	~0,003%
Etano C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,0006%
Acqua H <sub>2</sub> O	0,0004%
Ghiacci. Ammoniaca, Acqua idrosolfuro di ammonio NH <sub>4</sub> SH	

## Massa e Dimensione

Giove è il pianeta più massiccio del sistema solare, 2 volte e mezzo più massiccio di tutti gli altri pianeti messi insieme; la sua massa è tale che il baricentro del sistema Sole-Giove cade esternamente alla stella, precisamente a 47.500 km 0,068 R<sub>☉</sub> dalla sua superficie. Il valore della massa gioviana indicata con M<sub>J</sub> è utilizzato come raffronto per le masse degli altri pianeti gassosi ed in particolare dei pianeti extrasolari. In raffronto alla Terra, Giove è 317,938 volte più massiccio, ha un volume 1 319 volte superiore ma una densità più bassa, appena superiore a quella dell'acqua:  $1,319 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  contro i  $5,5153 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  della Terra. Il diametro è 11,2008 volte maggiore di quello terrestre. Giove si comprime di circa 2 cm all'anno. Probabilmente alla base di questo fenomeno sta il meccanismo di Kelvin-Helmholtz: il pianeta compensa, comprimendosi in maniera adiabatica, la dispersione nello spazio del calore endogeno. Questa compressione riscalda il nucleo, incrementando la quantità di calore emessa; il risultato è che il pianeta irradia nello spazio una quantità di energia superiore a quella che riceve per insolazione, con un rapporto emissione/insolazione stimato in  $1,67 \pm 0,09$ . Per queste ragioni, si ritiene che, appena formato, il pianeta dovesse essere più caldo e grande di circa il doppio rispetto ad ora. Giove ha il maggior volume possibile per una massa fredda. Tuttavia, i modelli teorici indicano che se Giove fosse più massiccio avrebbe un diametro inferiore a quello che possiede attualmente si veda il box al lato. Questo comportamento varrebbe fino a masse comprese tra 10 e 50 volte la massa di Giove; oltre questo limite, infatti, ulteriori aumenti di massa determinerebbero aumenti effettivi di volume e causerebbero il raggiungimento di temperature, nel nucleo, tali da innescare la fusione del deuterio 13M<sub>J</sub> e del litio 65M<sub>J</sub>: si formerebbe così una nana bruna. Qualora l'oggetto invece raggiungesse una massa pari a circa 75-80 volte quella di Giove si raggiungerebbe la massa critica per l'innescio di reazioni termonucleari di fusione dell'idrogeno in elio, che porterebbe alla formazione di una stella, nella fattispecie una nana rossa. Anche se Giove dovrebbe essere circa 75 volte più massiccio per essere una stella, il diametro della più piccola stella sinora scoperta, AB Doradus C, è solamente il 40% più grande rispetto al diametro del pianeta.

### *Il maggior volume per una massa fredda*

*Giove possiede il maggior volume per una massa fredda: i dati teorici indicano che se il pianeta fosse più massiccio avrebbe dimensioni minori. Infatti, a basse densità della materia come quelle del pianeta, l'oggetto è mantenuto tale da forze di natura elettromagnetica: gli atomi interagiscono tra loro formando dei legami. Se la massa è piuttosto grande, come quella di Giove, la gravità al centro del corpo è talmente elevata che la materia è ionizzata: gli elettroni degli orbitali sono strappati all'attrazione dei loro nuclei e sono liberi di muoversi, rendendo impossibile la formazione di legami. Pertanto, l'incremento di gravità*



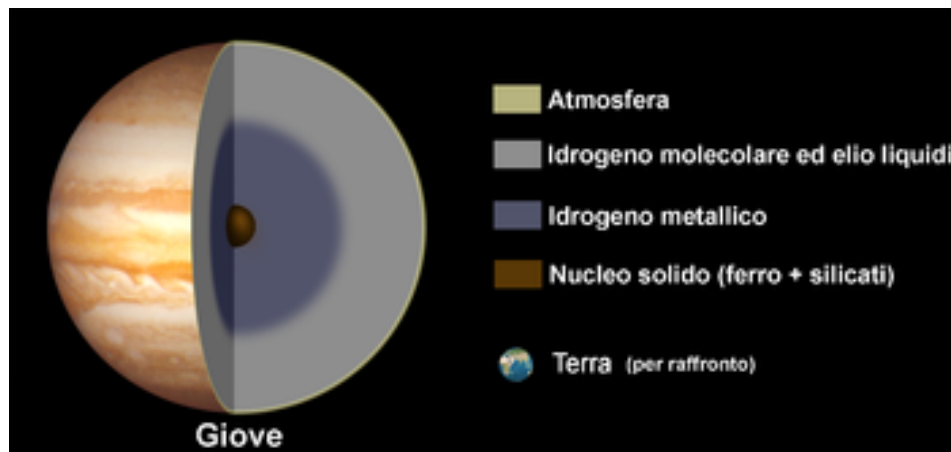
*dovuto all'aumento di massa non è più esattamente controbilanciato e il pianeta subisce una contrazione. Un ulteriore aumento di massa provoca la degenerazione degli elettroni, costretti a occupare il livello quantico ad energia più bassa disponibile. Gli elettroni obbediscono al principio di esclusione di Pauli; di conseguenza sono di norma obbligati a occupare una banda piuttosto vasta di livelli a bassa energia. In questa circostanza, quindi, le strutture atomiche sono alterate dalla crescente gravità, che costringe tale banda ad allargarsi, sicché la sola pressione degli elettroni degeneri manterrebbe in equilibrio il nucleo contro il collasso gravitazionale cui sarebbe naturalmente soggetto.*



**Confronto tra le dimensioni di Giove in un'immagine ripresa dalla sonda Cassini e della Terra. NASA**

## **Struttura Interna**

La struttura interna del pianeta è oggetto di studi da parte degli astrofisici e dei planetologi; si ritiene che il pianeta sia costituito da più strati, ciascuno con caratteristiche chimico-fisiche ben precise. Partendo dall'interno verso l'esterno si incontrano, in sequenza: un nucleo, un mantello di idrogeno metallico liquido, uno strato di idrogeno molecolare liquido, elio ed altri elementi, ed una turbolenta atmosfera. Secondo i modelli astrofisici più moderni e ormai accettati da tutta la comunità scientifica, Giove non possiede una crosta solida; il gas atmosferico diventa sempre più denso procedendo verso l'interno e gradualmente si converte in liquido, al quale si aggiunge una piccola percentuale di elio, ammoniaca, metano, zolfo, acido solfidrico ed altri composti in percentuale minore. La temperatura e la pressione all'interno di Giove aumentano costantemente man mano che si procede verso il nucleo. Al nucleo del pianeta è spesso attribuita una natura rocciosa, ma la sua composizione dettagliata, così come le proprietà dei materiali che lo costituiscono e le temperature e le pressioni cui sono soggetti, e persino la sua stessa esistenza, sono ancora in gran parte oggetto di speculazione. Secondo i modelli, il nucleo, con una massa stimata in 14-18  $M_{\oplus}$ , sarebbe costituito in prevalenza da carbonio e silicati, con temperature stimate sui 36.000 K e pressioni dell'ordine dei 4500 gigapascal GPa. La regione nucleare è circondata da un denso mantello di idrogeno liquido metallico, che si estende sino al 78% circa i 2/3 del raggio del pianeta ed è sottoposto a temperature dell'ordine dei 10.000 K e pressioni dell'ordine dei 200 GPa. Al di sopra di esso si trova un cospicuo strato di idrogeno liquido e gassoso, che si estende sino a 1.000 km dalla superficie e si fonde con le parti più interne dell'atmosfera del pianeta.



. Diagramma che illustra la struttura interna di Giove

## Atmosfera

L'atmosfera di Giove è la più estesa atmosfera planetaria del sistema solare; manca di un netto confine inferiore, ma gradualmente transisce negli strati interni del pianeta. Dal più basso al più alto, gli strati dell'atmosfera sono: troposfera, stratosfera, termosfera ed esosfera; ogni strato è caratterizzato da un gradiente di temperatura specifico. Al confine tra la troposfera e la stratosfera, ovvero la tropopausa, è collocato un sistema complicato di nubi e foschie costituito da stratificazioni di ammoniaca, idrosolfuro di ammonio ed acqua.

### Nubi a Bande e Giochi Atmosferici

La copertura nuvolosa di Giove è spessa circa 50 km e consiste almeno di due strati di nubi di ammoniaca: uno strato inferiore piuttosto denso ed una regione superiore più rarefatta. I sistemi nuvolosi sono organizzati in fasce orizzontali lungo le diverse latitudini. Si suddividono in zone, di tonalità chiara, e bande, le quali appaiono scure per via della presenza su di esse di una minore copertura nuvolosa rispetto alle zone. La loro interazione dà luogo a violente tempeste, i cui venti raggiungono, come nel caso delle correnti a getto delle zone, velocità superiori ai 100-120 m/s 360-400 km/h. Le osservazioni del pianeta hanno mostrato che tali formazioni variano nel tempo in spessore, colore e attività, ma mantengono comunque una certa stabilità, in virtù della quale gli astronomi le considerano delle strutture permanenti e hanno deciso di assegnare loro una nomenclatura. Le bande sono inoltre occasionalmente interessate da fenomeni, noti come disturbi, che ne frammentano il decorso; uno di questi fenomeni interessa a intervalli irregolari di 3-15 anni la banda equatoriale meridionale South Equatorial Belt, SEB, la quale improvvisamente scompare, dal momento che vira sul colore bianco rendendosi indistinguibile dalle chiare zone circostanti, per poi tornare otticamente individuabile nel giro di alcune settimane o mesi. La causa dei disturbi è attribuita alla momentanea sovrapposizione con le bande interessate di alcuni strati nuvolosi posti ad una quota maggiore. La caratteristica colorazione marrone-arancio delle nubi gioviane è causata da composti chimici complessi, noti come cromofori, che emettono luce in questo colore quando sono esposti alla radiazione ultravioletta solare. L'esatta composizione di queste sostanze rimane incerta, ma si ritiene che vi siano discrete quantità di fosforo, zolfo ed idrocarburi complessi; questi composti colorati si mescolano con lo strato di nubi più profondo e più caldo. Il caratteristico bandeggio si forma a causa della convezione atmosferica: nelle zone si ha l'emergere in superficie delle celle convettive dell'atmosfera inferiore, che determina la cristallizzazione dell'ammoniaca

che di conseguenza cela alla vista gli strati immediatamente sottostanti; nelle bande invece il movimento convettivo è discendente ed avviene in regioni a temperatura più alte. È stata ipotizzata la presenza di un sottile strato di vapore acqueo al di sotto delle nubi di ammoniaca, come dimostrerebbero i fulmini registrati dalla sonda Galileo, che raggiungono intensità anche decine di migliaia di volte superiori a quelle dei fulmini terrestri: la molecola dell'acqua, essendo polare, è infatti capace di assumere una parziale carica in grado di creare la differenza di potenziale necessaria per generare la scarica. Le nubi d'acqua, grazie all'apporto del calore interno del pianeta, possono quindi formare dei complessi temporaleschi simili a quelli terrestri. I fulmini gioviani, in precedenza studiati visivamente o in onde radio dalle sonde Voyager 1 e 2, Galileo, Cassini, sono stati oggetto di analisi approfondite dalla sonda Juno in un ampio spettro di frequenze e a quote molto inferiori. Tali studi hanno evidenziato un'attività temporalesca ben diversa da quella terrestre: su Giove l'attività è più concentrata vicino ai poli e quasi assente in prossimità dell'equatore. Questo è dovuto alla maggiore instabilità atmosferica presente ai poli gioviani che, pur essendo meno calda dell'area equatoriale, consente ai gas caldi provenienti dall'interno del pianeta di salire in quota favorendo la convezione. Giove, in virtù della sua seppur bassa inclinazione assiale, espone i propri poli a una radiazione solare inferiore, anche se di poco, rispetto a quella delle regioni equatoriali; la convezione all'interno del pianeta trasporta tuttavia più energia ai poli, bilanciando le temperature degli strati nuvolosi alle diverse latitudini.

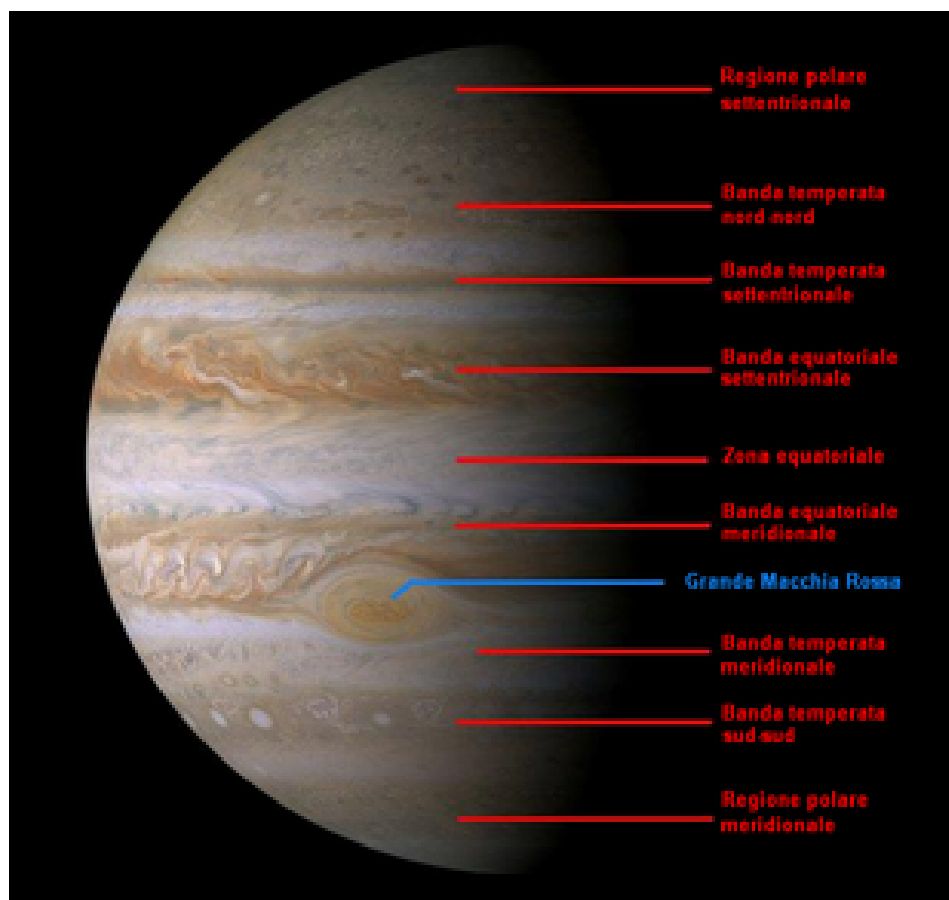
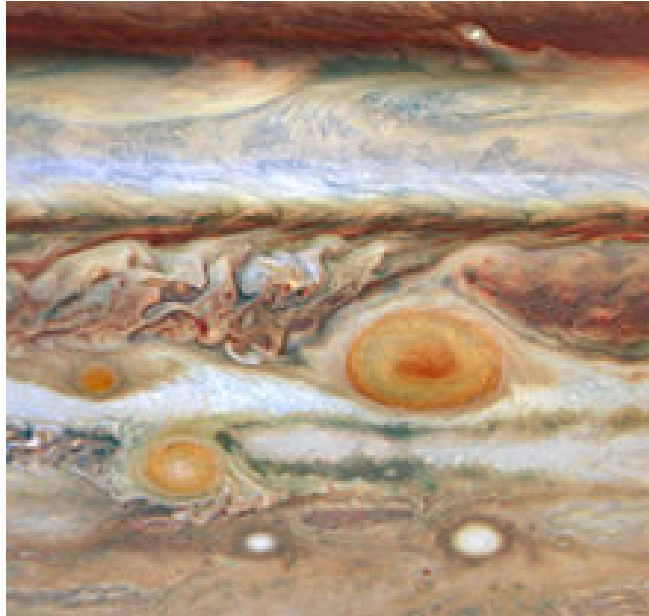


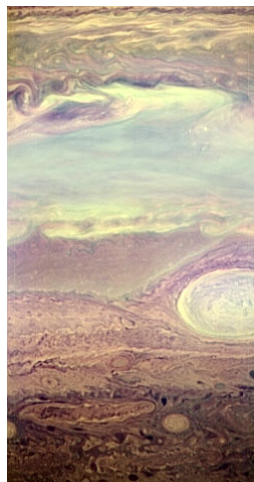
Immagine di Giove ripresa dalla sonda Cassini; sono indicate le principali bande, la Zona equatoriale e la Grande Macchia Rossa.

## La Grande Macchia Rossa e altre Tempeste

L'atmosfera di Giove ospita centinaia di vortici, strutture rotanti circolari che, come nell'atmosfera della Terra, possono essere divisi in due classi: cicloni ed anticicloni; i primi ruotano nel verso di rotazione del pianeta antiorario nell'emisfero settentrionale ed orario in quello meridionale, mentre i secondi nel verso opposto. Una delle principali differenze con l'atmosfera terrestre è che su Giove gli anticicloni dominano numericamente sui cicloni, dal momento che il 90% dei vortici con un diametro superiore ai 2.000 km sono anticicloni. La durata dei vortici varia da diversi giorni a centinaia di anni in base alle dimensioni: per esempio, la durata media di anticicloni con diametri compresi tra i 1.000 ed i 6.000 km è di 1–3 anni. Non sono mai stati osservati vortici nella regione equatoriale di Giove entro i 10° di latitudine, in quanto la circolazione atmosferica di tale regione li renderebbe instabili. Come accade su ogni pianeta rapidamente rotante, gli anticicloni su Giove sono centri di alta pressione, mentre i cicloni lo sono di bassa pressione. Il vortice sicuramente più noto è la **Grande Macchia Rossa GRS**, dall'inglese **Great Red Spot**, una vasta tempesta anticiclonica posta 22° a sud dell'equatore del pianeta. La formazione presenta un aspetto ovale e ruota in senso antiorario con un periodo di circa sei giorni. Le sue dimensioni, variabili, sono 24-40.000 km × 12-14.000 km: è quindi abbastanza grande da essere visibile già con telescopi amatoriali. Si tratta di una struttura svincolata da altre formazioni più profonde dell'atmosfera planetaria: le indagini infrarosse hanno mostrato che la tempesta è più fredda rispetto alle zone circostanti, segno che si trova più in alto rispetto ad esse: lo strato più alto di nubi della GRS, infatti, svetta di circa 8 km sugli strati circostanti. Anche prima che le sonde Voyager dimostrassero che si trattava di una tempesta, vi era già una forte evidenza che la Macchia fosse una struttura a sé stante, come d'altronde appariva dalla sua rotazione lungo il pianeta tutto sommato indipendente dal resto dell'atmosfera. La Macchia varia notevolmente di gradazione, passando dal rosso mattone al salmone pastello, e talvolta anche al bianco; non è ancora noto cosa determini la colorazione rossa della macchia. Alcune teorie, suffragate dai dati sperimentali, suggeriscono che possa essere causata dai medesimi cromofori, in quantità differenti, presenti nel resto dell'atmosfera gioviana. Non è noto se i cambiamenti che la Macchia manifesta siano il risultato di normali fluttuazioni periodiche, né tanto meno per quanto ancora essa durerà; i modelli fisico-matematici suggeriscono però che la tempesta sia stabile e quindi possa costituire, al contrario di altre, una formazione permanente del pianeta. Tempeste simili a questa, anche se temporanee, non sono infrequenti nelle atmosfere dei pianeti giganti gassosi: per esempio, Nettuno ha posseduto per un certo tempo una Grande Macchia Scura, e Saturno mostra periodicamente per brevi periodi delle Grandi Macchie Bianche. Anche Giove presenta degli ovali bianchi detti WOS, acronimo di White Oval Spots, Macchie Ovali Bianche, assieme ad altri marroni; si tratta tuttavia di tempeste minori transitorie, per questo prive di una denominazione. Gli ovali bianchi sono in genere composti da nubi relativamente fredde poste nell'alta atmosfera; gli ovali marroni sono invece più caldi, e si trovano ad altitudini medie. La durata di queste tempeste si aggira indifferentemente tra poche ore o molti anni. Nel 2000, nell'emisfero australe del pianeta, si è originata dalla fusione di tre ovali bianchi una formazione simile alla GRS, ma di dimensioni più piccole. Denominata tecnicamente Ovale BA, la formazione ha subito un'intensificazione dell'attività e un cambiamento di colore dal bianco al rosso, che le è valso il soprannome di Red Spot Junior. Infine Juno ha scoperto 8 vortici uguali al polo nord disposti ai vertici di un ottagono l'ottagono di Giove, con al centro un nono vortice, e 5 vortici uguali al polo sud disposti come i vertici di un pentagono il pentagono di Giove, con al centro un sesto vortice, poi trasformatosi in un esagono con al centro un settimo vortice l'esagono di Giove. Sono simili all'esagono di Saturno, anche lui un vortice.

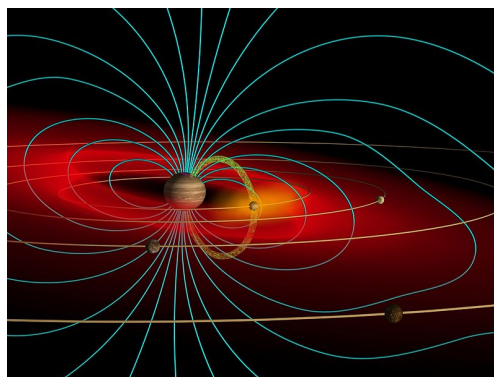


**Alcune tempeste riprese dal telescopio spaziale Hubble: la Grande Macchia Rossa, l'Ovale BA in basso a sinistra e un'altra macchia rossastra di recente formazione; al di sotto di esse, due ovali biancastri simili a quelli da cui ebbe origine l'Ovale BA. NASA**



**Un'immagine a falsi colori ripresa nell'infrarosso dalla sonda New Horizons che mostra una porzione dell'atmosfera gioviana prospiciente la Grande Macchia Rossa. NAS**

## **Campo Magnetico e Magnetosfera**



**Rappresentazione schematica della magnetosfera di Giove. In azzurro sono indicate le linee di forza del campo magnetico; in rosso la toroide di Io.**



Le correnti elettriche all'interno del mantello di idrogeno metallico generano un campo magnetico dipolare, inclinato di  $10^\circ$  rispetto all'asse di rotazione del pianeta. Il campo raggiunge un'intensità variabile tra 0,42 millitesla - mT - all'equatore e 1,3 mT ai poli, che lo rende il più intenso campo magnetico del sistema solare con l'eccezione di quello nelle macchie solari, 14 volte superiore al campo geomagnetico. Il campo magnetico di Giove preserva la sua atmosfera dalle interazioni col vento solare deflettendole e creando una regione appiattita, la magnetosfera, costituita da un plasma di composizione molto differente da quello del vento solare. La magnetosfera gioviana è la più grande e potente fra tutte le magnetosfere dei pianeti del sistema solare, nonché la struttura più grande del sistema non appartenente al Sole: si estende nel sistema solare esterno per molte volte il raggio di Giove  $R_J$  e raggiunge un'ampiezza massima che può superare l'orbita di Saturno. La magnetosfera di Giove è convenzionalmente divisa in tre parti: la magnetosfera interna, intermedia ed esterna. La magnetosfera interna è situata ad una distanza inferiore a 10 raggi gioviani  $R_J$  dal pianeta; il campo magnetico al suo interno rimane sostanzialmente dipolare, poiché ogni contributo proveniente dalle correnti che fluiscono dal plasma magnetosferico equatoriale risulta piccolo. Nelle regioni intermedie tra 10 e  $40 R_J$  ed esterne oltre  $40 R_J$  il campo magnetico non è più dipolare e risulta seriamente disturbato dalle sue interazioni col plasma solare. Le eruzioni che avvengono sul satellite galileiano lo contribuiscono ad alimentare la magnetosfera gioviana generando un importante toroide di plasma, che carica e rafforza il campo magnetico formando la struttura denominata magneto disk. Le forti correnti che circolano nella regione interna della magnetosfera danno origine ad intense fasce di radiazione, simili alle fasce di van Allen terrestri, ma migliaia di volte più potenti; queste forze generano delle aurore perenni attorno ai poli del pianeta ed intense emissioni radio. L'interazione delle particelle energetiche con la superficie delle lune galileiane maggiori influenza notevolmente le loro proprietà chimiche e fisiche, ed entrambi influenzano e sono influenzati dal particolare moto del sottile sistema di anelli del pianeta. Ad una distanza media di  $75 R_J$  compresa tra circa 45 e  $100 R_J$  a seconda del periodo del ciclo solare dalla sommità delle nubi del pianeta è presente una lacuna tra il plasma del vento solare e il plasma magnetosferico, che prende il nome di magnetopausa. Al di là di essa, ad una distanza media di  $84 R_J$  dal pianeta, si trova il bow shock, il punto in cui il flusso del vento viene deflesso dal campo magnetico.

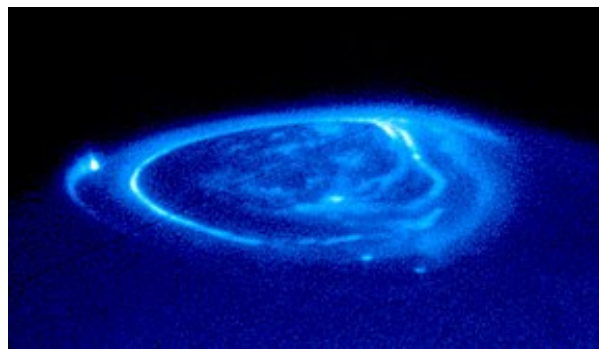


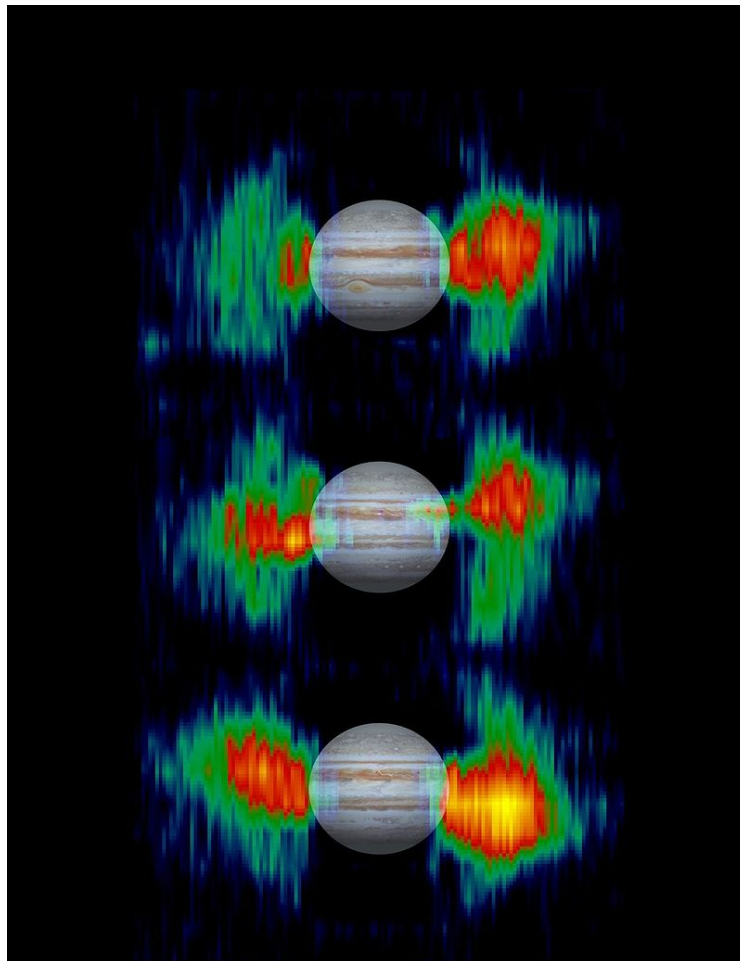
Immagine ultravioletta di un'aurora gioviana ripresa dal telescopio Hubble; i tre punti brillanti sono generati, rispettivamente, dalle interazioni di Io, Ganimede ed Europa; la fascia di radiazione più intensa è detta *ovale aurorale principale*, al cui interno si trovano le cosiddette *emissioni polari*. NASA

## Emissione Radio Magnetosferica

Le correnti elettriche delle fasce di radiazione generano delle emissioni radio di frequenza variabile tra 0,6 e 30 MHz, che rendono Giove un'importante radiosorgente. Le prime analisi, condotte da Burke e Franklin, rivelarono che l'emissione è caratterizzata da flash intorno ai 22,2 MHz e che il loro periodo coincideva con il periodo di rotazione del pianeta, la cui durata fu quindi determinata con maggiore accuratezza. Essi riconobbero inizialmente due tipologie di emissione: i lampi lunghi long o L-bursts, della durata di alcuni secondi, e i lampi corti short o S-bursts, che durano poco meno di un centesimo di secondo. Sono state in seguito scoperte altre tre forme di segnale radio trasmesse dal pianeta:

- Esplosioni radio deca metriche con lunghezze d'onda di decine di metri, che variano con la rotazione del pianeta e sono influenzate dalle interazioni tra lo e la magnetosfera gioviana.
- Emissioni radio deca metriche con lunghezze d'onda di alcune decine di centimetri, la cui origine è stata imputata alla radiazione di ciclotrone emessa dagli elettroni accelerati dal campo magnetico in un'area toroidale che ne circonda l'equatore.
- Irraggiamento termico prodotto dal calore dell'atmosfera del pianeta.

La forte modulazione periodica dell'emissione radio e particellare, che corrisponde al periodo di rotazione del pianeta, rende Giove affine ad una pulsar. È bene comunque considerare che l'emissione radio del pianeta dipende fortemente dalla pressione del vento solare e, quindi, dall'attività solare stessa.



**Immagine nel visibile del pianeta sovrapposta ai dati ottenuti dalle osservazioni radio; da notare l'area toroidale che circonda l'equatore del pianeta.**

## Anelli

Giove possiede un debole sistema di anelli planetari, il terzo ad esser stato scoperto nel sistema solare, dopo quello di Saturno e quello di Urano. Fu osservato per la prima volta nel 1979 dalla sonda Voyager 1, ma fu analizzato più approfonditamente negli anni novanta dalla sonda Galileo e, a seguire, dal telescopio spaziale Hubble e dai più grandi telescopi di Terra. Il sistema di anelli consiste principalmente di polveri, presumibilmente silicati. È suddiviso in quattro parti principali: un denso toro di particelle noto come anello di alone; una fascia relativamente brillante, ma eccezionalmente sottile nota come anello principale; due deboli fasce più esterne, detti anelli Gossamer letteralmente garza, che prendono il nome dai satelliti il cui materiale superficiale ha dato origine a questi anelli: Amaltea anello Gossamer di Amaltea

e Tebe anello Gossamer di Tebe. L'anello principale e l'anello di alone sono costituiti da polveri originarie dei satelliti Metis e Adrastea ed espulse nello spazio in seguito a violenti impatti meteorici. Le immagini ottenute nel febbraio e nel marzo 2007 dalla missione New Horizons hanno mostrato inoltre che l'anello principale possiede una ricca struttura molto fine. All'osservazione nel visibile e nell'infrarosso vicino gli anelli hanno un colore tendente al rosso, eccezion fatta per l'anello di alone, che appare di un colore neutro o comunque tendente al blu. Le dimensioni delle polveri che compongono il sistema sono variabili, ma è stata riscontrata una netta prevalenza di polveri di raggio pari a circa  $15\text{ }\mu\text{m}$  in tutti gli anelli tranne in quello di alone, probabilmente dominato da polveri di dimensioni nanometriche. La massa totale del sistema di anelli è scarsamente conosciuta, ma è probabilmente compresa tra  $10^{11}$  e  $10^{16}$  kg. L'età del sistema è sconosciuta, ma si ritiene che esista sin dalla formazione del pianeta madre.



**Un mosaico di fotografie degli anelli di Giove scattate dalla Galileo mentre si trovava nel cono d'ombra del pianeta. NASA**

## Satelliti Naturali

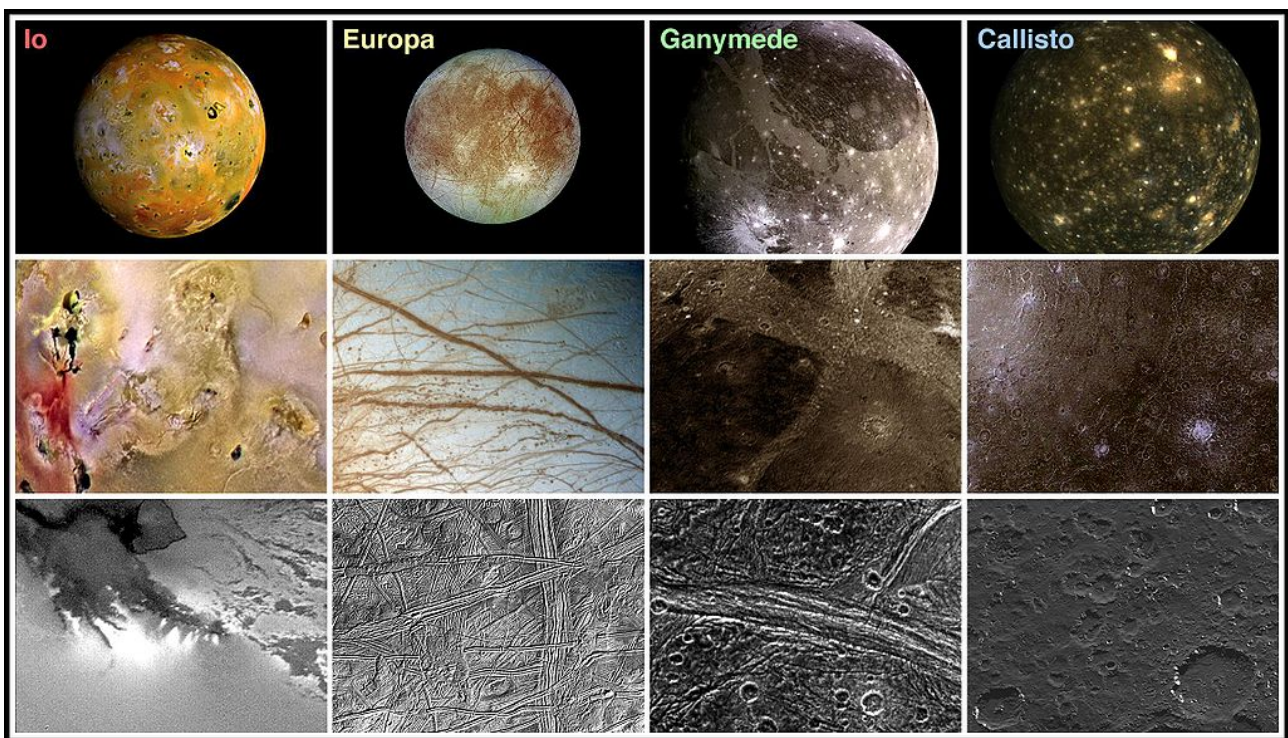
Giove è circondato da una nutrita schiera di satelliti naturali, i cui membri attualmente identificati sono 79, che lo rendono il pianeta con il più grande corteo di satelliti con orbite ragionevolmente sicure del sistema solare. Otto di questi sono definiti satelliti regolari e possiedono orbite prograde ovvero, che orbitano nello stesso senso della rotazione di Giove, quasi circolari e poco inclinate rispetto al piano equatoriale del pianeta. La classe è suddivisa in due gruppi:

- Gruppo di Amaltea o interno, che costituisce il gruppo di satelliti più vicino al pianeta; ne fanno parte Metis, Adrastea, Amaltea e Tebe, che sono la sorgente delle polveri che vanno a formare il sistema di anelli del pianeta.
- Gruppo principale o Satelliti medicei o galileiani; vi appartengono Io, Europa, Ganimede e Callisto e sono gli unici a presentare, in virtù della loro massa, una forma sferoidale.

Le restanti 71 lune sono annoverate tra i satelliti irregolari, le cui orbite, sia prograde sia retrograde che orbitano in senso opposto rispetto al senso di rotazione di Giove, sono poste a una maggiore distanza dal pianeta madre e presentano alti valori di inclinazione ed eccentricità orbitale. Questi satelliti sono spesso considerati più che altro degli asteroidi cui spesso assomigliano per dimensioni e composizione catturati dalla grande gravità del gigante gassoso e frammentati a seguito di collisioni; di questi ventisette non hanno ancora ricevuto un nome, mentre altri undici non sono stati più osservati dopo la loro scoperta e sono considerati persi. L'identificazione dei gruppi o famiglie satellitari è sperimentale; si riconoscono due principali categorie, che differiscono per il senso in cui orbita il satellite: i satelliti progradati e quelli retrogradati; queste due categorie a loro volta assommano le diverse famiglie.

- Satelliti progradì:
  - Gruppo di Imalia.
- Satelliti retrogradì:
  - Gruppo di Carme.
  - Gruppo di Ananke.
  - Gruppo di Pasifae.

Non tutti i satelliti appartengono ad una famiglia; esulano infatti da questo schema Temisto, Carpo,, Valetudo, S/2003 J 12 e S/2003 J 2. Il numero preciso di satelliti non sarà mai quantificato esattamente, perché i frammenti ghiacciati che compongono i suoi anelli possono tecnicamente essere considerati tali; inoltre, a tutt'oggi, l'Unione astronomica internazionale non ha voluto porre con precisione una linea arbitraria di distinzione tra satelliti minori e grandi frammenti ghiacciati. I nomi dei satelliti di Giove sono ispirati a quelli di amanti o figlie del dio romano Giove, o del suo equivalente greco, Zeus.



**I quattro satelliti galileiani: Io, Europa, Ganimede, Callisto.**

## Interazione col resto del Sistema Solare

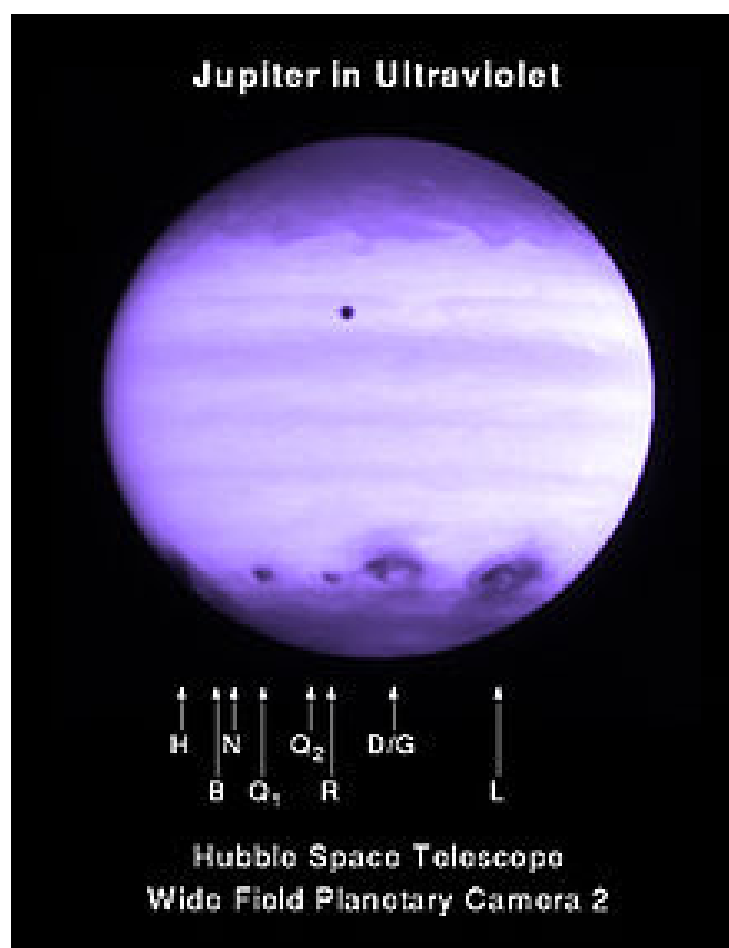
La forza di gravità di Giove ha contribuito, insieme a quella del Sole, a plasmare il sistema solare. Giove possiede infatti una vasta sfera di Hill, la più grande del sistema solare eccetto, ovviamente, quella del Sole; essa si estende da un minimo di 0,30665 ad un massimo di 0,33786 UA dal centro del pianeta, pari a rispettivamente 45,87 e a 50,54 milioni di chilometri. Tali dimensioni rendono quindi l'idea del ruolo che il pianeta svolge nel regolare gli assetti gravitazionali del sistema planetario. Il pianeta è il responsabile di gran parte delle lacune di Kirkwood nella fascia principale degli asteroidi, e si ritiene che sia stato il principale fautore dell'intenso bombardamento tardivo nelle prime fasi della storia del sistema solare. Inoltre, la maggioranza delle comete



periodiche appartiene alla famiglia delle comete gioviane, i cui membri sono caratterizzati da avere orbite i cui semiassi maggiori sono inferiori a quello del pianeta. Tali comete si sarebbero formate all'interno della fascia di Kuiper, ma la loro orbita particolarmente ellittica sarebbe il risultato dell'attrazione del Sole e delle perturbazioni gravitazionali esercitate da Giove durante il passaggio delle comete nei pressi del gigante gassoso.

### Cattura Temporanea dei Satelliti

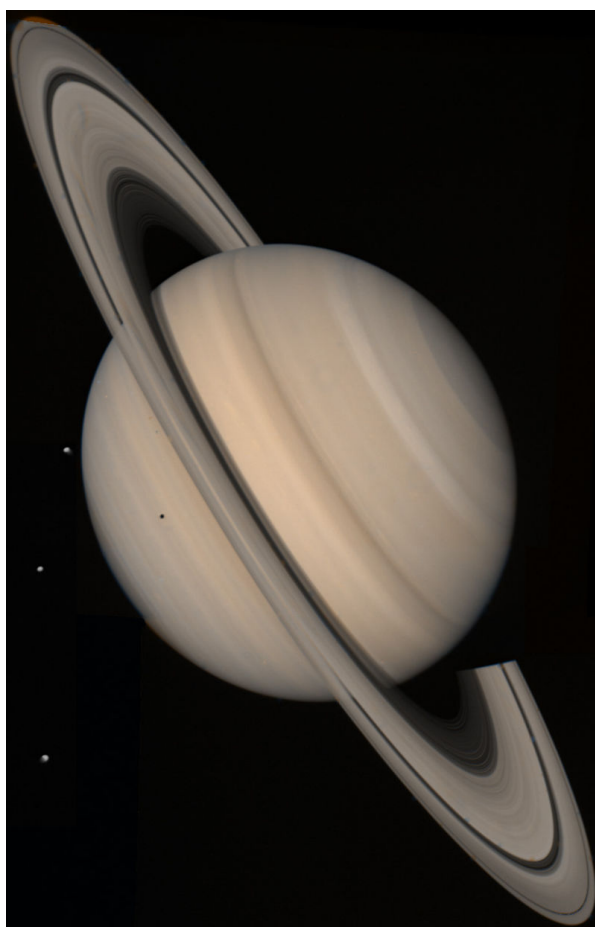
La grande sfera di Hill permette al pianeta di catturare temporaneamente diversi corpi minori e di porli in orbita intorno ad esso; l'avverbio temporaneamente può essere inteso sia su una scala temporale astronomica, quindi dell'ordine del milione di anni o più, sia su scale temporali umane, da alcuni mesi sino a qualche decennio. Tra i satelliti temporanei, noti anche come TSC **dall'inglese Temporary Satellite Capture**, catturati nell'ultimo secolo si annoverano anche alcune comete periodiche, come 39P/Oterma, 82P/Gehrels, 111P/Helin-Roman-Crockett, 147P/Kushida-Muramatsu, P/1996 R2 Lagerkvist e probabilmente anche la famosa D/1993 F2 Shoemaker-Levy 9. Giove sicuramente cattura in via temporanea anche asteroidi, ma non è stato finora osservato alcun caso; si ipotizza comunque che i satelliti irregolari del sistema gioviano esterno potrebbero essere degli asteroidi catturati.



**Giove ripreso nell'ultravioletto dal telescopio Hubble poco dopo l'impatto con la Shoemaker-Levy 9. Le lettere indicano i frammenti della cometa responsabili dei segni scuri segnalati dalle frecce.**



## **Sesto Pianeta Saturno**



**Foto di Saturno ottenuta dalla Voyager 2 il 4 agosto 1981 da circa 21 milioni di chilometri. Si notano tre dei suoi satelliti ghiacciati sulla sinistra; in ordine di distanza dal pianeta: Teti, Dione e Rea. L'ombra di Teti è proiettata sull'emisfero sud di Saturno.**

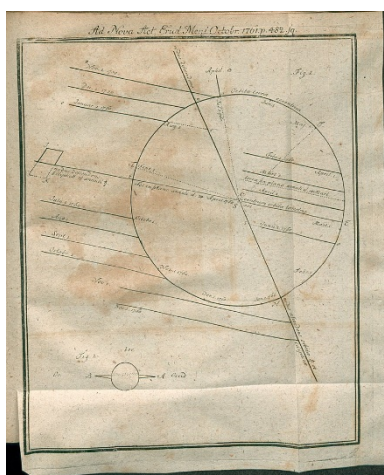
Saturno è il sesto pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole e il secondo pianeta più massiccio dopo Giove. Con un raggio medio 9,48 volte quello della Terra e una massa 95 volte superiore a quella terrestre. Saturno, con Giove, Urano e Nettuno, è classificato come gigante gassoso. Il nome deriva dall'omonimo dio della mitologia romana, omologo del titano greco Crono. Il suo simbolo astronomico ♄ è una rappresentazione stilizzata della falce del dio dell'agricoltura. Saturno è composto per il 95% da idrogeno e per il 3% da elio a cui seguono gli altri elementi. Il nucleo, consistente in silicati e ghiacci, è circondato da uno spesso strato di idrogeno metallico e quindi da uno strato esterno gassoso. I venti nell'atmosfera di Saturno possono raggiungere i 1.800 km/h, risultando significativamente più veloci di quelli su Giove e leggermente meno veloci di quelli che spirano nell'atmosfera di Nettuno. Saturno ha un esteso e vistoso sistema di anelli che consistono principalmente in particelle di ghiaccio e polveri di silicati. Con le sue 82 lune conosciute, Saturno detiene il primato per il maggior numero di satelliti del sistema solare. Tra queste, Titano è la maggiore ed anche l'unica luna del sistema solare ad avere un'atmosfera significativa.

<b>Parametri Orbitali, Dati Fisici e Osservativi</b>					
<b>Orbitali</b>		<b>Fisici</b>		<b>Osservativi</b>	
<i>Semiasse</i>	9,58 UA	<i>Diamet. equat.</i>	120.536 km	<i>Magn. app. min</i>	
<i>Perielio</i>	9,04 UA	<i>Superficie</i>	4,26x10 <sup>16</sup> m <sup>2</sup>	<i>Magn. app med</i>	0,7
<i>Afelio</i>	10,13 UA	<i>Period. Rotaz.</i>	10h 33min	<i>Magn. app max</i>	0,43
<i>CRF orbitale</i>	56,47 UA	<i>Period. Orbit.</i>	29,45 anni		
<i>Inclinazione</i>	26,73°	<i>Incl su Eclittica</i>	2,48°		
<i>Satelliti</i>	82	<i>Temp. max</i>	-68 °C		
<i>Anelli</i>	500 – 1000	<i>Temp. med.</i>	-130 °C		
		<i>Temp. min.</i>	-191 °C		
		<i>Press. Atmosf</i>	140 kPa		

**UA = distanza Terra/Sole media pari a km149.597.870.**

## Osservazioni

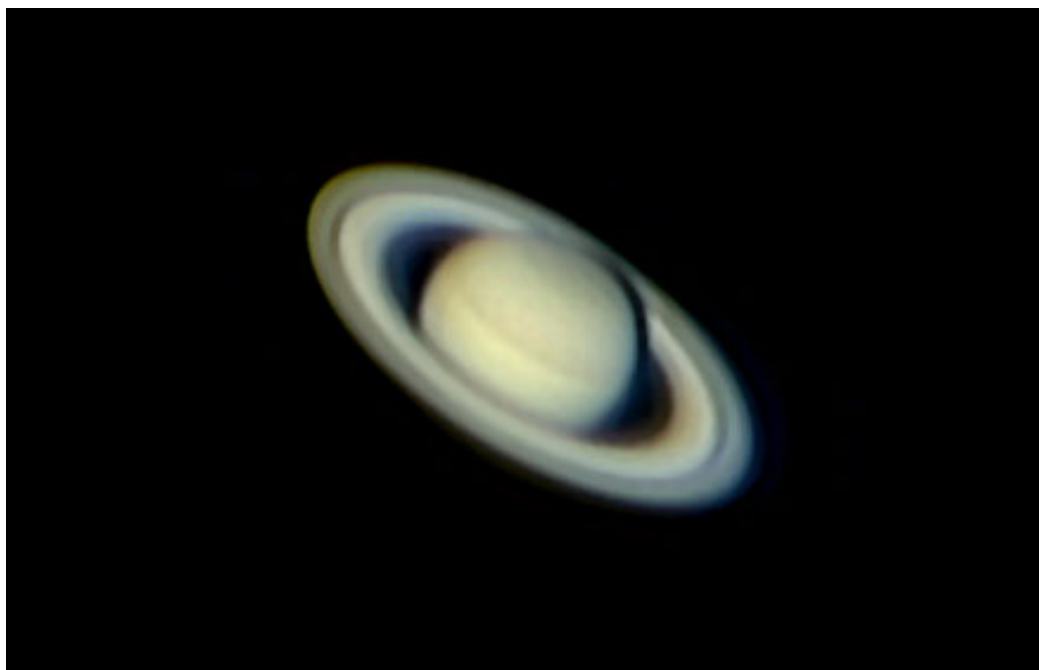
Il momento migliore per osservare Saturno e i suoi anelli è l'opposizione, quando l'elongazione del pianeta è di 180° e Saturno si trova quindi nella parte di cielo opposta al Sole. Saturno appare a occhio nudo nel cielo notturno come un luminoso puntino grigio-giallastro con una magnitudine apparente che solitamente oscilla tra 1 e 0. Il suo diametro è troppo piccolo per poterlo percepire e a occhio nudo il pianeta appare sempre come un punto, quindi, è necessario un telescopio o un binocolo con almeno 30 ingrandimenti per potere distinguere il disco del pianeta e gli anelli. Saturno ha un periodo di rivoluzione di 29,5 anni e circa ogni 15 anni, quando si trova in determinati punti della sua orbita, gli anelli scompaiono brevemente dalla vista poiché vengono a trovarsi perfettamente di taglio visti dalla Terra. Oltre che dalla distanza dalla Terra la luminosità di Saturno dipende anche dalla posizione degli anelli: se sono orientati in modo favorevole, come avvenne ad esempio nel 2002, sono maggiormente visibili e contribuiscono ad aumentare sensibilmente la luminosità apparente di Saturno. Talvolta Saturno, come altri corpi del sistema solare che giacciono nei pressi dell'eclittica, è occultato dalla Luna. Nel caso di Saturno il fenomeno ha luogo con determinati cicli: a un periodo di dodici mesi, durante i quali il pianeta viene occultato dodici volte dalla Luna, segue un periodo di circa cinque anni, durante il quale non si verificano occultazioni. Questo succede perché l'orbita della Luna intorno alla Terra è inclinata rispetto all'orbita della Terra attorno al Sole, e solo quando Saturno si trova in corrispondenza del punto dove l'orbita della Luna attraversa il "piano dell'eclittica" avvengono le occultazioni.



**Tavola illustrativa dell'articolo di Gottfried Heinsius *Observationes circa phasin Saturni rotundam* pubblicato negli *Acta Eruditorum* del 1761.**

## Storia delle Osservazioni

Saturno è il penultimo dei pianeti visibili a occhio nudo ed era conosciuto sin dall'antichità. Gli astronomi babilonesi osservavano e registravano regolarmente i movimenti del pianeta. Nell'antica mitologia romana il dio Saturno, da cui il pianeta prende il nome, era il dio dell'agricoltura ed era considerato l'equivalente del titano greco Crono. Lo scienziato greco Tolomeo basò i suoi calcoli dell'orbita di Saturno su osservazioni fatte mentre il pianeta era all'opposizione. Il primo astronomo a osservarne la forma peculiare fu Galileo, che nel 1610 non riuscì a risolvere completamente la figura del pianeta circondato dai suoi anelli. Inizialmente il pianeta gli apparve accompagnato da altri due corpi sui lati, e pertanto lo definì tricorporeo. Con le osservazioni successive e l'uso di strumenti più evoluti la variazione dell'angolo visuale degli anelli gli mostrò via via aspetti diversi, che lo spinsero a definire bizzarro il pianeta. Galileo nei suoi schizzi ipotizzò varie soluzioni per la forma di Saturno, fra cui anche possibili anelli che erano tangenti la superficie del corpo celeste. Nei secoli successivi Saturno fu oggetto di studi approfonditi. Nel 1649 Eustachio Divini, un costruttore di telescopi marchigiano, pubblicò per la prima volta un'illustrazione dettagliata degli anelli di Saturno; il teologo cattolico Leone Allacci verso la metà del XVII secolo teorizzò fantasiosamente che gli anelli fossero stati originati dal Santo prepuzio. Nel 1655 l'astronomo olandese Christiaan Huygens fu il primo a intuire la natura anulare dei corpi visti da Galileo attorno al pianeta e scoprì anche il satellite Titano. Giovanni Cassini nel 1675 fu il primo a ipotizzare la natura degli anelli e vi individuò la prima suddivisione, o lacuna, che ancora oggi porta il suo nome. Inoltre scoprì altre quattro lune saturniane: nel 1671 Rea, Giapeto nel 1672, Dione e Teti nel 1684. La natura granulare degli anelli fu dimostrata per via teorica nel 1859 dal fisico scozzese James Clerk Maxwell. Nel 1899 William Henry Pickering scoprì Febe, un satellite irregolare che non ruota in sincronia con Saturno come le altre lune maggiori. Febe è stato il primo satellite scoperto in un'orbita retrograda. Nel corso del XX secolo studi su Titano portarono alla conferma che esso era circondato da una spessa atmosfera, caratteristica unica tra i satelliti naturali del sistema solare.



Saturno come appare in un telescopio Newton da 250 mm

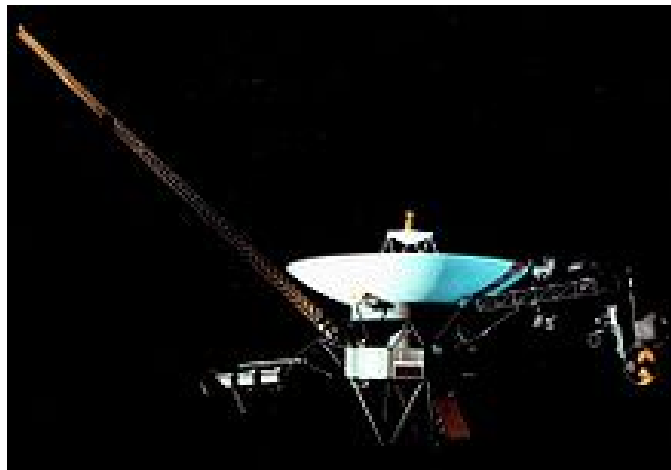
## Esplorazioni Spaziali

### Pioneer 11

Il Pioneer 11 fu la prima sonda spaziale a effettuare un sorvolo ravvicinato di Saturno nel settembre 1979, quando passò a 20.000 chilometri dalla sommità delle nubi del pianeta. Furono scattate immagini del pianeta e di alcune delle sue lune, anche se la bassa risoluzione non consentì di rilevare dettagli della superficie. La sonda studiò anche gli anelli del pianeta, scoprendo il sottile anello F e il fatto che le lacune oscure appaiono brillanti se osservate a elevati angoli di fase rispetto al Sole, indicando che contengono sottili particelle in grado di diffondere la luce. Pioneer 11 misurò anche la temperatura di Titano.

### Voyager

La sonda Voyager 1 visitò il sistema di Saturno nel novembre 1980, inviando le prime immagini ad alta risoluzione del pianeta, dei suoi anelli e delle principali lune, effettuando anche un flyby con Titano, aumentando la conoscenza della sua atmosfera e confermando l'impenetrabilità della stessa alle lunghezze d'onda dello spettro visibile, impedendo la visione della superficie. Nell'agosto 1981, quasi un anno dopo, la Voyager 2 continuò lo studio del sistema di Saturno. Acquisì diverse altre immagini ravvicinate delle lune di Saturno mostrando prove di alcuni cambiamenti dell'atmosfera e degli anelli. Purtroppo, durante il flyby la piattaforma girevole della telecamera si bloccò per un paio di giorni e alcune immagini pianificate andarono perse. La gravità di Saturno fu poi usata per dirigere la sonda verso Urano. Le sonde scoprirono alcuni nuovi satelliti in orbita nei pressi o all'interno degli anelli del pianeta, così come scoprirono alcuni spazi vuoti tra gli anelli stessi, come la Divisione di Maxwell, tra l'anello B e l'anello C, e la Divisione di Keeler, all'interno dell'anello A.



Una delle due sonde del programma Voyager.

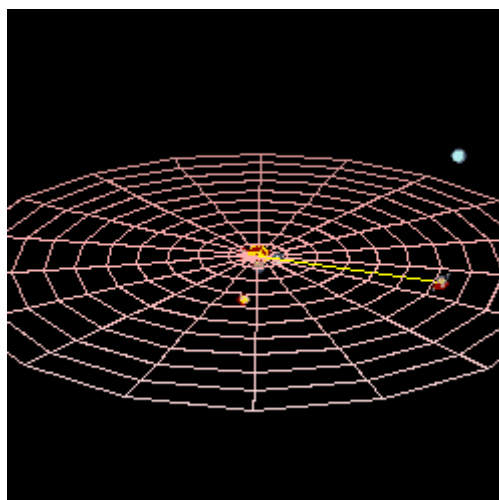
### Cassini-Huygens

Lanciata il 15 ottobre 1997, la sonda spaziale Cassini-Huygens entrò in orbita attorno a Saturno il 1° luglio 2004, con lo scopo di studiare il sistema saturniano e inviare successivamente un Lander sulla misteriosa superficie di Titano, fino ad allora sconosciuta a causa della spessa coltre atmosferica che avvolge la principale luna di Saturno. Dall'inizio del 2005 la Cassini rivelò fulmini nell'atmosfera di Saturno, circa 1.000 volte più potenti dei fulmini terrestri. Nel 2006 la NASA comunicò che la Cassini aveva trovato la prova di acqua liquida su Encelado, che

fuoriesce da sotto la superficie ghiacciata tramite Geyser. Le immagini della Cassini mostrarono getti di particelle ghiacciate che dalla regione polare sud della luna finivano in orbita attorno a Saturno. Secondo alcuni scienziati altre lune del sistema solare potrebbero avere oceani di acqua liquida sotto la superficie; tuttavia, nel caso di Encelado questi potrebbero trovarsi appena poche decine di metri sotto la superficie ghiacciata. Nel maggio 2011 gli scienziati della NASA affermarono che Encelado potrebbe essere il luogo più abitabile del sistema solare per la vita per come è conosciuta dall'uomo. Numerose sono state le scoperte della Cassini nel corso degli anni: tra il 2006 e il 2007 sono stati scoperti laghi e mari di idrocarburi su Titano, il più grande dei quali ha le dimensioni del Mar Caspio. Nell'ottobre del 2006 la sonda ha registrato un'enorme tempesta nel polo sud di Saturno. Dopo avere scoperto otto nuovi satelliti la missione principale della Cassini si è conclusa nel 2008, tuttavia essa è stata prima estesa fino al 2010 e successivamente prorogata fino al 2017. Nell'aprile 2013 la Cassini inviò le immagini di un enorme uragano sul polo nord del pianeta, 20 volte più grande di quelli che si osservano sulla Terra, con venti che soffiavano a oltre 530 km/h. Il 19 luglio 2013 per la prima volta la NASA ha annunciato in anticipo che sarebbe stata scattata una serie di foto dal sistema solare esterno verso la Terra: la Cassini, dietro al disco di Saturno per evitare il bagliore del Sole, immortalò la Terra e la Luna dalla distanza di 1,5 miliardi di km. Da quella distanza la Terra appariva un piccolo puntino blu con un ancor più piccolo puntino bianco accanto la Luna.

## Parametri Orbitali

Saturno orbita attorno al Sole a una distanza media di  $1,427 \times 10^9$  km, percorrendo una rivoluzione completa in 29,458 anni terrestri. La sua orbita è inclinata di  $2,488^\circ$  rispetto all'eclittica e ha un'eccentricità di 0,0560. Alla sua distanza la luce del Sole appare 100 volte meno intensa della luce sulla Terra. L'asse di rotazione è inclinato di  $26,731^\circ$ , dando al pianeta un ciclo di stagioni più o meno analogo a quello terrestre e marziano, ma assai più lungo. Il periodo di rotazione di Saturno sul proprio asse varia a seconda della quota; gli strati superiori, nelle regioni equatoriali, impiegano 10,23378 ore a compiere un giro completo, mentre nucleo e mantello ruotano in 10,67597 ore. Nel marzo 2007 è stato rilevato che la variazione delle emissioni radio del pianeta non corrisponde alla velocità di rotazione di Saturno. Questa variazione potrebbe essere causata dall'attività dei geyser sulla superficie della luna Encelado. Il vapore acqueo emesso in orbita attorno a Saturno da questa attività crea un ostacolo al campo magnetico del pianeta, rallentando la sua rotazione rispetto alla rotazione del pianeta. L'ultima stima del periodo di rotazione di Saturno, basato su una media di varie misure effettuate dalle sonde Cassini, Voyager e Pioneer è stata segnalata nel settembre 2007, ed equivale a 10 ore, 32 minuti e 35 secondi.



**La distanza media di Saturno dal Sole è km e impiega circa 29,5 anni a compiere un'orbita, qui rappresentata in rosso, attorno al Sole.**



## Caratteristiche Fisiche

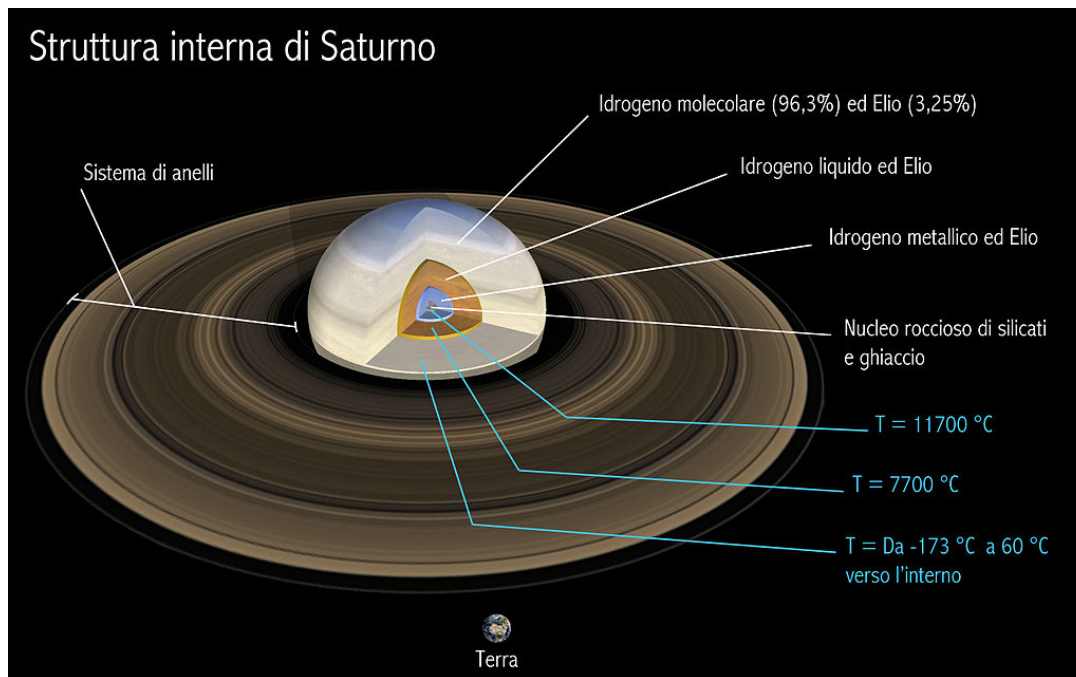
Con una massa pari a 95,181 volte e un volume pari a 744 volte quello terrestre Saturno è il secondo pianeta più grande del sistema solare dopo Giove. È classificato come gigante gassoso poiché gli strati esterni sono costituiti prevalentemente da gas e manca di una superficie definita, anche se potrebbe avere un nucleo solido. Saturno appare visibilmente schiacciato ai poli, con i suoi diametri equatoriale e polare 120.536 km e 108.728 km rispettivamente che differiscono di quasi il 10%. Questa forma è il risultato della sua rapida rotazione e della sua composizione chimica, con la densità più bassa del sistema solare, facile a deformarsi. Anche gli altri pianeti, e i giganti gassosi in particolare, sono deformati in maniera analoga, ma in modo molto meno evidente. Saturno è anche l'unico pianeta del sistema solare con una densità media inferiore a quella dell'acqua: solo  $0,69 \text{ g/cm}^3$ . In realtà il valore medio è una combinazione di densità molto basse nell'atmosfera del pianeta e densità più elevate all'interno, sicuramente maggiori di quella dell'acqua. Per questi valori si presuppone che il pianeta abbia un nucleo di rocce e metalli non particolarmente massiccio. Saturno ha una massa 95 volte quella terrestre, e assieme a Giove compone il 92% della massa planetaria totale del sistema solare.



Schiacciamento ai poli di Saturno - Confronto con una sfera  $f = 0$ .

## Struttura Interna

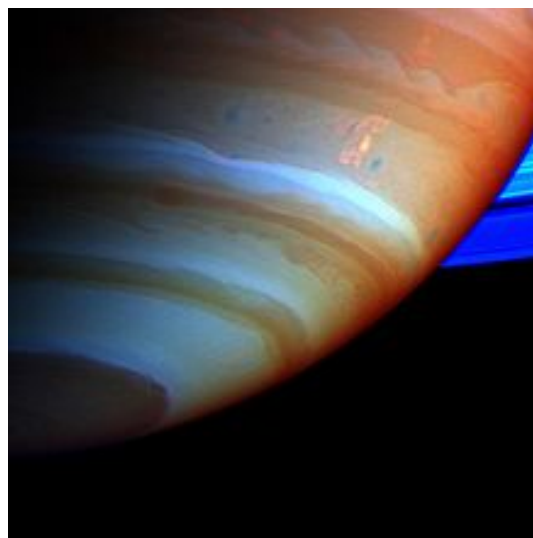
Saturno possiede una struttura interna molto simile a quella di Giove e presenta una composizione affine a quella del Sole, essendo costituito per il 75% di idrogeno e il 25% di elio, con tracce d'acqua, metano e ammoniaca. Nello strato esterno è presente un'atmosfera dove si alternano fasce chiare e scure parallele all'equatore con perturbazioni cicloniche e formazioni di nubi; il tutto degrada nella zona sottostante, dove a densità superiori a  $0,01 \text{ g/cm}^3$  l'idrogeno diviene liquido. La temperatura, la pressione e la densità all'interno del pianeta aumentano costantemente spostandosi verso il nucleo e negli strati più profondi del pianeta l'idrogeno diviene metallico. Al centro del pianeta è presente il nucleo. I modelli planetari standard suggeriscono che all'interno di Saturno esista un piccolo nucleo roccioso simile nella composizione al nucleo terrestre, ma più denso. Nel 2004 gli astronomi francesi Didier Saumon e Tristan Guillot hanno stimato la massa del nucleo di Saturno tra 9-22 volte la massa terrestre, che corrisponde a un diametro di circa 25.000 chilometri; nel nucleo si raggiunge la temperatura di quasi  $12.000^\circ\text{C}$  e la pressione di 10 milioni di atmosfere. Il nucleo è circondato da uno spesso strato di idrogeno liquido metallico, seguito da uno strato liquido di idrogeno molecolare ed elio che si trasformano in gas all'aumentare dell'altitudine. Lo strato più esterno si estende su 1.000 km e consiste in un'atmosfera gassosa. Saturno, al pari di Giove, irradia radiazione infrarossa energeticamente più che doppia rispetto a quella che riceve dal Sole. Solo una parte di questa energia è attribuibile al meccanismo di Kelvin-Helmholtz; un ulteriore meccanismo che spiegherebbe il calore generato è quello di una pioggia di elio al suo interno: goccioline d'elio, più pesante dell'idrogeno, sprofondano nell'oceano liquido sottostante e comprimendosi, liberano calore che per convezione migra verso l'alto fino all'atmosfera, dove può sfuggire nello spazio esterno.



**Struttura interna di Saturno.**

## Atmosfera

L'atmosfera esterna di Saturno è composta per il 96,3% da idrogeno e per il 3,25% da elio. La percentuale di elio è notevolmente minore rispetto all'abbondanza di questo elemento nel Sole. Le quantità di elementi più pesanti dell'elio non sono note con precisione; la massa degli elementi pesanti è stata dedotta dal modello della formazione del sistema solare ed è stata stimata, nel caso di Saturno, in 19-31 volte la massa della Terra, con una percentuale significativa situata nella regione del nucleo planetario. Nell'atmosfera di Saturno sono state rilevate anche tracce di ammoniaca, acetilene, etano, propano, fosfina e metano. Le nubi superiori sono costituite da cristalli di ammoniaca, che gli conferiscono il tipico aspetto giallognolo, mentre quelle degli strati inferiori sembrano essere composte da idro solfuro di ammonio  $\text{NH}_4\text{SH}$  o acqua. La radiazione ultravioletta del Sole provoca la fotolisi del metano negli strati superiori dell'atmosfera, causando una serie di reazioni chimiche degli idrocarburi con i prodotti risultanti trasportati verso il basso dai vortici atmosferici. Questo ciclo fotochimico è regolato dal ciclo annuale stagionale di Saturno.



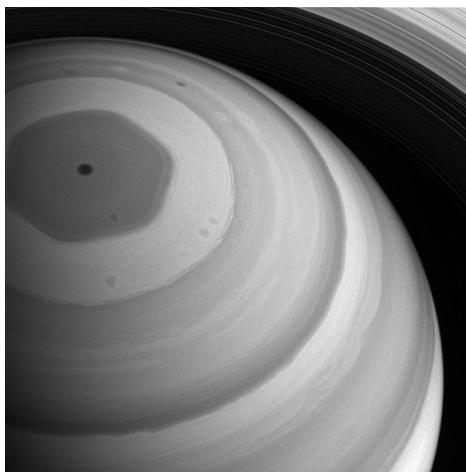
**Immagine dalla Cassini in falsi colori della Tempesta Dragone di Saturno in alto a destra.**

## Le Bande

L'atmosfera di Saturno mostra bande simili a quelle di Giove, ma molto più deboli e più larghe vicino all'equatore. Le formazioni atmosferiche macchie, nubi sono così deboli da non essere mai state osservate prima dell'arrivo delle sonde Voyager. Da allora i telescopi a terra e in orbita sono migliorati al punto da poter condurre regolari osservazioni delle caratteristiche atmosferiche di Saturno. Sono state trovate tempeste di forma ovale dalla lunga vita e molto simili a quelle di Giove. Nel 1990 il telescopio spaziale Hubble osservò un'enorme nube bianca vicino all'equatore del pianeta, e un'altra fu osservata nel 1994. La composizione delle nuvole varia con la profondità e l'aumentare della pressione. Negli strati superiori, con una temperatura compresa tra 100-160 K e pressioni tra 0,5 e 2 bar, le nuvole sono costituite da ammoniaca ghiacciata. Scendendo nell'atmosfera di Saturno si trovano le nubi di ghiaccio d'acqua, dove la pressione è compresa tra 2,5 bar e 9,5 bar e le temperature tra i 185 e 270 K. Più in basso si trova uno strato di idro solfuro di ammonio ghiacciato, a pressioni tra 3-6 bar e temperature comprese tra 290 e 235 K. Infine, negli strati inferiori, dove le pressioni sono di circa 10-20 bar e le temperature di 270-330 K, è presente una zona composta da gocce d'acqua mista ad ammoniaca in soluzione acquosa. Una sostanziale differenza fra le atmosfere di Giove e Saturno è la presenza di bande chiare e scure, specialmente presso l'equatore, molto evidenti nel primo ma estremamente soffuse e poco contrastate nell'altro. Il motivo è un più spesso strato di foschia che sovrasta la parte dell'alta atmosfera di Saturno, probabilmente causata dalla minore temperatura 130 K nell'alta atmosfera, che favorisce la formazione di nubi a una profondità maggiore rispetto a Giove. Ciò nonostante, l'atmosfera saturniana è percorsa da venti fortissimi, che soffiano fino a 1.800 km/h presso l'equatore. Inoltre sono presenti cicloni, soprattutto alle alte latitudini, dalla durata relativamente breve, come quello ripreso dal telescopio spaziale Hubble nel 1990, tipico esempio di Grande Macchia Bianca, tempeste temporanee che si formano durante le estati saturniane nell'emisfero nord, e osservate anche nel 1876, 1903, 1933 e 1960, non presenti durante il passaggio delle sonde Voyager.

## Esagono

Negli anni ottanta le due sonde del Programma Voyager fotografarono una struttura esagonale presente nei pressi del polo nord del pianeta, alla latitudine 78° N, struttura che è stata osservata successivamente anche dalla sonda Cassini. Ciascun lato dell'esagono misura circa 13.800 km, più del diametro della Terra. L'intera struttura, unica nel sistema solare, ruota in un periodo di 10 ore 39 minuti e 23 secondi, equivalente al periodo di rotazione del campo di emissioni radio, che si presume essere pari al periodo di rotazione delle parti interne di Saturno. La struttura esagonale non si muove in longitudine come invece fanno le altre nubi nell'atmosfera visibile e sembra essere piuttosto stabile nel tempo. Non si conoscono ancora le cause della presenza di questa forma geometrica regolare, ma sembra che non ci sia un collegamento con la radio-emissione di Saturno e con la sua attività delle aurore polari.



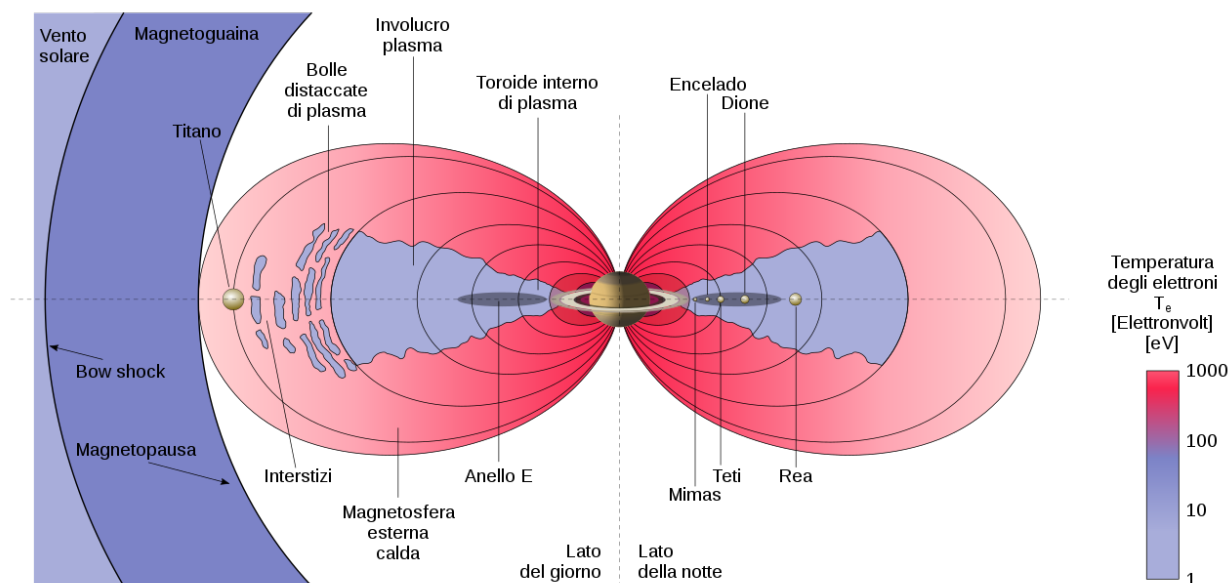
**Il polo nord di Saturno ripreso da Cassini il 9 settembre 2016: si vede perfettamente la conformazione esagonale delle sue nubi.**

## Ciclone del polo Sud

Il telescopio spaziale Hubble tra il 1997 e il 2002 osservò nei pressi del polo sud una corrente a getto, ma nessuna struttura paragonabile all'esagono del polo nord. Nel novembre 2006 la NASA ha riferito che, tramite immagini della sonda Cassini, è stato osservato un uragano centrato nel polo sud, con un occhio del ciclone ben definito. La scoperta ha rivestito una notevole importanza perché non erano mai stati osservati nel sistema solare, Terra a parte, cicloni con l'occhio così definito, nemmeno quando la sonda Galileo osservò da vicino la Grande Macchia Rossa di Giove. Il ciclone potrebbe esistere da miliardi di anni, ha la grandezza circa della Terra e al suo interno i venti soffiano a 550 km/h, vale a dire a velocità doppia rispetto a un uragano terrestre di categoria 5.

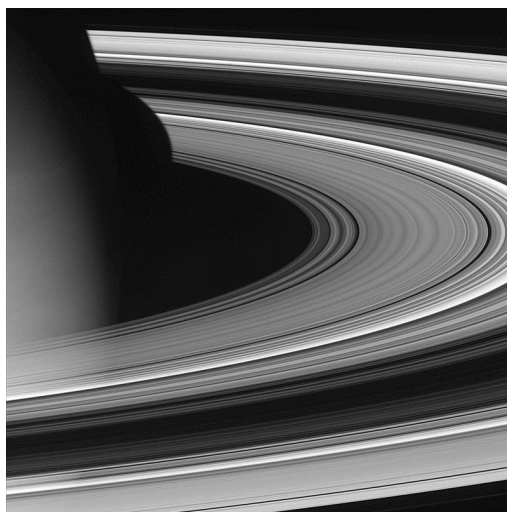
## Campo Magnetico

L'esistenza della magnetosfera di Saturno è stata accertata dalla sonda Pioneer 11 nel 1979. Di semplice forma simmetrica, la sua intensità all'equatore è di 0,2 gauss 20  $\mu\text{T}$ , circa un ventesimo di quello di Giove, e anche leggermente più debole del campo magnetico terrestre. Quando la Voyager 2 entrò nella magnetosfera di Saturno, l'intensità del vento solare era alta e la magnetosfera si estendeva solo fino a 19 raggi saturniani, o 1,1 milioni di chilometri. La sua origine, come per il pianeta Giove, è dovuta allo strato di idrogeno liquido all'interno del pianeta, dove si producono frequenti scariche elettriche, e all'elevata velocità di rotazione. Un altro fattore che spiega la sua debole magnetosfera deriva dall'orientamento della stessa, che è quasi coincidente con l'asse di rotazione del pianeta, con uno scarto di solo  $1^\circ$ , contro i  $10^\circ$  di Giove. La magnetosfera è composta da fasce di radiazione a forma di toroide nelle quali si ritrovano elettroni e nuclei atomici ionizzati. Il tutto si estende per oltre 2 milioni di chilometri e anche oltre nella direzione opposta a quella del Sole. L'interazione tra la magnetosfera e la ionosfera provoca aurore polari che circondano i poli. Queste aurore sono state fotografate anche dal telescopio spaziale Hubble. Altre interazioni dovute al campo magnetico sono state osservate tra i suoi satelliti: una nube composta da atomi di idrogeno che va dall'orbita di Titano fino all'orbita di Rea e un disco di plasma, anche questo formato da idrogeno e ioni di ossigeno, che si estende dall'orbita di Teti fino quasi all'orbita di Titano.



Il campo magnetico di Saturno

## Anelli



**Gli anelli planetari di Saturno, visti dalla sonda Cassini.**

Saturno possiede un sistema di anelli planetari, composti da milioni di piccoli oggetti ghiacciati, della grandezza che varia dal micrometro al metro, orbitanti attorno al pianeta sul suo piano equatoriale, e organizzati in un anello piatto. Poiché l'asse di rotazione di Saturno è inclinato rispetto al suo piano orbitale, anche gli anelli risultano inclinati. Questa natura granulare degli anelli fu dimostrata per via teorica fin dal 1859 dal fisico scozzese James Clerk Maxwell. Gli anelli incominciano a un'altezza di circa 6.600 km dalla sommità delle nubi di Saturno e si estendono fino a 120.000 km, poco meno di un terzo della distanza Terra-Luna. Il loro spessore si pensa essere mediamente pari ad appena 10 metri. La loro scoperta è dovuta a Christiaan Huygens, nel 1655; in precedenza già Galileo Galilei aveva notato delle insolite protuberanze ai lati del pianeta, ma la scarsa potenza del suo telescopio e la particolare posizione di Saturno all'epoca, con gli anelli disposti di taglio per un osservatore terrestre e quindi difficilmente visibili, non gli avevano permesso di distinguerne la forma con chiarezza. Gli anelli sono divisi in sette fasce, separate da divisioni quasi vuote. L'organizzazione in fasce e divisioni risulta da una complessa dinamica ancora non ben compresa, ma nella quale giocano sicuramente un ruolo i cosiddetti satelliti pastori, lune di Saturno che orbitano all'interno o subito fuori dell'anello. L'origine degli anelli è sconosciuta. Ci sono due ipotesi principali al riguardo: che siano il risultato della distruzione di un satellite di Saturno, provocata da una collisione con una cometa o con un altro satellite, oppure che siano un avanzo del materiale da cui si formò Saturno che non è riuscito ad assemblarsi in un corpo unico. Parte del ghiaccio della parte centrale degli anelli proviene dalle eruzioni del crio vulcanismo di Encelado. In passato gli astronomi pensavano che gli anelli si fossero formati assieme al pianeta miliardi di anni fa; tuttavia, studi più recenti sembrano suggerire che l'età degli anelli sia probabilmente solo di alcune centinaia di milioni di anni.

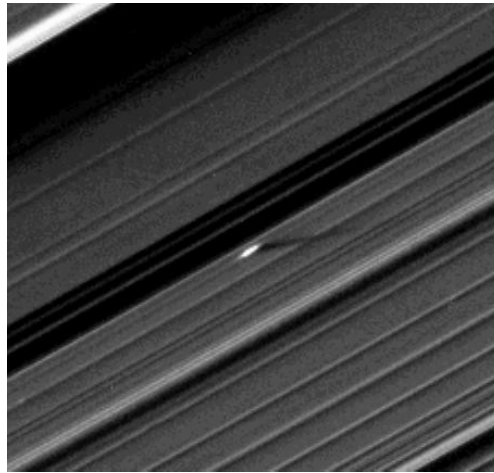


**Anelli di Saturno a colori naturali.**



## Composizione

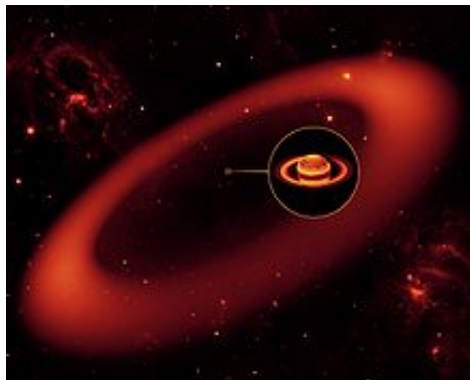
La composizione degli anelli principali, i primi quattro scoperti, anello A, B, C e D è per più del 99% di acqua pura in forma di agglomerati di ghiaccio, che li dota di una brillantezza notevole, dalla grandezza variabile mediamente tra 1 centimetro e 10 metri. Lo spessore degli anelli varia da 10 metri a un chilometro, apparendo quindi sottili all'osservazione. La densità di queste particelle varia da anello ad anello e anche all'interno dell'anello stesso, passando da valori di 40-140 grammi per centimetro quadrato a valori di circa zero in quelle che vengono definite divisioni o separazioni: spazi vuoti che separano gli anelli o all'interno di un anello, creati probabilmente da un gioco di risonanze gravitazionali dei satelliti pastori. Alcuni agglomerati di ghiaccio più massicci possono alterare lievemente l'uniformità dell'anello. Agglomerati dell'ordine di centinaia di metri vengono definiti mini lune, moon let in inglese e non sono visibili al telescopio e nemmeno alle sonde che finora hanno visitato il pianeta, bensì creano delle perturbazioni che generano dei giochi di luce e ombra visibili solo in determinati periodi dell'anno saturniano. La NASA stima che gli anelli potrebbero nascondere milioni di mini lune.



**Moonlet che genera degli effetti d'ombra visibili sull'anello A, immagine ripresa dalla sonda Cassini nel 2009.**

## Anello di Febe

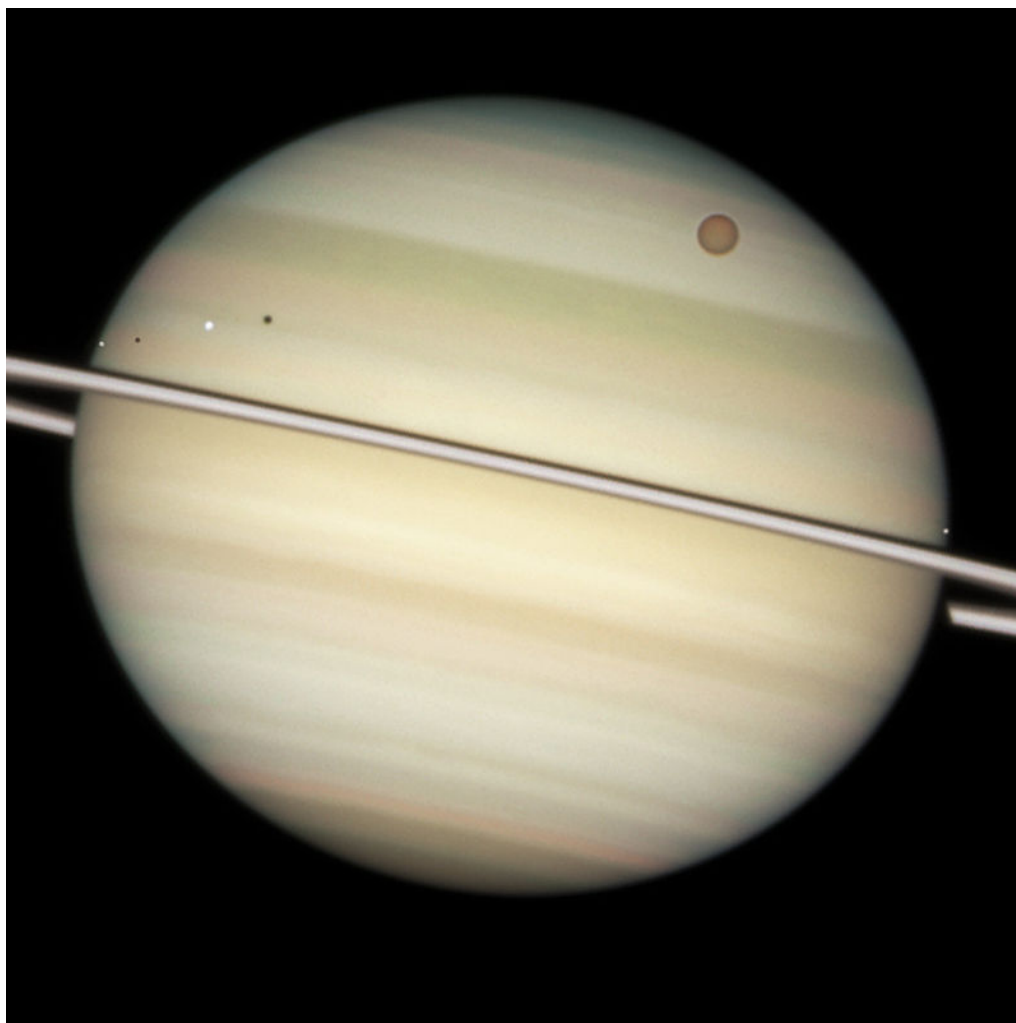
Nell'ottobre del 2009 grazie al telescopio spaziale Spitzer è stato scoperto il più grande anello di Saturno mai osservato in precedenza. Questo enorme anello si trova alla periferia del sistema di Saturno, in un'orbita inclinata di 27° rispetto al piano del sistema dei sette anelli principali. Il nuovo anello, che si ritiene sia originato da Febe, è composto di ghiaccio e di polvere allo stato di particelle alla temperatura di -157 °C. Pur essendo molto esteso questo anello è rilevabile solo nello spettro infrarosso, perché non riflette la luce visibile. La massa dell'anello comincia a una distanza di circa 6 milioni di chilometri dal pianeta e si estende fino a 11,9 milioni di chilometri. La scoperta potrebbe essere decisiva per risolvere il problema legato alla colorazione del satellite Giapeto: gli astronomi ritengono che le particelle dell'anello, che orbitano intorno a Saturno con moto retrogrado proprio come Febe, vadano a collidere contro la superficie di Giapeto quando esso, durante il suo moto orbitale, attraversa l'anello.



**Immagine artistica dell'anello più esterno di Saturno.**

## Satelliti Naturali

Saturno possiede un elevato numero di satelliti naturali, 82, 12 dei quali scoperti solo nel 2005 grazie al telescopio giapponese Subaru e altri 15 scoperti tra il 2006 e il 2009. A maggio 2014 solo 53 di essi hanno un nome proprio. È difficile quantificare con precisione il loro numero, perché tecnicamente tutti i minuscoli corpi ghiacciati che compongono gli anelli di Saturno sono da considerarsi satelliti. Molte delle lune sono piuttosto piccole: 34 di esse hanno un diametro minore di 10 km, mentre 14 hanno diametro inferiore ai 50 km. Tradizionalmente, la maggior parte delle lune di Saturno portano i nomi dei Titani della mitologia greca. Quando nel XX secolo i nomi dei Titani furono esauriti, le lune presero il nome da personaggi della mitologia greca e romana o da giganti di altre mitologie. Tutte le lune irregolari eccetto Febe hanno nomi di divinità della mitologia inuit, di quella celtica e di giganti di ghiaccio della mitologia norrena. Il satellite saturniano di gran lunga più interessante è Titano, l'unico satellite del sistema solare a possedere una densa atmosfera e che da solo costituisce oltre il 95% della massa orbitante attorno a Saturno, anelli compresi. Titano fu anche il primo satellite saturniano scoperto, nel 1655, da Christiaan Huygens. Seguirono, tra il 1671 e il 1684, le scoperte di Teti, Dione, Rea e Giapeto da parte di Giovanni Cassini. Passò poi più di un secolo prima della scoperta, nel 1789, di Mimas e Encelado da parte di William Herschel, mentre Iperione fu scoperto nel 1848 da W.C. Bond, G.P. Bond e William Lassell., e fu l'ultimo scoperto con l'osservazione diretta tramite telescopi ottici. Già Febe, nel 1899, fu scoperto da William Henry Pickering mediante l'uso di lastre fotografiche a lunga esposizione. Nel 1966 venne scoperto Giano, che dette molti grattacapi agli astronomi del tempo: i dati acquisiti dalle osservazioni davano valori incompatibili relativamente al periodo e alla distanza da Saturno. Solo nel 1978 si ipotizzò che potesse esistere un altro satellite naturale a condividere la stessa orbita, unica spiegazione possibile del fenomeno osservato. Nel 1980 la sonda Voyager 1 confermò l'esistenza di Epimeteo nella stessa orbita di Giano, unico caso nel sistema solare di due satelliti che condividono la stessa orbita. Il gran numero di satelliti e la presenza degli anelli rende molto complessa la dinamica del sistema di Saturno. Gli anelli sono influenzati dai movimenti dei satelliti, che causano marcate divisioni o lacune, e la forza di marea con Saturno porta effetti perturbanti sulle orbite dei satelliti minori. I satelliti di Saturno possono essere divisi a grandi linee in dieci gruppi a seconda delle orbite attorno al pianeta. Oltre alle piccole lune degli anelli, ai satelliti pastori, alle lune co-orbitali e alle lune irregolari, i grandi satelliti sono sostanzialmente divisi in interni ed esterni: i satelliti interni orbitano all'interno del tenue Anello E e tra questi sono compresi Mimas, Encelado, Teti e Dione, le cui orbite sono contraddistinte da una bassa eccentricità orbitale e un'inclinazione orbitale inferiore a  $1,5^\circ$ , con l'eccezione di Giapeto, che ha un'inclinazione di  $7,57^\circ$ . Le grandi lune esterne, Rea, Titano, Iperione e Giapeto, orbitano di là dall'Anello E e in genere hanno un'inclinazione e un'eccentricità orbitale decisamente più elevata. Tra le lune irregolari la più grande è Febe, che ha un diametro di 220 km, un semiasse maggiore di quasi 1,3 milioni di km e un periodo orbitale di 18 mesi. Per oltre un secolo, fino al 2000, si è creduto che fosse la luna più distante da Saturno, fino a quando furono scoperte diverse altre piccole lune più esterne. Ritenuto in passato un asteroide, la sua natura fu svelata dalla sonda Cassini: è un corpo composto da ghiaccio e roccia, simile a Plutone e Tritone, e faceva probabilmente parte di quella massa di corpi ghiacciati che ora formano la Fascia di Kuiper. Febe rimase intrappolato nel campo gravitazionale di Saturno quando le interazioni gravitazionali dei giganti gassosi, e in particolare di Giove, espulsero la maggior parte dei planetesimi ghiacciati verso il sistema solare esterno.

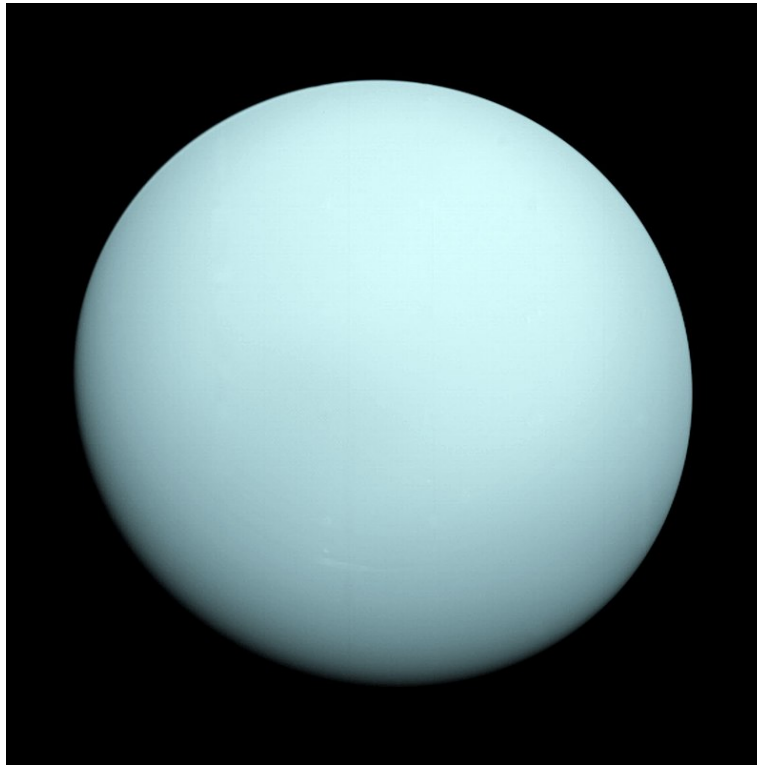


**Il transito sul disco di Saturno di quattro delle sue lune, riprese dal telescopio spaziale Hubble. Da sinistra a destra, nei pressi del piano degli anelli, si scorgono Encelado, Dione e Mimas, mentre Titano è ben visibile in alto a destra sul disco di Saturno.**



**Schema degli anelli e dei satelliti di Saturno.**

## Settimo Pianeta Urano



Fotografia di Urano fatta dalla sonda Voyager 2 nel 1986

Urano è il settimo pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole, il terzo per diametro e il quarto per massa. Il suo simbolo astronomico è  $\Upsilon$  occasionalmente  $\text{♅}$ , stilizzazione della lettera H iniziale di William Herschel. Porta il nome del dio greco del cielo Urano Οὐρανός in greco antico, padre di Crono Saturno, a sua volta padre di Zeus Giove. Sebbene sia visibile anche a occhio nudo, come gli altri cinque pianeti noti fin dall'antichità, fino al XVIII secolo non fu riconosciuto come tale e considerato una stella a causa della sua bassa luminosità e della sua orbita particolarmente lenta e venne identificato come qualcosa di diverso da una stella soltanto il 13 marzo 1781 da William Herschel. Una curiosità riguardo alla sua scoperta è che essa giunse del tutto inaspettata: i pianeti visibili a occhio nudo fino a Saturno erano conosciuti da millenni e nessuno sospettava l'esistenza di altri pianeti, fino alla scoperta di Herschel, che notò che una particolare stella poco luminosa sembrava spostarsi. Da quel momento in poi nessuno fu più sicuro del reale numero di pianeti del nostro sistema solare. La composizione chimica di Urano è simile a quella di Nettuno ma differente rispetto a quella dei giganti gassosi più grandi Giove e Saturno. Per questa ragione gli astronomi talvolta preferiscono riferirsi a Urano e Nettuno trattandoli come una classe separata, i giganti ghiacciati. L'atmosfera del pianeta, sebbene sia simile a quella di Giove e Saturno per la presenza abbondante di idrogeno ed elio, contiene una proporzione elevata di ghiacci, come l'acqua, l'ammoniaca e il metano, assieme a tracce di idrocarburi. Quella di Urano è anche l'atmosfera più fredda del sistema solare, con una temperatura minima che può scendere fino a 49 K  $-224,2^{\circ}\text{C}$ . Possiede una complessa struttura di nubi ben stratificata, in cui si pensa che l'acqua si trovi negli strati inferiori e il metano in quelli più in quota. L'interno del pianeta al contrario sarebbe composto principalmente di ghiacci e rocce. Una delle caratteristiche più insolite del pianeta è l'orientamento del suo asse di rotazione. Tutti gli altri pianeti hanno il proprio asse quasi perpendicolare al piano dell'orbita, mentre quello di Urano è quasi parallelo. Ruota quindi esponendo al Sole uno dei suoi poli per metà del periodo di rivoluzione, con conseguente estremizzazione delle fasi stagionali. Inoltre, poiché l'asse è inclinato di poco più di  $90^{\circ}$ , la rotazione è tecnicamente retrograda: Urano ruota nel verso opposto rispetto a quello di tutti gli altri pianeti del sistema solare eccetto Venere anche se, vista l'eccezionalità dell'inclinazione, la rotazione retrograda è solo una nota minore. Il periodo della sua

rivoluzione attorno al Sole è di circa 84 anni terrestri. L'orbita di Urano si discosta molto poco dall'eclittica ha una inclinazione di 0,7°. Come gli altri pianeti giganti, Urano possiede un sistema di anelli planetari, una magnetosfera e numerosi satelliti; visti dalla Terra, a causa dell'inclinazione del pianeta, i suoi anelli possono talvolta apparire come un sistema concentrico che circonda il pianeta, oppure, come nel 2007 e 2008, apparire di taglio. Nel 1986 la sonda Voyager 2 mostrò Urano come un pianeta senza alcun segno distintivo sulla sua superficie, senza le bande e tempeste tipiche degli altri giganti gassosi. Tuttavia, osservazioni successive condotte dalla Terra hanno mostrato delle evidenze di cambiamenti legati alle stagioni e un aumento dell'attività climatica quando il pianeta si è avvicinato all'equinozio.

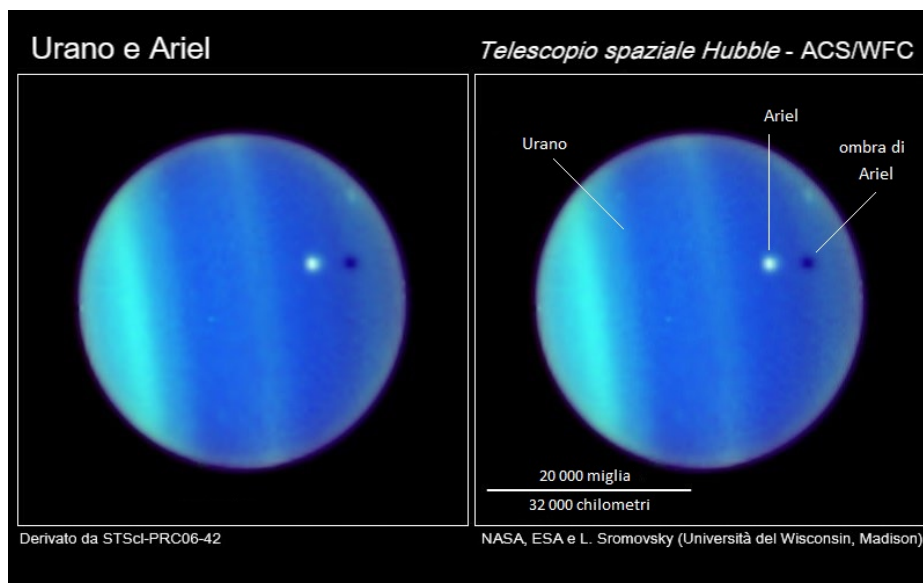
<b>Parametri Orbitali, Dati Fisici e Osservativi</b>					
<b>Orbitali</b>		<b>Fisici</b>		<b>Osservativi</b>	
<i>Semiasse</i>	19,20 UA	<i>Diamet. equat.</i>	51.118 km	<i>Magn. app. min</i>	
<i>Perielio</i>	18,32 UA	<i>Superficie</i>	8,12x10 <sup>9</sup> km <sup>2</sup>	<i>Magn. app med</i>	5,5
<i>Afelio</i>	20,08 UA	<i>Period. Rotaz.</i>	17h 14 min	<i>Magn. app max</i>	5,32
<i>CRF orbitale</i>	120,52 UA	<i>Period. Orbit.</i>	84,02 anni		
<i>Inclinazione</i>	97,77°	<i>Incl su Eclittica</i>	0,77°		
<i>Satelliti</i>	27	<i>Temp. max</i>	-205 °C		
<i>Anelli</i>	13	<i>Temp. med.</i>	-214 °C		
		<i>Temp. min.</i>	-218 °C		
		<i>Press. Atmosf</i>	1200 hPa		

**UA = distanza Terra/Sole media pari a km149.597.870.**

## Osservazioni

Il pianeta manifesta fluttuazioni nella luminosità, ben documentate, determinate sia da cambiamenti fisici dell'atmosfera, sia da fattori geometrici e prospettici. La luminosità di Urano è influenzata dalla sua distanza dal Sole, dalla distanza dalla Terra e dalla particolare vista che offre al nostro pianeta: Urano appare leggermente più grande e più luminoso quando mostra le regioni polari alla Terra. Inoltre è stata individuata una correlazione tra l'attività solare e la luminosità del pianeta: durante i periodi di intensa attività solare, le fluttuazioni nella luminosità del pianeta sono più pronunciate. Tra il 1995 e il 2006 la magnitudine apparente di Urano è variata fluttuando tra +5,5 e +6,0, ponendolo giusto al di sopra del limite della visibilità a occhio nudo, intorno +6,5. All'opposizione, è visibile come una debole stella quando il cielo è scuro e può essere osservato anche in ambiente urbano usando un binocolo; il binocolo è più appropriato rispetto al telescopio per l'osservazione amatoriale, in quanto permette più facilmente di riconoscere i pattern di stelle vicine per la localizzazione del pianeta. Dalla Terra ha un diametro angolare compreso tra 3,4 e i 3,7 secondi d'arco. Con un telescopio a 100 ingrandimenti si riesce a intravedere la forma di un disco, fino ad arrivare a 500× dove raggiunge le dimensioni angolari della Luna. Anche usando grossi telescopi non è possibile scorgere alcun dettaglio del suo disco. A ogni modo osservazioni all'infrarosso della sua atmosfera mediante l'utilizzo di ottiche adattive e del telescopio spaziale Hubble hanno riportato dati interessanti nei vari anni dopo il passaggio della sonda Voyager 2. L'osservazione dei satelliti del pianeta è difficoltosa. Oberon e Titania possono essere individuati con un telescopio da 8", in un cielo particolarmente buio. Aperture di 12-14" e 16" dovrebbero permettere l'individuazione di Ariel e Umbriel rispettivamente. Miranda può essere osservata solo con grandi telescopi.





**Transito di Ariel sul disco del pianeta, nel 2007. Immagine ripresa dal telescopio spaziale Hubble**

## **Storia delle Osservazioni**

### **Scoperta e scelta del nome**

Urano è il primo pianeta scoperto in tempi moderni; era già stato osservato in molte occasioni precedentemente, ma fu sempre scambiato per una stella. La prima osservazione documentata è quella del 1690 di John Flamsteed, che lo catalogò come stella 34 della costellazione del Toro. Flamsteed osservò Urano altre due volte, nel 1712 e nel 1715. James Bradley lo osservò nel 1748, 1750 e 1753, Tobias Mayer nel 1756. Pierre Charles Le Monnier lo osservò quattro volte nel 1750, due nel 1768, sei nel 1769 e un'ultima volta nel 1771. Quest'ultimo, se avesse elaborato puntigliosamente le sue osservazioni, avrebbe potuto riconoscere il moto proprio dell'oggetto, ma fu vittima del suo stesso disordine: una delle sue osservazioni fu trovata segnata su una carta da pacchi usata per conservare la cipria per capelli. Questi astronomi non sospettavano l'esistenza di altri pianeti oltre Saturno, semplicemente perché nessuno l'aveva mai presa in considerazione. Urano fu scoperto per caso da Sir William Herschel il 13 marzo 1781, quando notò che un'anomima stellina sembrava spostarsi nel cielo. Herschel, tuttavia, inizialmente non riconobbe nell'oggetto che aveva osservato un pianeta: rese pubblica la notizia soltanto il 26 aprile 1781, registrandolo come cometa Account of a Comet di Mr. Herschel, F. R. S.; comunicato dal Dr. Watson, Jun. of Bath, F. R. S., Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Volume 71, pp. 492–501. Herschel in origine gli diede il nome di Georgium Sidus stella di Giorgio in onore del re di Gran Bretagna Giorgio III. Nel 1783, quando fu provato che si trattava di un pianeta, Herschel lo ribattezzò Georgian Planet pianeta di Giorgio. Il nome però non fu accettato fuori della Gran Bretagna. Jérôme Lalande propose, nel 1784, di chiamarlo Herschel e creò anche il simbolo del pianeta un globo sormontato dall'iniziale H; la sua proposta fu prontamente accettata dagli astronomi francesi. Erik Prosperin, di Uppsala, propose i nomi di Astrea, Cibebe e Nettuno ora detenuti da due asteroidi e un pianeta, rispettivamente: 5 Astraea, 65 Cybele e Nettuno. Anders Johan Lexell, di San Pietroburgo, propose come compromesso il nome Nettuno di Giorgio III e Nettuno di Gran Bretagna. Daniel Bernoulli, da Berlino, suggerì Hypercronius e Transaturnis. Georg Christoph Lichtenberg, da Gottinga, sostenne Astrea, la dea menzionata da Ovidio Metamorfosi I:150 che per ultima lasciò la Terra tradizionalmente associata alla Vergine. Fu proposto anche il nome di Minerva. Infine, Johann Elert Bode, come editore del Berliner Astronomisches Jahrbuch, optò per Urano. Maximilian Hell usò tale nome nella prima effemeride pubblicata a Vienna. Esaminando le pubblicazioni del Monthly Notices of the

Royal Astronomical Society dal 1827 si nota che il nome Urano era già il più comunemente usato dagli astronomi britannici. Il nome assegnato dallo scopritore fu usato in modo saltuario e solo da alcuni britannici. L'ultimo a recepire il nome Urano è stato lo HM Nautical Almanac Office nel 1850. Dopo il riconoscimento di Urano come pianeta, divenne possibile ipotizzare l'esistenza di altri pianeti del sistema solare che prima non erano mai stati cercati. In particolare, questa scoperta sembrò un'ulteriore conferma della legge di Titius-Bode, una formula empirica per determinare i semiassi maggiori dei pianeti in orbita attorno al Sole, e spinse casualmente venti anni dopo gli astronomi a cercare e trovare un nuovo corpo celeste tra le orbite di Giove e Marte: Cerere.



**William Hersche**

## **XX e XXI secolo**

Le osservazioni di Urano con telescopi da Terra e in orbita sono rese difficoltose dalla lontananza del pianeta dalla Terra; esse non permettono di rivelare molti dettagli, come avviene invece per i pianeti più vicini. Dopo la scoperta iniziale, sono state dunque poche le osservazioni che hanno portato a scoperte significative. Nel 1948 Kuiper scoprì Miranda, la più piccola e l'ultima delle cinque grandi lune sferiche di Urano, utilizzando un telescopio ottico di due metri. Nel 1977 Elliot e Mink scoprirono un sistema di anelli tramite un osservatorio volante. Dal 2003, le osservazioni dal telescopio spaziale Hubble permisero di individuare elementi aggiuntivi, come maggiori dettagli sugli anelli, nuove piccole lune ed elementi dell'atmosfera. L'osservazione all'infrarosso dai telescopi Keck nel 2014 permisero di individuare grosse tempeste di lunga durata nell'atmosfera.

## **Missioni Spaziali**

L'esplorazione di Urano è avvenuta soltanto per mezzo della sonda Voyager 2 e non sono programmate al momento ulteriori missioni esplorative in loco. Per ovviare alla mancanza di informazioni dirette, le variazioni nell'atmosfera del pianeta sono studiate attraverso campagne di osservazione telescopica, in particolare utilizzando la Camera planetaria a grande campo a bordo del telescopio spaziale Hubble. L'esplorazione di Urano, come anche quella di Nettuno, è resa difficoltosa dalle grandi distanze che separano il pianeta dalla Terra e dal Sole. Ogni missione deve essere dotata di un sistema di alimentazione in grado di fornire energia alla sonda senza la possibilità di conversione dell'energia solare attraverso l'uso di pannelli fotovoltaici. Attualmente, l'unica fonte praticabile di energia è un generatore termoelettrico a radioisotopi. Dopo la missione Voyager, le principali agenzie spaziali hanno concentrato per decenni le proprie risorse nell'esplorazione dei sistemi di Giove e di Saturno, mentre lo studio di Urano e di Nettuno non è stato ritenuto prioritario. Le proposte per missioni verso Urano sono in fase di valutazione

scientifica e non partiranno prima del 2020; tra le principali in fasi di studio ci sono la missione europea MUSE e quella statunitense OCEANUS; per il futuro remoto, invece, sono in fase di proposta una missione europea con due sonde gemelle per Urano e Nettuno, ODINUS, per il 2034, e una in collaborazione NASA-ESA per il 2037, Uranus Pathfinder.

## **Il sorvolo di Voyager 2**

La sonda Voyager 2 raggiunse il massimo avvicinamento al pianeta il 24 gennaio 1986, a una distanza di circa 81.500 km. Le osservazioni durarono solo sei ore, ma hanno permesso agli astronomi di imparare su Urano molto più di quanto avessero appreso in più di 200 anni di osservazioni dalla Terra. Le prime analisi condotte sui dati furono tuttavia un'enorme delusione: non veniva riscontrata la presenza di fasce parallele né di nubi, al contrario di quanto era stato osservato dalla Terra. L'atmosfera di un colore azzurro-verde era uniforme e completamente priva di dettagli. Fu solo grazie a un trattamento delle immagini che apparvero sia le nubi sia le altre formazioni. La sonda scoprì nuove lune, inviò a Terra le prime immagini degli anelli e scoprì inoltre attività geologica sulle lune maggiori: depositi scuri in fondo a crateri ghiacciati indicavano la presenza di acqua sporca dovuta ad attività vulcanica.



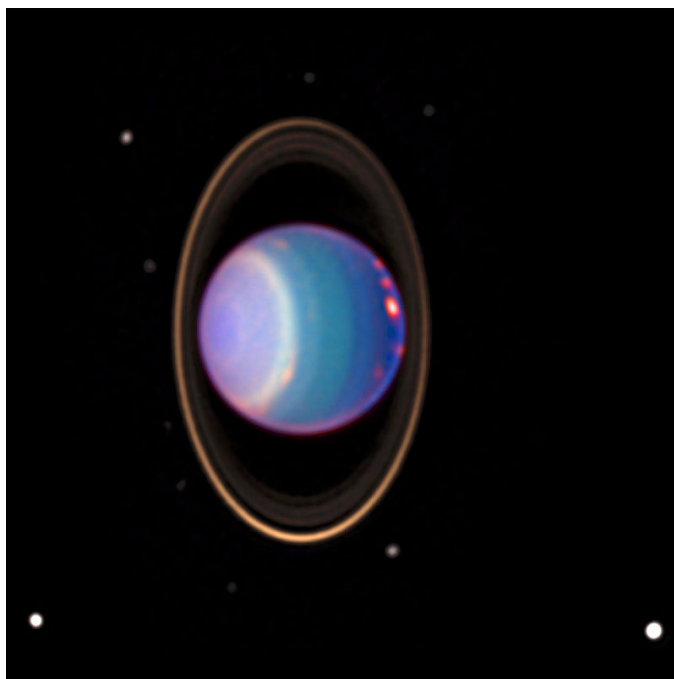
**Ultima immagine di Urano ripresa dalla Voyager 2 quando ha oltrepassato il pianeta per proseguire verso Nettuno**

## **Parametri Orbitali e Rotazione**

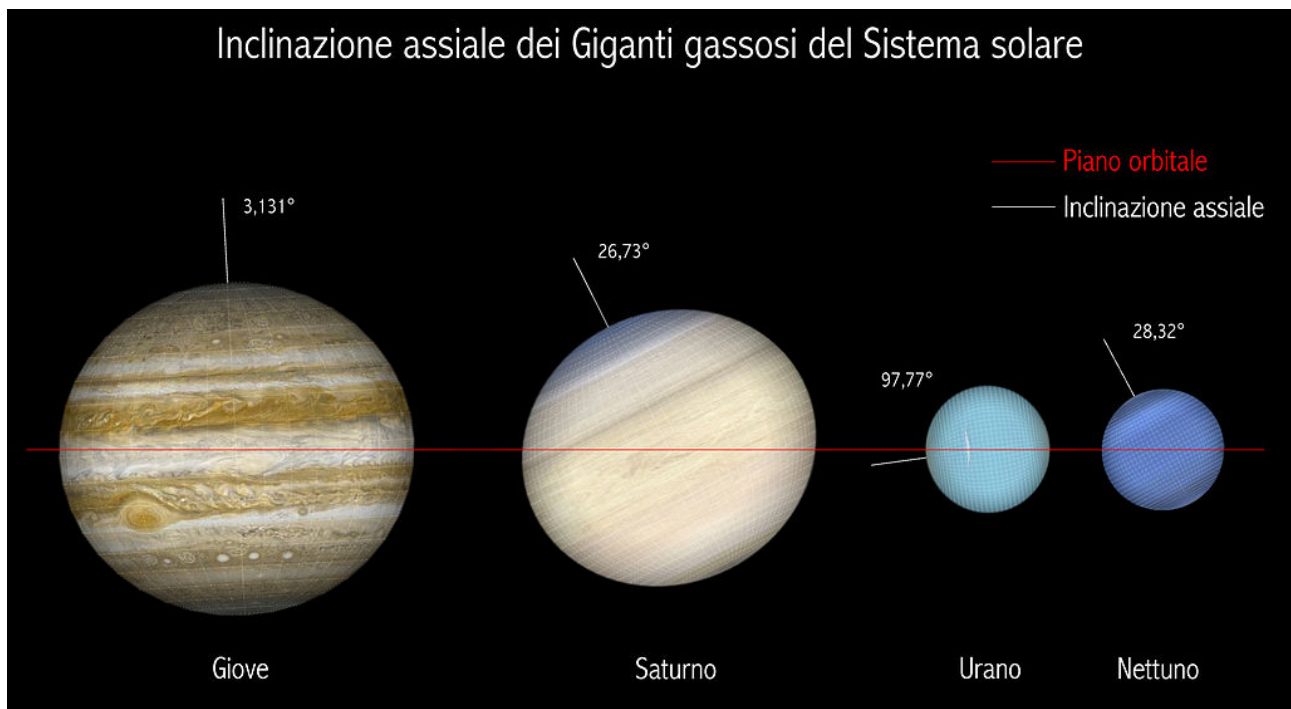
Urano ruota attorno al Sole in 84 anni terrestri. La sua distanza media dal Sole è di circa 3 miliardi di chilometri circa 19 UA. L'intensità della luce solare su Urano è quindi circa 1/400 che sulla Terra. Gli elementi orbitali furono calcolati per la prima volta nel 1783 da Pierre Simon Laplace. Le discrepanze tra l'orbita predetta e quella osservata portarono nel 1841 John Couch Adams a ritenere che essa fosse dovuta alla influenza gravitazionale di un altro pianeta al di là di Urano. Nel 1845 Urbain Le Verrier iniziò la propria ricerca di un altro pianeta nelle vicinanze dell'orbita di Urano. Il 23 settembre 1846 Johann Galle scoprì un nuovo pianeta, più tardi chiamato Nettuno, nella posizione prevista da Le Verrier. Il periodo di rotazione di Urano è di 17 ore e 14 minuti, in senso retrogrado. Come in tutti i pianeti giganti gassosi, la sua atmosfera superiore è soggetta a forti venti aventi stessa direzione del moto di rotazione. Ad alcune latitudini, come a circa 60 gradi sud, l'atmosfera visibile ruota molto più velocemente del pianeta, completando una rotazione in meno di 14 ore.

## Inclinazione Assiale

La principale particolarità di Urano sta nell'inclinazione del suo asse, che misura  $97,77^\circ$  rispetto al piano dell'orbita; pertanto, l'asse di rotazione di Urano giace quasi sul suo piano orbitale. Di conseguenza, ognuno dei due poli è diretto verso il Sole per metà dell'orbita, e per la successiva metà dell'orbita cade nella zona in ombra. Nel tratto intermedio all'inversione dei due poli rispetto al Sole, questo sorge e tramonta intorno all'equatore, come avviene per la maggior parte degli altri pianeti. Il polo sud di Urano era diretto verso il Sole al momento del fly-by della Voyager 2 nel 1986, risultando completamente illuminato. Quel polo è definito come sud in base alle convenzioni dell'Unione Astronomica Internazionale che definisce il polo nord di un pianeta o satellite il polo che punta sopra il piano del sistema solare, indipendentemente dalla direzione della rotazione del pianeta. Un risultato di questo strano orientamento è che le regioni polari di Urano ricevono energia dal Sole in maniera maggiore rispetto alle regioni prossime all'equatore. Ciononostante, Urano è più caldo all'equatore che ai poli a causa di qualche fattore attualmente sconosciuto. Sembra anche che l'estrema inclinazione dell'asse di rotazione di Urano abbia delle conseguenze meteorologiche importanti quali l'estremizzazione delle stagioni. Durante il viaggio del Voyager 2 le nubi di Urano erano estremamente deboli e miti, mentre osservazioni più recenti effettuate tramite il telescopio spaziale Hubble, risalenti al 2005, quando l'inclinazione dell'asse stava portando l'equatore nella direzione perpendicolare al Sole, hanno rilevato una presenza molto più accentuata e turbolenta di allora. La ragione dell'insolita inclinazione assiale di Urano non è nota con certezza. Si è pensato in passato che durante la formazione del sistema solare un proto pianeta con massa due volte quella terrestre sia entrato in collisione col pianeta facendone ruotare l'asse. Tuttavia, questa ipotesi non spiegherebbe perché le lune principali di Urano abbiano anch'esse un asse di rotazione di  $98^\circ$  come il pianeta e non abbiano invece conservato le orbite originarie. Successivamente si è pensato a una serie di impatti, anziché uno solo, che giustificasse l'orientamento dei satelliti ma ciò si è rivelato incompatibile col modello di Nizza. Una simulazione più recente e complessa supporterebbe la teoria dell'impatto con un proto-pianeta. L'oggetto, con massa doppia di quella terrestre, avrebbe colpito Urano in modo abbastanza violento da modificarne l'inclinazione ma non in modo tale da comprometterne l'atmosfera. Si ipotizza anche che, a seguito della collisione, tale materiale, precipitando all'interno del pianeta, ne avrebbe perturbato il campo magnetico decentrandolo e che i detriti in orbita, raggruppati in grumi di ghiaccio fuso e roccia, avrebbero successivamente formato alcune delle ventisette lune di Urano. La collisione avrebbe inoltre potuto alterare la rotazione di tutte le lune che già esistevano al momento dell'impatto.



Urano con gli anelli e i satelliti



**Inclinazione assiale dei giganti gassosi**

## Caratteristiche Chimico Fisiche

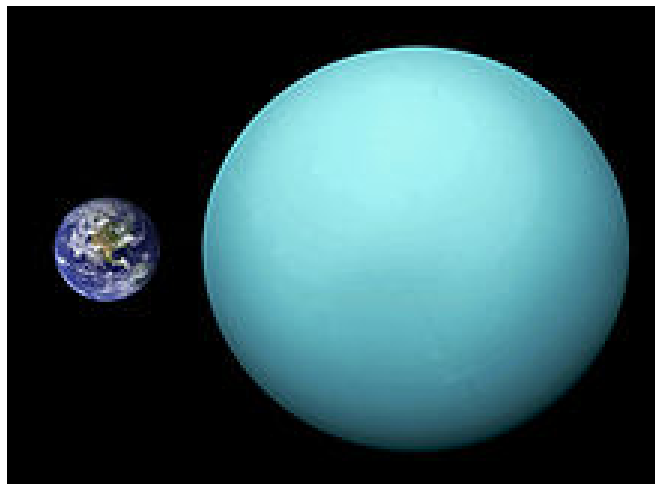
### Composizioni

Il modello standard della struttura di Urano prevede la divisione in tre strati: lo strato roccioso silicati, ferro, nichel al centro, un mantello ghiacciato nel mezzo e uno strato gassoso composto da idrogeno ed elio all'esterno. Il nucleo è relativamente piccolo, con una massa di appena  $0,55 M_{\oplus}$  e un raggio inferiore al 20% del raggio totale, mentre il mantello ha una massa 13,4 volte quella terrestre. L'atmosfera esterna ha una massa di appena  $0,5 M_{\oplus}$  ma costituisce il 20% del raggio di Urano. La densità del nucleo di Urano è di circa  $9 \text{ g/cm}^3$ , con una pressione al centro di 8 milioni di bar e una temperatura di circa  $5.000 \text{ K}$ . Il mantello non è costituito da ghiaccio nel senso convenzionale del termine, bensì da un fluido contenente acqua, ammoniaca e altre sostanze volatili. Le composizioni di Urano e Nettuno sono piuttosto diverse da quelle di Giove e Saturno, con una prevalenza dei materiali ghiacciati rispetto ai gas, e per questo motivo sono talvolta classificati come giganti di ghiaccio. Anche se il modello citato sopra è quello considerato standard, esistono altri modelli possibili, tuttavia i dati attualmente disponibili non consentono agli scienziati di determinare quale sia il modello corretto.

### Massa e Dimensioni

La massa di Urano è circa 14,5 volte quella della Terra, il che lo rende il meno massiccio dei pianeti giganti, nonostante il suo diametro, circa quattro volte quella della Terra, sia leggermente più grande di quello di Nettuno. Con una densità di  $1,27 \text{ g/cm}^3$  Urano è il secondo pianeta meno denso del sistema solare, dopo Saturno. La sua densità indica che Urano è composto principalmente di acqua, ammoniaca e metano congelati. La massa totale di ghiaccio interno di Urano non è nota con precisione, perché emergono alcune differenze a seconda del modello scelto; essa dovrebbe essere compresa tra 9,3 e 13,5 masse terrestri. L'idrogeno e l'elio costituiscono solo una piccola parte della massa totale, rispettivamente 0,5 e 1,5 masse terrestri. Il resto della massa non ghiacciata da 0,5 a 3,7 masse terrestri è costituito da materiale roccioso.





**Le dimensioni di Urano comparate con quelle della Terra**

## **Struttura Interna**

Urano non possiede una crosta solida: il gas atmosferico diventa sempre più denso procedendo verso l'interno e gradualmente si converte in liquido. In questi casi si adotta la convenzione di considerare come superficie del corpo il punto dove la pressione atmosferica è pari a 1 bar. Adottando tale convenzione, il raggio equatoriale e un raggio polare di Urano risultano pari rispettivamente a  $25.559 \pm 4$  e  $24.973 \pm 20$  km. Esso ha quindi la forma di uno sferoide oblato. Urano come Nettuno ha una struttura interna solo in parte simile a quella di Giove e Saturno perché essa non presenta un mantello di idrogeno metallico liquido che è invece presente nei due giganti gassosi grazie alle enormi pressioni che esercitano sulle loro parti interne. Urano, di massa più piccola, non esercita una pressione sufficiente alla formazione di uno strato composto di tale materia degenerare. Il nucleo roccioso di Urano è relativamente piccolo e poco massiccio; inoltre si differenzia da quello di Nettuno e degli altri pianeti giganti perché disperde poco calore: in termini astronomici esso ha un basso flusso termico. Il flusso di calore di Urano è di solo  $0,042 \pm 0,047$  W/m<sup>2</sup>, che è inferiore al flusso di calore interno della Terra di circa  $0,075$  W/m<sup>2</sup>. Di conseguenza, il calore irradiato da Urano nella banda del lontano infrarosso dello spettro è solo  $1,06 \pm 0,08$  volte l'energia solare assorbita nella sua atmosfera. Per confronto, Nettuno irradia 2,61 volte più energia nello spazio di quanto ne riceve dal Sole. Il basso irradiazione di calore dall'interno fa di Urano il pianeta più freddo del sistema solare: la temperatura più bassa registrata nella sua tropopausa è di  $49$  K  $-224$  °C. Non è chiaro esattamente il motivo per cui Urano irradia poca energia verso l'esterno. Una delle ipotesi avanzate per spiegare questa differenza rispetto altri giganti gassosi è che, quando Urano fu colpito nell'impatto col corpo che ha causato la sua peculiare inclinazione assiale, venne espulsa la maggior parte del calore interno originario, riducendo sensibilmente la temperatura del nucleo. Un'altra ipotesi è che ci sia un qualche tipo di barriera negli strati superiori che impedisce al calore del nucleo di raggiungere la superficie. Ad esempio, potrebbe esistere una convezione tra strati di diversa composizione, che inibisce il trasporto di calore verso l'esterno.

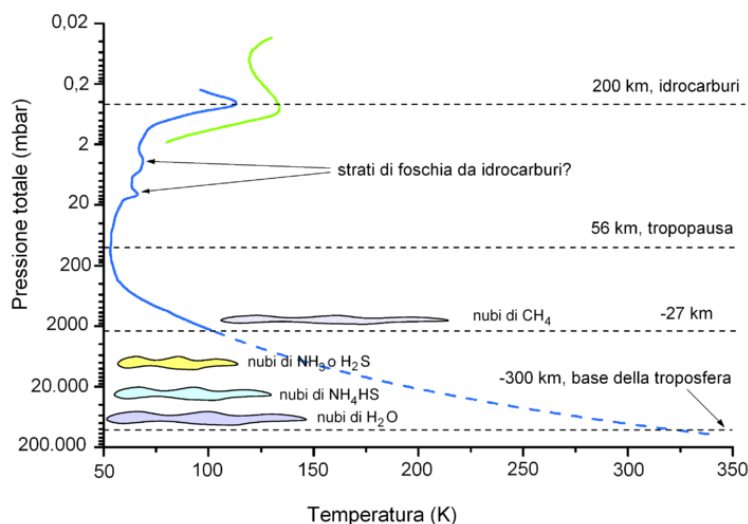
## **Atmosfera**

L'atmosfera è composta da idrogeno 83%, elio 15%, metano 2% e con tracce di acqua e ammoniaca. Le capacità degli strumenti di rilevazione permettono di raggiungere una profondità di circa 300 km al di sotto della superficie convenzionale di Urano cioè del punto in cui la pressione misura 1 bar assunta come zero altimetrico. A quella profondità si registra una pressione di 100 bar e una temperatura di 320 K. L'atmosfera può essere divisa in tre strati: la troposfera, a un'altitudine compresa tra i -300 km sotto lo zero altimetrico e 50 km, con pressioni

che variano da 100 a 0,1 bar da 10 MPa a 10 kPa, la stratosfera, ad altitudini comprese tra i 50 e i 4 000 km e pressioni tra 0,1 e  $10^{-10}$  bar da 10 kPa a 10 Pa, e la termosfera/ corona, che si estende da 4 000 km a 50 000 km sopra la superficie. Il colore ciano del pianeta è dovuto alla presenza di metano nell'atmosfera, che assorbe la luce rossa e riflette quella blu. La temperatura della superficie delle nuvole che ricoprono Urano è di circa 55 K  $-218^{\circ}\text{C}$ . Urano è talmente distante dal Sole che l'escursione termica tra l'estate e l'inverno è quasi nulla.

## Troposfera

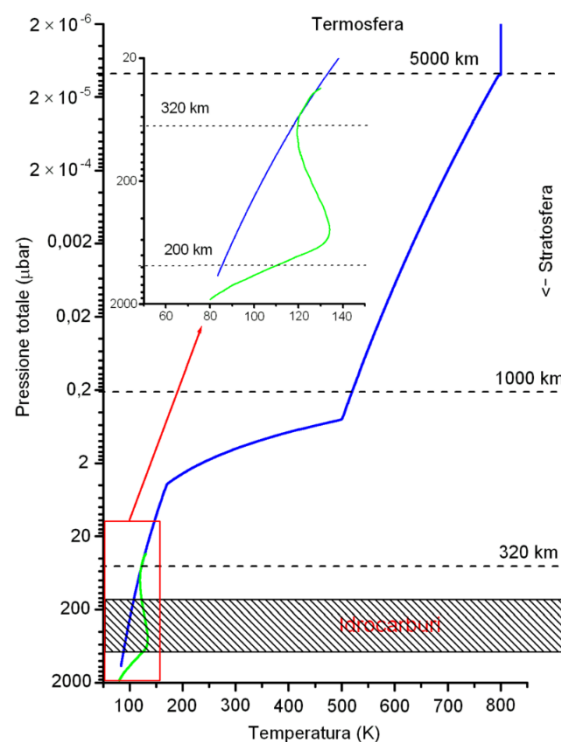
La troposfera è la regione inferiore e più densa dell'atmosfera ed è caratterizzata dalla diminuzione della temperatura con l'altezza. La sonda Voyager 2 durante il fly-by del pianeta rilevò la presenza di nubi di metano attraverso misurazioni radio durante un'occultazione, ma l'esatta struttura degli altri strati nuvolosi di Urano non è ben nota. È stato ipotizzato che nuvole d'acqua giacciano entro i 50-100 bar di pressione, nuvole di idro solfuro di ammonio  $\text{NH}_4\text{HS}$  entro i 20-40 bar, nuvole di ammoniaca o acido solfidrico entro i 3-10 bar e infine nuvole di metano entro 1-2 bar. La troposfera è una regione molto dinamica dell'atmosfera, manifestando forti venti, moti convettivi, nubi altamente brillanti e cambiamenti stagionali.



## Atmosfera Superiore

Lo strato intermedio dell'atmosfera di Urano è la stratosfera, dove le temperature generalmente variano con l'altezza a partire da 53 K, in corrispondenza della tropopausa, fino a valori compresi tra gli 800 e gli 850 K alla base della termosfera. Il riscaldamento che si verifica nella stratosfera è dovuto all'assorbimento di radiazione solare, nell'ultravioletto e nell'infrarosso, da parte del metano e di altri idrocarburi, che si formano in questa regione dell'atmosfera in conseguenza della fotolisi del metano. Gli idrocarburi più abbondanti sono l'acetilene e l'etano con un'abbondanza circa  $10^7$  minore a quella dell'idrogeno. Il metano e il monossido di carbonio alle stesse altitudini presentano abbondanze simili, mentre idrocarburi più pesanti e l'anidride carbonica sono presenti con abbondanze di tre ordini di grandezza più piccole. L'etano e l'acetilene tendono a condensare nella parte inferiore e più fredda della stratosfera e nella tropopausa formando strati di foschia, che potrebbero essere parzialmente responsabili dell'aspetto mite di Urano. La concentrazione degli idrocarburi nella stratosfera del pianeta è significativamente inferiore rispetto a quanto riscontrato nelle stratosfere degli altri pianeti giganti. Lo strato più esterno dell'atmosfera di Urano è la termosfera/corona, che presenta una temperatura uniforme compresa tra 800 e 850 K. La fonte di calore responsabile di un valore così alto della temperatura non è stata ancora identificata, perché né le radiazioni solari ultraviolette né

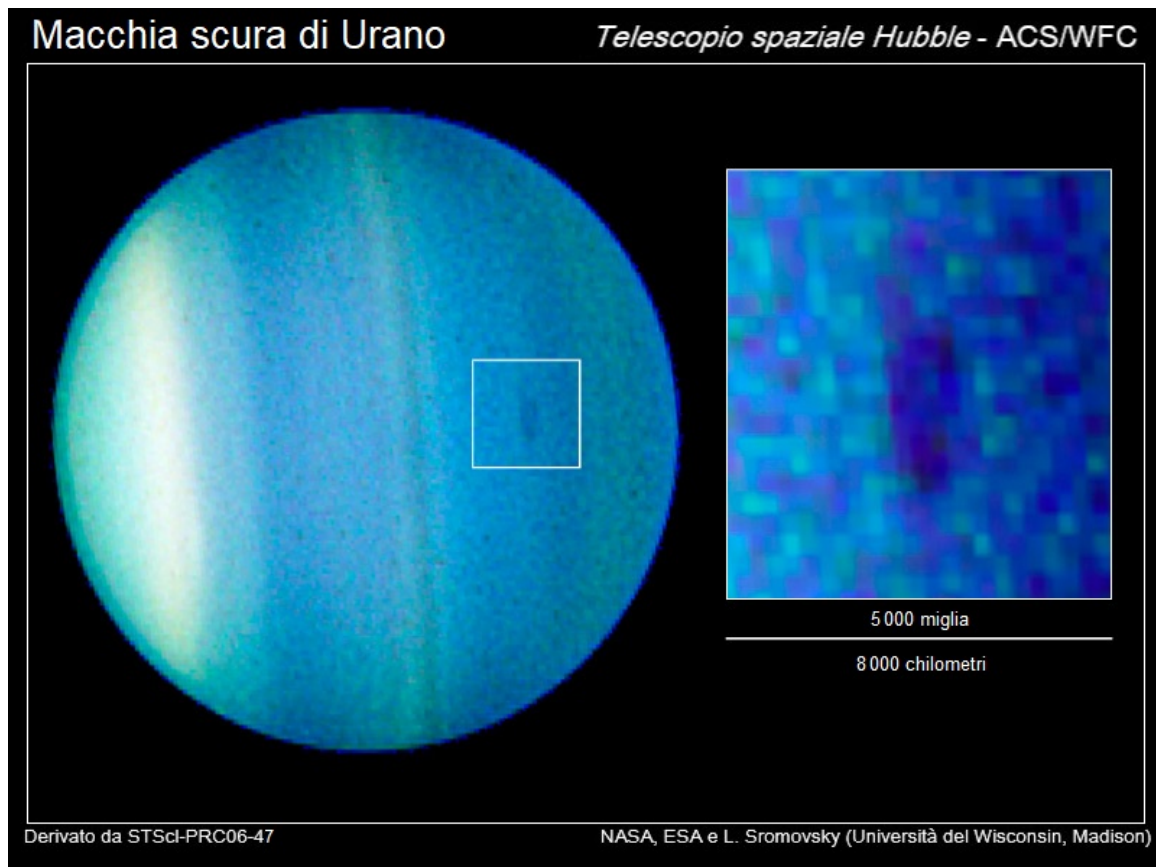
l'attività delle aurore polari, peraltro insignificanti rispetto alle aurore di Giove e Saturno, possono fornire la necessaria energia. Oltre all'idrogeno molecolare, la termosfera-corona contiene una notevole quantità di atomi di idrogeno libero. La loro piccola massa insieme con le alte temperature spiega il perché la corona si estende fino a 50.000 km di altitudine dalla superficie, equivalenti a due raggi di Urano. Questa corona tanto estesa è una caratteristica che rende Urano unico tra i pianeti. I suoi effetti includono una forza di resistenza fluidodinamica sulle piccole particelle in orbita attorno al pianeta, determinando l'impoverimento degli anelli dalla polvere. La termosfera uraniana, nella parte superiore della stratosfera, corrisponde alla ionosfera di Urano. Le osservazioni mostrano che la ionosfera si trova ad altitudini comprese tra i 2.000 e 10.000 km. La ionosfera di Urano è più densa di quella di Saturno e Nettuno; ciò potrebbe derivare dalla minore concentrazione di idrocarburi nella stratosfera. La ionosfera è sostenuta principalmente dalla radiazione solare ultravioletta e la sua densità dipende dall'attività solare.



## Bande Nubi e Venti

Nel 1986, la Voyager 2 scoprì che l'emisfero meridionale visibile di Urano può essere suddiviso in due regioni: una luminosa calotta polare e bande equatoriali scure. Il loro confine si trova a circa 45°S di latitudine. Una banda brillante tra le latitudini da 45°S a 50°S era la caratteristica più visibile dell'atmosfera esterna. Si pensa che questa struttura, chiamata il collare del sud, sia una regione densa di nubi di metano situate all'interno del campo di pressione compreso tra 1,3 e 2 bar. Oltre alla struttura a bande su larga scala, la Voyager 2 osservò dieci piccole nuvole luminose, parecchi gradi a nord del collare, mentre per il resto Urano appariva come un pianeta privo di dinamica. La Voyager 2 giunse durante la piena estate australe di Urano e non riuscì a osservare l'emisfero settentrionale. All'inizio del XXI secolo, quando la regione polare settentrionale cominciava a rendersi visibile dalla Terra, il telescopio spaziale Hubble e i telescopi Keck inizialmente non osservarono nessun collare o calotta polare nell'emisfero nord. Tuttavia, quando Urano passò oltre il suo equinozio, il collare meridionale era quasi scomparso, mentre un debole collare settentrionale iniziava a formarsi vicino alla latitudine 45°N. Nel 1990, grazie al miglioramento delle tecniche osservative dalla Terra, si osservarono le nubi dell'emisfero settentrionale, che iniziavano a divenire visibili. Vennero trovate molte nubi luminose, più di quelle che erano state osservate nell'emisfero meridionale, anche perché nell'emisfero sud il collare luminoso tendeva a mascherarne diverse, togliendo contrasto alle immagini. La differenza principale tra i due emisferi pare sia l'altitudine più elevata alla quale si trovano le nubi dell'emisfero nord, che sembrano più piccole ma più nitide e brillanti. Molte piccole nuvole

osservate avevano una durata di poche ore; tuttavia, furono osservate formazioni più persistenti, come una Macchia Scura Uranus Dark Spot che mai era stata osservata prima del 2006. Questa scoperta ha evidenziato come Urano, nella sua fase equinoziale, pare molto più simile a Nettuno di quanto si pensasse in precedenza. Negli anni Ottanta infatti, quando passò la sonda Voyager, Urano pareva completamente privo di dettagli, a differenza di Nettuno che mostrava diversi fenomeni atmosferici. La velocità massima dei venti è stata rilevata nell'emisfero settentrionale nei pressi della latitudine  $60^{\circ}\text{N}$ , dove essi possono raggiungere facilmente la velocità di 850 km/h, con punte fino a 900 km/h. I venti all'equatore spirano in direzione retrograda, ossia in direzione opposta alla rotazione del pianeta, con velocità comprese tra 180 e 360 km/h. Allontanandosi dall'equatore la velocità del vento diminuisce fino a raggiungere valori vicino allo zero a  $\pm 20^{\circ}$  di latitudine, dove si registra la temperatura minima della troposfera. Da quella latitudine e avvicinandosi ai poli i venti si muovono in moto diretto, nello stesso senso della rotazione di Urano, con la velocità del vento che continua ad aumentare raggiungendo i massimi a  $\pm 60^{\circ}\text{N}$  di latitudine. Nell'emisfero nord è stato osservato che la velocità dei venti torna a scendere a zero nei pressi del polo nord, mentre nell'emisfero sud, il collare oscura le dinamiche atmosferiche nelle vicinanze del polo sud, impedendo la misurazione della velocità dei venti oltre la latitudine  $40^{\circ}\text{S}$ .

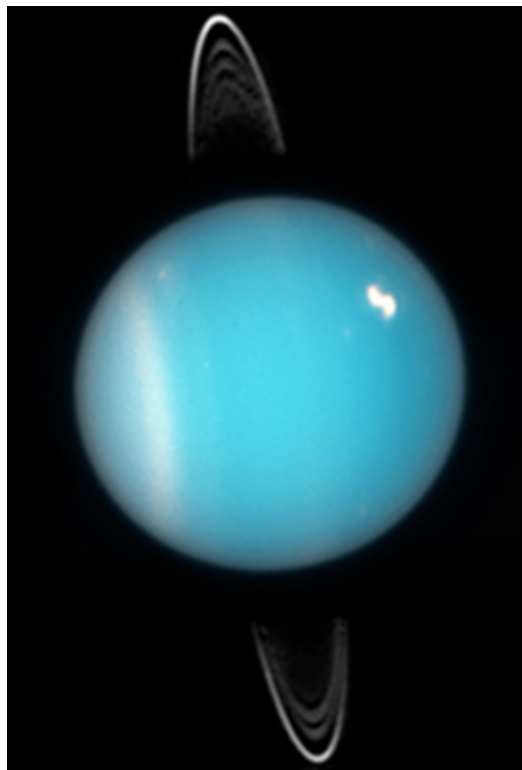


## Clima

L'atmosfera di Urano è piuttosto regolare rispetto agli altri giganti gassosi, anche rispetto a Nettuno, il più simile per altri aspetti. Quando la Voyager 2 si avvicinò a Urano nel 1986, furono osservate solo una decina di formazioni nuvolose su tutto il pianeta. Una spiegazione proposta per questo fenomeno è il basso calore interno di Urano rispetto a quella degli altri pianeti giganti.

## Cambiamenti Stagionali

Per un breve periodo, da marzo a maggio del 2004, grandi nubi e una tempesta persistente sono apparse nell'atmosfera di Urano, mentre sono stati misurati venti spirare a oltre 800 km/h, rendendo Urano simile nell'aspetto a Nettuno. Il 23 agosto 2006, ricercatori dello Space Science Institute e dell'Università del Wisconsin hanno osservato una macchia scura sulla superficie di Urano, consentendo agli astronomi di reperire maggiori informazioni sull'attività atmosferica del pianeta. Non è completamente nota la ragione di questi cambiamenti, ma sembrano essere legati all'inclinazione assiale di Urano che causa delle variazioni stagionali del clima di lunga durata, a seconda della posizione del pianeta nella sua orbita attorno al Sole. Determinare la natura di questa variazione stagionale non è semplice in quanto i dati atmosferici del pianeta sono noti da meno di 84 anni, durata dell'anno uraniano. Dal 1950 si sono osservate variazioni di luminosità con massimi durante i solstizi e minimi durante gli equinozi. Anche le misure della temperatura stratosferica, a partire dal 1970, hanno mostrato cambiamenti più significativi in prossimità del solstizio del 1986. Ci sono quindi ragioni per ritenere che Urano sia soggetto a cambiamenti fisici stagionali. Negli ultimi decenni l'emisfero sud è stato nettamente più brillante dopo che durante il precedente solstizio era stato l'emisfero nord a essere più luminoso. Tuttavia, dopo il solstizio del 1986 la calotta polare sud si è notevolmente oscurata (tranne il collare sud), confermando l'ipotesi che il polo che si avvicina al solstizio si illumina per un determinato periodo, e si oscura passato l'equinozio. Nel 2007, dopo l'equinozio, è apparsa una debole calotta polare nord, mentre quella meridionale è diventata quasi invisibile, anche se il profilo dei venti è comunque leggermente asimmetrico, con i venti dell'emisfero nord generalmente ancora un po' più deboli di quelli dell'emisfero sud. Il meccanismo dei cambiamenti di Urano non è del tutto chiaro. Si pensa che la variazione della luminosità dell'emisfero illuminato dal Sole derivi dal locale ispessimento delle nubi di metano e degli strati di foschia che si trovano nella troposfera. Il collare luminoso a 45°S di latitudine è anch'esso collegato alle nubi di metano. Altre variazioni nella regione polare si possono spiegare con cambiamenti negli strati più bassi delle nubi. Le nubi polari spesse e la foschia possono inibire la convezione, che tuttavia può riattivarsi durante gli equinozi.

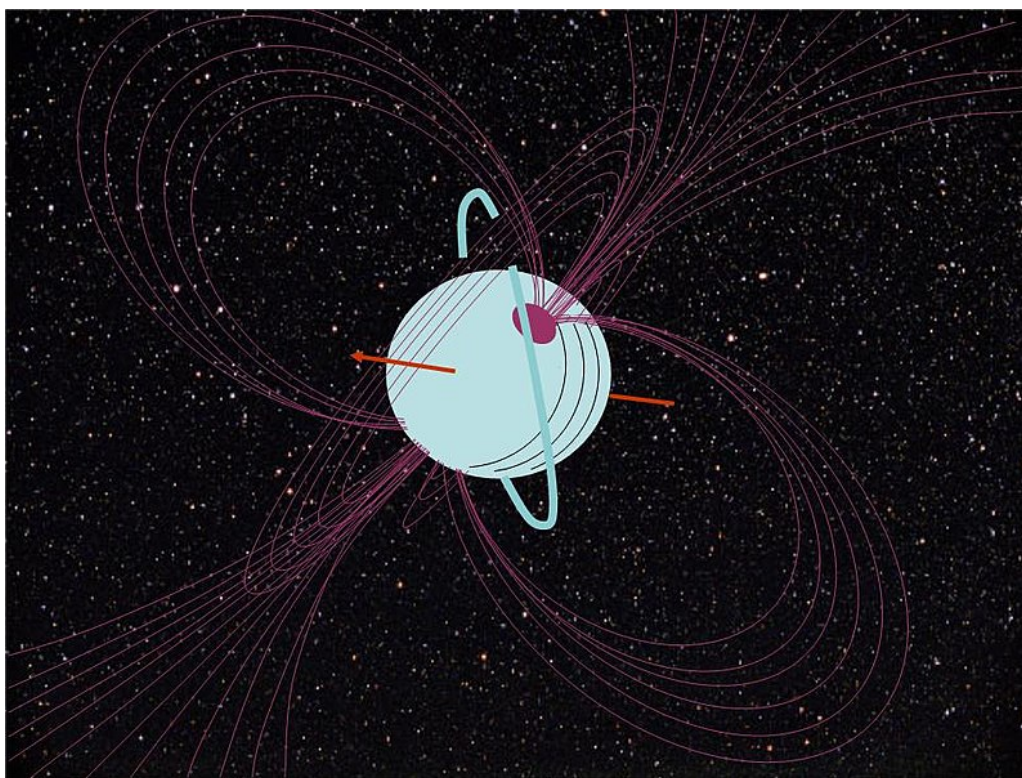


Un'immagine di Urano ripresa nel 2005 da Hubble: sono visibili gli anelli, il Collare Sud e una brillante nube bianca nell'emisfero nord



## Campo Magnetico

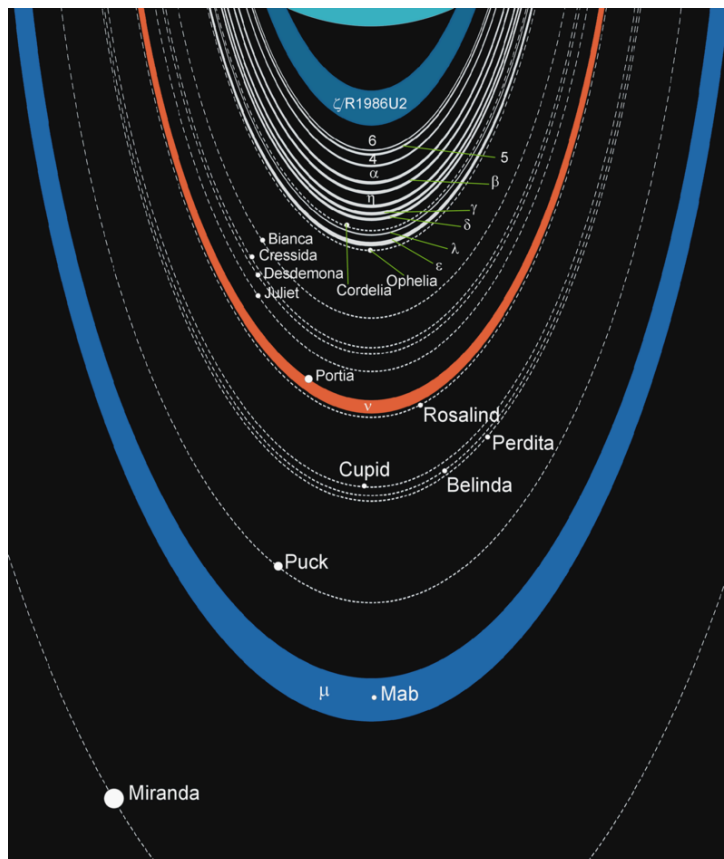
Prima dell'arrivo della Voyager 2 nel 1986, non era stata effettuata nessuna misurazione della magnetosfera di Urano, quindi la sua natura rimaneva sconosciuta, anche se si riteneva che il campo magnetico fosse allineato ai venti solari e che quindi avesse un asse vicino a quello di rotazione. Fu quindi una sorpresa quando i dati della Voyager permisero di rivelare un campo magnetico inclinato di  $59^\circ$  rispetto all'asse di rotazione del pianeta, con i poli magnetici che si trovano in pratica all'equatore e non nei pressi dei poli. Inoltre, il campo magnetico non si origina dal centro del pianeta, in quanto il suo dipolo magnetico è spostato verso l'emisfero sud di circa un terzo del raggio. La magnetosfera di Urano risulta pertanto fortemente asimmetrica, con l'intensità del campo magnetico sulla superficie che va da 0,1 gauss 10 microtesla nell'emisfero meridionale e può arrivare a 1,1 gauss 110 microtesla nell'emisfero nord. La sua media in superficie è di 0,23 gauss. Il momento del dipolo di Urano è cinquanta volte quello della Terra. Anche Nettuno possiede un campo magnetico fortemente inclinato e con un dipolo magnetico spostato, contrariamente al campo magnetico terrestre e a quello degli altri giganti gassosi che risulta più o meno allineato con l'asse di rotazione, suggerendo che questa caratteristica potrebbe essere comune nei giganti di ghiaccio. Una possibile spiegazione di questa peculiarità è che, mentre la Terra e gli altri pianeti hanno campi magnetici generati nel loro nucleo, i campi magnetici dei giganti di ghiaccio sono generati dal movimento di materia a profondità relativamente basse, come ad esempio in un oceano di acqua e ammoniaca. Nonostante lo strano allineamento, per altri versi la magnetosfera di Urano è simile a quella degli altri pianeti, con un limite esterno che si trova a circa ventitré raggi in direzione del Sole e una magnetopausa a diciotto raggi di Urano. La struttura della magnetosfera uraniana è diversa da quella di Giove e più simile a quella di Saturno. La coda della magnetosfera di Urano si estende dietro il pianeta, in direzione opposta al Sole, fino a una decina di milioni di chilometri, prendendo una forma a spirale a causa della rotazione del pianeta. Il flusso di particelle è abbastanza alto da causare un'erosione dei satelliti in un intervallo di tempo molto rapido in termini astronomici, di 100.000 anni. Questa potrebbe essere la causa della colorazione uniformemente scura dei satelliti e degli anelli. Il fascio di particelle del campo magnetico causa aurore visibili come archi luminosi attorno ai due poli magnetici, anche se, a differenza di Giove, le aurore di Urano sono poco significative, brevi e dall'aspetto puntiforme.



**La complessità del campo magnetico di Urano, causata dalla forte inclinazione dei suoi poli magnetici rispetto all'asse di rotazione**

## Anelli

Urano possiede un sistema di anelli appena percettibile, composto da materia scura e polverizzata fino a 10 km di diametro. Il sistema di anelli fu scoperto il 10 marzo 1977 da James Elliot, Edward W. Dunham e Douglas J. Mink grazie all'osservatorio volante Kuiper Airborne Observatory. La scoperta fu inaspettata: gli astronomi avevano predisposto l'aereo appositamente per studiare un fenomeno molto raro, ovvero l'occultazione di una stella SAO 158687 da parte di Urano, con l'intento di poter studiare la sua atmosfera, che avrebbe filtrato i raggi della stella, prima che questa scomparisse dietro il pianeta. Il C141 trasportava un telescopio di 90 cm e un fotometro fotoelettrico molto sensibile, capace di misurare le più piccole variazioni di luminosità. Quando i ricercatori analizzarono le loro osservazioni scoprirono che la stella era scomparsa brevemente dalla vista cinque volte prima e dopo l'occultamento da parte del pianeta. Dopo ripetuti controlli, per escludere difetti nello strumento, conclusero che intorno a Urano doveva esserci un sistema di anelli analoghi a quelli di Saturno, almeno cinque. Successivamente vennero scoperti quattro ulteriori anelli. Tale sistema venne rilevato direttamente quando la sonda spaziale Voyager 2 passò nei pressi di Urano nel 1986. La Voyager scoprì anche altri due anelli, portando il numero totale degli anelli a undici. Nel dicembre 2005 il telescopio spaziale Hubble fotografò due nuovi anelli, il più largo dei quali ha un diametro due volte più grande degli anelli precedentemente conosciuti. Data la lontananza da Urano, i nuovi anelli sono stati definiti sistema di anelli esterno. I due anelli sono così lontani dal pianeta che sono stati chiamati il secondo sistema di anelli di Urano. Gli scienziati che hanno effettuato lo studio ipotizzano che l'anello più esterno venga continuamente alimentato dal satellite Mab, scoperto nel 2005 e avente un diametro di circa 20 km, che orbita all'interno di tale anello. Nell'aprile del 2006, le immagini dei nuovi anelli ottenute tramite l'Osservatorio Keck hanno rivelato i colori degli anelli esterni: il più esterno è blu mentre l'altro è rosso. Un'ipotesi che spiegherebbe il colore blu dell'anello esterno è che esso sia composto da minuscole particelle di ghiaccio d'acqua rilasciato dalla superficie di Mab, sufficientemente piccole da diffondere la luce blu.



Schema degli anelli di Urano; sono mostrati alcuni satelliti e le loro orbite

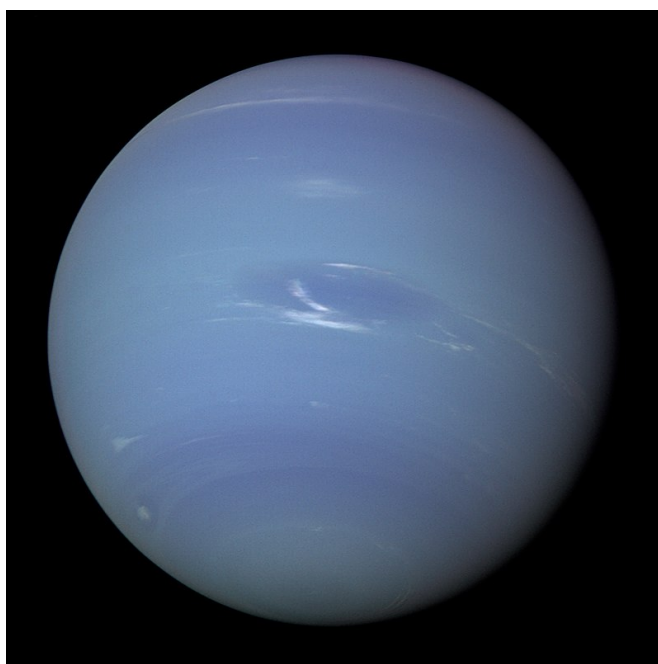
## Satelliti Naturali

I satelliti naturali di Urano conosciuti sono ventisette. I cinque più massicci sono Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Miranda. I nomi dei satelliti derivano da personaggi delle opere di William Shakespeare e Alexander Pope. I primi a essere scoperti, da parte di William Herschel nel 1787, furono Titania e Oberon, mentre nel 1840 William Lassell scoprì Ariel e Umbriel. Passò poi quasi un secolo senza nessuna scoperta, fino a quando, nel 1948, Gerard Kuiper scoprì Miranda, il più piccolo dei satelliti principali di Urano. L'ultimo satellite ufficialmente scoperto è stato Margherita nel 2003, ma nel 2016, grazie all'analisi di alcune foto della sonda Voyager vecchie di trent'anni, si sono aggiunti altri due satelliti non confermati. Il sistema satellitare di Urano è il meno massiccio tra quelli dei pianeti giganti; infatti, la massa combinata dei cinque maggiori satelliti è meno della metà di quella del solo Tritone, la maggiore delle lune di Nettuno. Il più grande dei satelliti di Urano, Titania, ha un diametro di 1.578 km, meno della metà della Luna, ma poco più grande di Rea, la seconda più grande luna di Saturno, il che rende Titania l'ottavo satellite più grande del sistema solare. Tra i satelliti di Urano, Ariel sembra avere la superficie più giovane, con il minor numero di crateri da impatto, mentre la superficie di Umbriel appare la più antica. La superficie di Miranda appare caotica e pare sia stata interessata in passato da un'intensa attività geologica. Sono evidenti vari strati sovrapposti, alcuni recenti e altri più antichi, solcati dai canyon più profondi del sistema solare, che raggiungono anche i 20 km di profondità. Si pensa che la sua superficie abbia sofferto intense forze mareali nel passato, in un momento in cui la sua orbita era più eccentrica di quella odierna. Almeno un oggetto è legato a Urano in un'orbita a ferro di cavallo, che occupa il punto lagrangiano Sole-Urano  $L_3$ , 83982 Crantor, che si muove in un'orbita temporanea all'interno della regione orbitale di Urano. Un altro candidato oggetto in orbita a ferro di cavallo è 2010 EU<sub>65</sub>.



**I cinque satelliti principali di Urano in un fotomontaggio; in ordine crescente di distanza dal pianeta da sinistra a destra: Miranda, Ariel, Umbriel, Titania e Oberon**

## Ottavo Pianeta Nettuno



**Nettuno visto dalla sonda Voyager 2, a circa 7 milioni di km dal pianeta**

Nettuno è l'ottavo e più lontano pianeta del Sistema solare partendo dal Sole. Si tratta del quarto pianeta più grande, considerando il suo diametro, e il terzo se si considera la sua massa. Nettuno ha 17 volte la massa della Terra ed è leggermente più massiccio del suo quasi-gemello Urano, la cui massa è uguale a 15 masse terrestri, ma è meno denso rispetto a Nettuno. Il nome del pianeta è dedicato al dio romano del Mare Nettuno il suo simbolo è  $\Psi$ , una versione stilizzata del tridente di Nettuno. Scoperto la sera del 23 settembre 1846 da Johann Gottfried Galle con il telescopio dell'Osservatorio astronomico di Berlino, e Heinrich Louis d'Arrest, uno studente di astronomia che lo assisteva, Nettuno fu il primo pianeta ad essere stato trovato tramite calcoli matematici più che attraverso regolari osservazioni: cambiamenti insoliti nell'orbita di Urano indussero gli astronomi a credere che vi fosse, all'esterno, un pianeta sconosciuto che ne perturbava l'orbita. Il pianeta fu scoperto entro appena un grado dal punto previsto. La luna Tritone fu individuata poco dopo, ma nessuno degli altri tredici satelliti naturali di Nettuno fu scoperto prima del XX secolo. Il pianeta è stato visitato da una sola sonda spaziale, la Voyager 2 che transitò vicino ad esso il 25 agosto 1989. Nettuno ha una composizione simile a quella di Urano ed entrambi hanno composizioni differenti da quelle dei più grandi pianeti gassosi Giove e Saturno. Per questo sono talvolta classificati in una categoria separata, i cosiddetti giganti ghiacciati. L'atmosfera di Nettuno, sebbene simile a quelle sia di Giove che di Saturno essendo composta principalmente da idrogeno ed elio, possiede anche maggiori proporzioni di ghiacci, come acqua, ammoniaca e metano, assieme a tracce di idrocarburi e forse azoto. In contrasto, l'interno del pianeta è composto essenzialmente da ghiacci e rocce come il suo simile Urano. Le tracce di metano presenti negli strati più esterni dell'atmosfera contribuiscono a conferire al pianeta Nettuno il suo caratteristico colore blu intenso. Nettuno possiede i venti più forti di ogni altro pianeta nel Sistema Solare. Sono state misurate raffiche a velocità superiori ai 2.100 km/h. All'epoca del sorvolo da parte della Voyager 2, nel 1989, l'emisfero sud del pianeta possedeva una Grande Macchia Scura compatibile con la Grande Macchia Rossa di Giove; la temperatura delle nubi più alte di Nettuno era di circa  $-218^{\circ}\text{C}$ , una delle più fredde del Sistema solare, a causa della grande distanza dal Sole. La temperatura al centro del pianeta è di circa  $7.000^{\circ}\text{C}$ , comparabile con la temperatura superficiale del Sole e simile a quella del nucleo di molti altri pianeti conosciuti. Il pianeta possiede inoltre un debole sistema di anelli, scoperto negli anni sessanta ma confermato solo dalla Voyager 2.

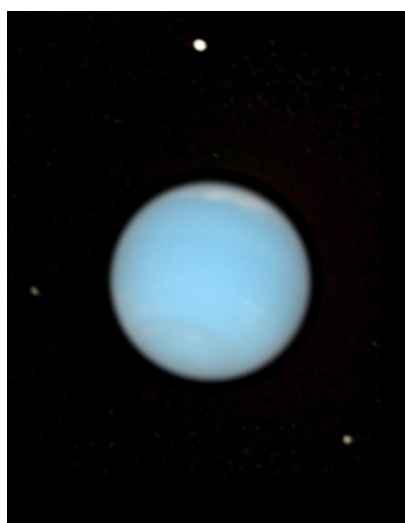


<b>Parametri Orbitali, Dati Fisici e Osservativi</b>					
<b>Orbitali</b>		<b>Fisici</b>		<b>Osservativi</b>	
<i>Semiasse</i>	30,07 UA	<i>Diamet. equat.</i>	49.528 km	<i>Magn. app. min</i>	7,7
<i>Perielio</i>	29,81 UA	<i>Superficie</i>	7,62x10 <sup>15</sup> km <sup>2</sup>	<i>Magn. app med</i>	7,84
<i>Afelio</i>	30,33 UA	<i>Period. Rotaz.</i>	16h 6 min	<i>Magn. app max</i>	8
<i>CRF orbitale</i>	188,93 UA	<i>Period. Orbit.</i>	164,88 anni		
<i>Inclinazione</i>	28,32°	<i>Incl su Eclittica</i>	6,43°		
<i>Satelliti</i>	14	<i>Temp. max</i>	-215 °C		
<i>Anelli</i>	10	<i>Temp. med.</i>	-220,2 °C		
		<i>Temp. min.</i>	-223,2 °C		
		<i>Press. Atmosf</i>	1400 hPa		

**UA = distanza Terra/Sole media pari a km149.597.870.**

## Osservazioni

Nettuno è invisibile ad occhio nudo dalla Terra; la sua magnitudine apparente, sempre compresa fra la 7,7 e la 8,0, necessita almeno di un binocolo per permettere l'individuazione del pianeta. Visto attraverso un grande telescopio, Nettuno appare come un piccolo disco bluastro dal diametro apparente di 2,2–2,4 secondi d'arco simile nell'aspetto ad Urano. Il colore è dovuto alla presenza di metano nell'atmosfera nettuniana, in ragione del 2%. Si è avuto un netto miglioramento nello studio visuale del pianeta dalla Terra con l'avvento del Telescopio spaziale Hubble e dei grandi telescopi a terra con ottiche adattive. Le immagini migliori ottenibili dalla Terra permettono oggi di individuarne le formazioni nuvolose più pronunciate e le regioni polari, più chiare del resto dell'atmosfera. Con strumenti meno precisi è impossibile individuare qualsiasi formazione superficiale del pianeta, ed è preferibile dedicarsi alla ricerca del suo satellite principale, Tritone. Ad osservazioni nelle frequenze radio, Nettuno appare essere la sorgente di due emissioni: una portata avanti e piuttosto debole, l'altra irregolare e più energetica. Gli studiosi ritengono che entrambe siano generate dal campo magnetico rotante del pianeta. Le osservazioni nell'infrarosso esaltano le formazioni nuvolose del pianeta, che brillano luminose sullo sfondo più freddo, e permettono di determinarne agevolmente le forme e le dimensioni. Fra il 2010 ed il 2011 Nettuno ha completato la sua prima orbita attorno al Sole dal 1846, quando venne scoperto da Johann Galle, ed è stato quindi osservabile in prossimità delle coordinate a cui è stato scoperto.



**Immagine di Nettuno raccolta nel visibile dal Telescopio spaziale Hubble**



## Storia delle Osservazioni

La prima osservazione certa di Nettuno fu effettuata da Galileo Galilei, il 27 dicembre 1612, che disegnò la posizione del pianeta sulle proprie carte astronomiche scambiandolo per una stella fissa. Per una coincidenza fortuita, in quel periodo il moto apparente di Nettuno era eccezionalmente lento, perché proprio quel giorno aveva iniziato a percorrere il ramo retrogrado del suo moto apparente in cielo, e non poteva essere individuato mediante i primitivi strumenti di Galilei. Qualche giorno dopo, il 4 gennaio 1613, si verificò addirittura l'occultazione di Nettuno da parte di Giove: se Galileo avesse continuato ancora per qualche giorno le sue osservazioni, avrebbe dunque osservato la prima occultazione dell'era telescopica. La scoperta del pianeta dovette invece aspettare fino alla metà del XIX secolo.

### La scoperta

Quando nel 1821 Alexis Bouvard pubblicò il primo studio dei parametri orbitali di Urano divenne chiaro agli astronomi che il moto del pianeta divergeva in maniera apprezzabile dalle previsioni teoriche; il fenomeno poteva essere spiegato solo teorizzando la presenza di un altro corpo di notevoli dimensioni nelle regioni più esterne del sistema solare. Indipendentemente fra loro il matematico inglese John Couch Adams nel 1843 ed il francese Urbain Le Verrier nel 1846 teorizzarono con buona approssimazione posizione e massa di questo presunto nuovo pianeta. Mentre le ricerche di Adams vennero trascurate dall'astronomo britannico George Airy, cui egli si era rivolto per sottolineare la necessità di ricercare il nuovo pianeta nella posizione trovata, quelle di Le Verrier vennero applicate da due astronomi dell'Osservatorio di Berlino, Johann Gottfried Galle e Heinrich d'Arrest: dopo meno di mezz'ora dall'inizio delle ricerche aiutati dall'utilizzo di una carta stellare della regione in cui si sarebbe dovuto trovare Nettuno che avevano compilato le notti precedenti e con cui confrontarono le osservazioni il 23 settembre 1846 i due individuarono il pianeta a meno di un grado dalla posizione prevista da Le Verrier ed a dodici gradi dalla posizione prevista da Adams. Nel giugno del 1846 Le Verrier aveva pubblicato una stima della posizione del pianeta simile a quanto calcolato da Adams. Ciò aveva spinto Airy a sollecitare il direttore dell'osservatorio di Cambridge, James Challis, a cercare il pianeta. Challis aveva quindi setacciato il cielo tra agosto e settembre, ma invano. Dopo che Galle ebbe comunicato l'avvenuta scoperta, Challis realizzò di aver osservato il pianeta due volte in agosto, ma di non averlo identificato a causa della metodologia con cui aveva affrontato la ricerca. Sulla scia della scoperta si sviluppò un'accesa rivalità tra francesi ed inglesi sulla priorità della scoperta, da cui emerse infine il consenso internazionale che entrambi, Le Verrier ed Adams, ne meritassero il credito. La questione è stata riaperta nel 1998, dopo la morte dell'astronomo Olin Eggen, dal ritrovamento di un fascicolo, chiamato Neptune papers, di cui Eggen era in possesso. Il fascicolo contiene documenti storici provenienti dall'Osservatorio reale di Greenwich che sembra siano stati rubati dallo stesso Eggen e nascosti per quasi tre decenni. Dopo aver preso visione di tali documenti alcuni storici suggeriscono che Adams non meriti egual credito di Le Verrier. Dal 1966 Dennis Rawlins ha messo in discussione la credibilità della rivendicazione di co-scoperta di Adams. In un articolo del 1992 sul suo giornale, Dio, ha espresso l'opinione che la rivendicazione britannica sia un furto. Nel 2003 Nicholas Kollerstrom dell'University College London ha detto: Adams ha eseguito alcuni calcoli ma era piuttosto incerto su dove diceva che fosse Nettuno.



Urbain Le Verrier

## La Denominazione

Poco dopo la scoperta ci si riferiva a Nettuno semplicemente come al pianeta più esterno di Urano. Galle fu il primo a suggerire un nome e propose di nominarlo in onore del dio Giano. In Inghilterra Challis avanzò il nome Oceano. Rivendicando il diritto a denominare il nuovo pianeta da lui scoperto, Le Verrier propose il nome Nettuno, affermando falsamente, tra l'altro, che il nome fosse stato già ufficialmente approvato dal Bureau des longitudes francese. In ottobre cercò di nominare il pianeta Le Verrier, dal proprio nome, e fu patriotticamente supportato dal direttore dell'Osservatorio di Parigi, François Arago. Sebbene questa proposta incontrò una dura opposizione al di fuori della Francia, gli almanacchi francesi reintrodussero rapidamente il nome Herschel per Urano, dal nome del suo scopritore William Herschel, e Leverrier per il nuovo pianeta. Il 29 dicembre 1846 Friedrich von Struve si esprime pubblicamente in favore del nome Nettuno presso l'Accademia delle Scienze di San Pietroburgo ed in pochi anni Nettuno divenne il nome universalmente accettato. Nella mitologia romana, Nettuno è il dio del mare, identificato con il greco Poseidone. La richiesta di un nome mitologico sembrava in linea con la nomenclatura degli altri pianeti che prendono il proprio nome da divinità romane, ad eccezione soltanto della Terra e di Urano, che lo trae invece da una divinità della mitologia greca.

## Dal 1850 a Oggi

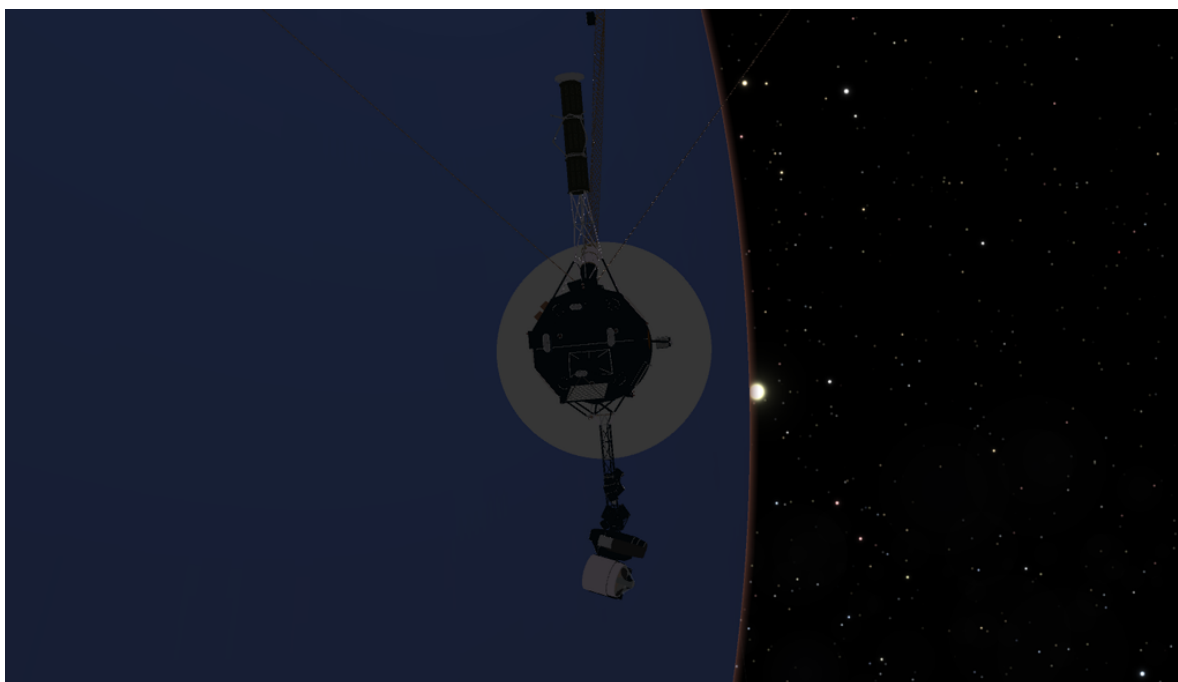
Già il 10 ottobre 1846, dopo diciassette giorni dalla scoperta di Nettuno, l'astronomo inglese William Lassell scoprì il suo principale satellite Tritone. Alla fine dell'Ottocento fu ipotizzato che presunte irregolarità osservate nel moto di Urano e Nettuno derivassero dalla presenza di un altro pianeta più esterno. Dopo estese campagne di ricerca, Plutone fu scoperto il 18 febbraio 1930 alle coordinate previste dai calcoli di William Henry Pickering e Percival Lowell per il nuovo pianeta. Tuttavia, il nuovo pianeta era troppo lontano perché potesse generare le irregolarità riscontrate nel moto di Urano, mentre quelle riscontrate nel moto di Nettuno derivavano da un errore nella stima della massa del pianeta che fu individuato con la missione Voyager 2 e che era all'origine, tra l'altro, delle irregolarità di Urano. La scoperta di Plutone fu quindi piuttosto fortuita. A causa della sua grande distanza le conoscenze su Nettuno rimasero frammentarie almeno fino alla metà del Novecento quando Gerard Kuiper scoprì la sua seconda luna, Nereide. Negli anni settanta e ottanta si accumularono indizi sulla probabile presenza di anelli o archi di anelli. Nel 1981 Harold Reitsema scoprì il suo terzo satellite Larissa. Nell'agosto 1989 le conoscenze ricevettero una enorme spinta in avanti dal sorvolo della prima sonda automatica inviata ad esplorare i dintorni del pianeta, la Voyager II. La sonda individuò importanti dettagli dell'atmosfera del pianeta, confermò l'esistenza di ben cinque anelli ed individuò nuovi satelliti oltre a quelli già scoperti dalla Terra.



**William Lassell**

## Missioni Spaziali

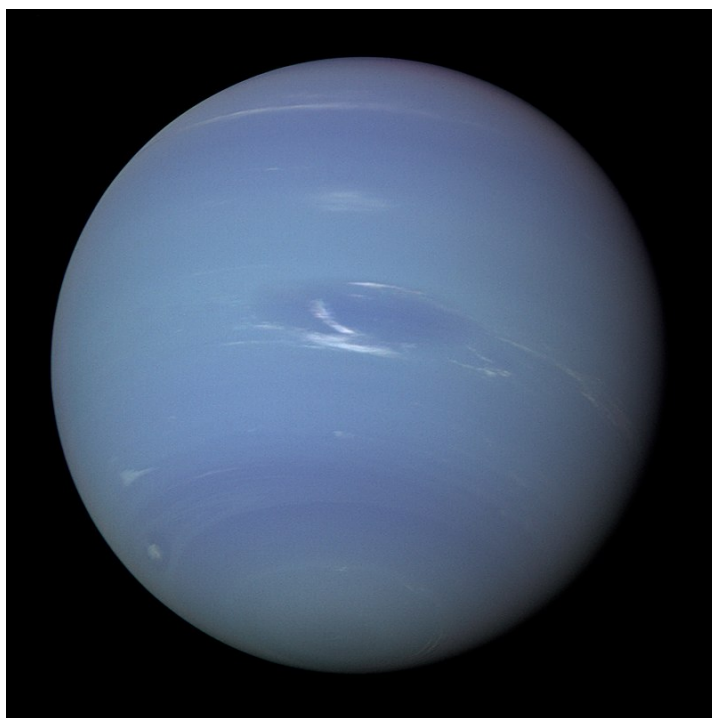
L'unica sonda spaziale ad aver visitato Nettuno è stata la Voyager 2, nel 1989; con un sorvolo ravvicinato del pianeta la Voyager ha permesso di individuarne le principali formazioni atmosferiche, alcuni anelli e numerosi satelliti. Il 25 agosto 1989 la sonda ha sorvolato il polo nord di Nettuno ad una quota di 4950 km per poi dirigersi verso Tritone, il satellite maggiore, raggiungendo una distanza minima di circa 40.000 km. Dopo le ultime misure scientifiche condotte durante la fase di allontanamento dal gigante gassoso, il 2 ottobre 1989, tutti gli strumenti della sonda sono stati spenti, lasciando in funzione solamente lo spettrometro ultravioletto. Voyager 2 iniziava così una lunga marcia verso lo spazio interstellare, alla velocità di 470 milioni di chilometri all'anno; l'inclinazione della sua traiettoria rispetto all'eclittica è di circa  $48^\circ$ . Si ritiene che, al ritmo attuale, la Voyager 2 passerà a 4,3 anni luce dal sistema di Sirio tra 296.000 anni. Negli anni duemila la NASA aveva concepito due possibili missioni: un orbiter, il cui lancio non è previsto prima del 2040 ed una sonda Argo che avrebbe dovuto effettuare un fly-by del pianeta per proseguire verso due o tre oggetti della fascia di Kuiper, la cui ultima finestra favorevole di lancio era prevista per il 2019. La missione non fu tuttavia formalmente proposta per la carenza di plutonio-238 che avrebbe dovuto alimentare il generatore termoelettrico a radioisotopi. Dal 2018, l'Agenzia spaziale cinese studia un progetto per una coppia di sonde simili alle Voyager, provvisoriamente conosciute come Interstellar Express o Interstellar Heliosphere Probe. Entrambe le sonde saranno lanciate contemporaneamente nel 2024 e seguiranno percorsi diversi per esplorare le estremità opposte dell'eliosfera; la seconda sonda, IHP-2, sorvolerà Nettuno nel gennaio 2038, passando a soli 1.000 km dalla sommità delle nubi, che potrebbe rilasciare una piccola sonda nell'atmosfera durante il sorvolo.



**La sonda Voyager 2 mentre sorvola Nettuno rappresentazione artistica**

## Parametri Orbitali

Il pianeta compie una rivoluzione attorno al Sole in circa 164,79 anni. Con una massa pari a circa 17 volte quella terrestre ed una densità media di 1,64 volte quella dell'acqua, Nettuno è il più piccolo e più denso fra i pianeti giganti del sistema solare. Il suo raggio equatoriale, ponendo lo zero altimetrico alla quota in cui la pressione atmosferica vale 1.000 hPa, è di 24.764 km. L'orbita di Nettuno è caratterizzata da un'inclinazione di  $1,77^\circ$  rispetto al piano dell'eclittica e da un'eccentricità di 0,011. In conseguenza di ciò la distanza tra Nettuno ed il Sole varia di 101 milioni di chilometri tra perielio ed afelio, i punti dell'orbita in cui il pianeta è rispettivamente più vicino e più lontano al Sole. Nettuno compie una rotazione completa intorno al proprio asse in circa 16,11 ore. L'asse è inclinato di  $28,32^\circ$  rispetto al piano orbitale, valore simile all'angolo d'inclinazione dell'asse della Terra  $23^\circ$  e di Marte  $25^\circ$ . Di conseguenza i tre pianeti sperimentano cambiamenti stagionali simili. Tuttavia, il lungo periodo orbitale implica che su Nettuno ciascuna stagione abbia una durata di circa quaranta anni terrestri. Poiché Nettuno non è un corpo solido, la sua atmosfera presenta una rotazione differenziale: le ampie fasce equatoriali ruotano con un periodo di circa 18 ore, superiore al periodo di rotazione del campo magnetico del pianeta che è pari a 16,1 ore; le regioni polari invece completano una rotazione in 12 ore. Nettuno presenta la rotazione differenziale più marcata del sistema solare che origina forti venti longitudinali.



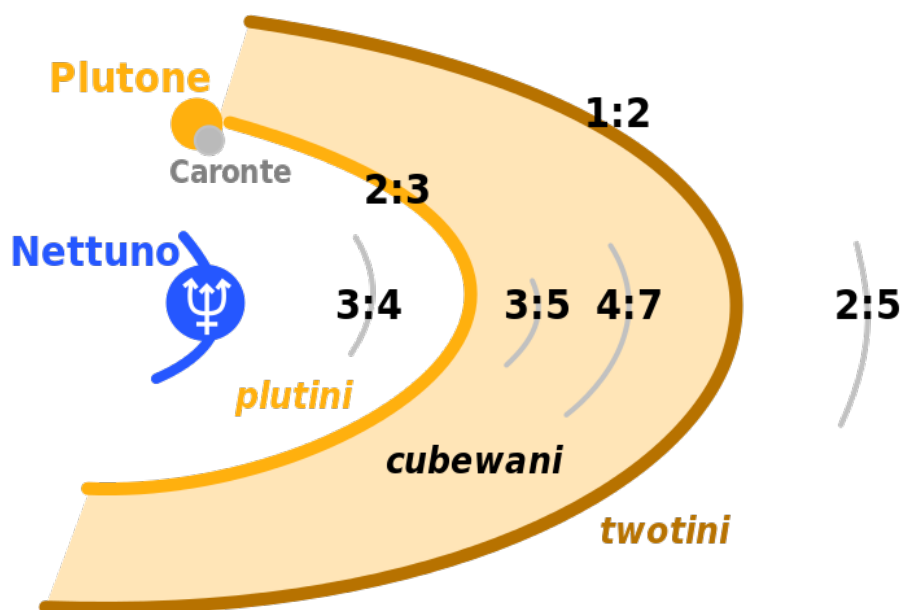
**L'ultima immagine dell'intero disco di Nettuno ripresa dalla Voyager 2 prima del massimo avvicinamento**

## Oggetti Trans nettuniani

Le nuove scoperte di moltissimi corpi celesti nel sistema solare esterno hanno portato gli astronomi a coniare un nuovo termine, oggetto trans nettuniano, che designa qualsiasi oggetto orbitante oltre l'orbita di Nettuno o comunque formatosi in quella regione. Nettuno ha un impatto profondo sulla regione subito oltre la sua orbita, da 30 UA fino a 55 UA dal Sole e conosciuta come fascia di Kuiper, un anello di piccoli mondi ghiacciati simile alla Fascia principale degli asteroidi, ma molto più vasto. Così come la gravità di Giove domina la Fascia principale, definendone la forma, così la gravità di Nettuno domina completamente la Fascia di Kuiper. Nel corso della storia del Sistema solare, la gravità di Nettuno ha destabilizzato alcune regioni della Fascia, creandovi dei vuoti. La zona compresa tra 40 e 42 UA ne è un esempio. All'interno di

queste regioni vuote esistono tuttavia orbite seguendo le quali alcuni oggetti hanno potuto sopravvivere nei miliardi di anni che hanno portato all'attuale struttura del Sistema solare. Queste orbite presentano fenomeni di risonanza con Nettuno, cioè gli oggetti che le percorrono completano un'orbita intorno al Sole in una precisa frazione del periodo orbitale di Nettuno. Se un corpo completa una propria orbita per ogni due orbite di Nettuno avrà completato metà della sua orbita ogni volta che il pianeta ritorna alla sua posizione iniziale. La popolazione di oggetti risonanti più numerosa, con più di 200 oggetti noti, presenta una risonanza 2:3 con il pianeta. Tali oggetti, che completano un'orbita per ogni orbita e mezzo di Nettuno, sono stati chiamati plutini dal nome del più grande fra essi, Plutone. Sebbene Plutone attraversi l'orbita di Nettuno regolarmente, la risonanza garantisce che essi non potranno mai collidere. Un altro importante gruppo della Fascia di Kuiper è quello dei twotini, che sono caratterizzati da una risonanza 2:1; ci sono poi oggetti che presentano anche altri rapporti di risonanza, ma non sono molto numerosi. Altri rapporti che sono stati osservati comprendono: 3:4, 3:5, 4:7 e 2:5. È curioso osservare che a causa dell'alta eccentricità dell'orbita di Plutone, periodicamente Nettuno viene a trovarsi più lontano dal Sole di quest'ultimo, come è accaduto fra il 1979 ed il 1999. Nettuno possiede inoltre un certo numero di asteroidi troiani, che occupano le regioni gravitazionalmente stabili che precedono e seguono il pianeta sulla sua orbita ed identificate come L4 e L5. Gli asteroidi troiani sono spesso descritti anche come oggetti in risonanza 1:1 con Nettuno. Sono notevolmente stabili nelle loro orbite ed è improbabile che siano stati catturati dal pianeta, ma si ritiene piuttosto che si siano formati con esso.

## Fascia di Kuiper e risonanza orbitale

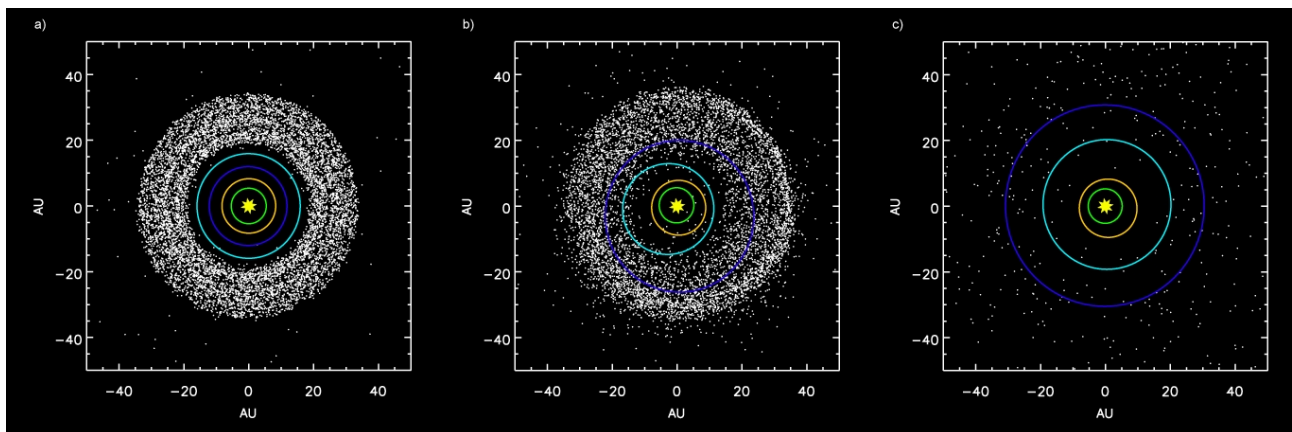


Il diagramma mostra le risonanze orbitali nella Fascia di Kuiper causate da Nettuno: nelle regioni evidenziate orbitano gli oggetti con una risonanza 2:3 con Nettuno i plutini, gli oggetti classici della Fascia di Kuiper i cubewani e gli oggetti con una risonanza 1:2 con Nettuno i twotini.



## Formazione e Migrazione

La formazione dei giganti ghiacciati, Nettuno e Urano, è difficile da spiegare con esattezza. I modelli correnti suggeriscono che la densità di materia delle regioni più esterne del Sistema solare fosse troppo bassa per formare corpi così grandi tramite il meccanismo tradizionalmente accettato dell'accrezione e sono state avanzate varie ipotesi per spiegare la loro evoluzione. Una è quella secondo cui i giganti ghiacciati non si siano formati tramite l'accrezione del nucleo, ma dalle instabilità dell'originario disco proto planetario e, in seguito, la loro atmosfera sarebbe stata spazzata via dalle radiazioni di una stella massiccia di classe spettrale O B molto vicina. Un concetto alternativo è quello secondo cui si formarono più vicini al Sole, dove la densità di materia era più elevata, e poi migrarono verso le attuali orbite. L'ipotesi della migrazione è favorita dalla sua caratteristica di poter spiegare le attuali risonanze orbitali nella Fascia di Kuiper, in particolare la risonanza 2:5. Quando Nettuno migrò verso l'esterno, si scontrò con gli oggetti della proto-fascia di Kuiper, creando nuove risonanze e mandando in caos le altre orbite. Si crede che gli oggetti nel disco diffuso siano stati spinti nelle attuali posizioni da interazioni con le risonanze create dalla migrazione di Nettuno. Il modello di Nizza, un modello formulato al computer nel 2004 da Alessandro Morbidelli dell'Osservatorio della Costa Azzurra a Nizza, suggerisce che la migrazione di Nettuno nella Fascia di Kuiper potrebbe essere stata provocata dalla formazione di una risonanza 1:2 nelle orbite di Giove e Saturno, che creò una spinta gravitazionale che mandò sia Urano che Nettuno verso orbite più alte causando così il loro spostamento. L'espulsione risultante di oggetti dalla proto-fascia di Kuiper potrebbe anche spiegare l'intenso bombardamento tardivo avvenuto circa 600 milioni di anni dopo la formazione del Sistema solare e la comparsa degli asteroidi troiani di Giove.



**Una serie di immagini che mostra i reciproci rapporti tra i pianeti esterni e la Fascia di Kuiper secondo il modello di Nizza: a) Prima della risonanza Giove/Saturno 2:1 b) Spostamento degli oggetti della Cintura di Kuiper nel sistema solare dopo lo slittamento dell'orbita di Nettuno c) Dopo l'espulsione dei corpi della Fascia di Kuiper ad opera di Giove.**

## Massa e Dimensione

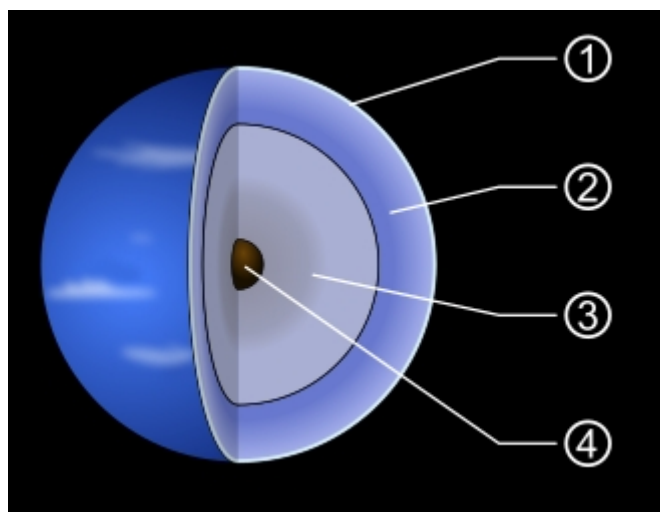
Con una massa di  $1,0243 \times 10^{26}$  kg Nettuno è un corpo intermedio fra la Terra ed i grandi giganti gassosi: la sua massa è diciassette volte quella della Terra, ma è appena un diciannovesimo di quella di Giove. Il raggio equatoriale del pianeta è di 24.764 km, circa quattro volte maggiore di quello della Terra. Nettuno ed Urano sono spesso considerati come una sottoclasse di giganti, chiamata giganti ghiacciati, a causa delle loro dimensioni inferiori e alla più alta concentrazione di sostanze volatili rispetto a Giove e Saturno. Nella ricerca di pianeti extrasolari Nettuno è stato usato come termine di paragone: i pianeti scoperti con una massa simile sono detti infatti pianeti nettuniani, così come gli astronomi si riferiscono ai vari pianeti gioviani.



Le dimensioni di Terra e Nettuno a paragone

## Struttura Interna

La struttura interna di Nettuno ricorda quella di Urano; la sua atmosfera forma circa il 5-10% della massa del pianeta, estendendosi dal 10 al 20% del suo raggio, dove raggiunge pressioni di circa 10 giga pascal. Nelle regioni più profonde sono state trovate concentrazioni crescenti di metano, ammoniaca e acqua. Gradualmente questa regione più calda e oscura condensa in un mantello liquido surriscaldato, dove le temperature raggiungono valori compresi fra i 2.000 K ed i 5.000 K. Il mantello possiede una massa di 10-15 masse terrestri ed è ricco di acqua, ammoniaca, metano ed altre sostanze. Come è solito nelle scienze planetarie, questa mistura è chiamata ghiacciata, sebbene sia in realtà un fluido caldo e molto denso. Questo fluido, che possiede un'elevata conduttività elettrica, è talvolta chiamato oceano di acqua e ammoniaca. Alla profondità di 7.000 km, lo scenario potrebbe essere quello in cui il metano si decompone in cristalli di diamante e precipita verso il centro. Il nucleo planetario di Nettuno è composto da ferro, nichel e silicati; i modelli forniscono una massa di circa 1,2 masse terrestri. La pressione del nucleo è di 7 Mbar, milioni di volte superiore a quella della superficie terrestre, e la temperatura potrebbe essere sui 5.400 K.



La struttura interna di Nettuno:

1. Atmosfera superiore, sommità delle nubi.
2. Atmosfera inferiore, costituita da idrogeno, elio e gas metano.
3. Mantello d'acqua, ammoniaca e metano ghiacciato.
4. Nucleo di roccia e ghiaccio.

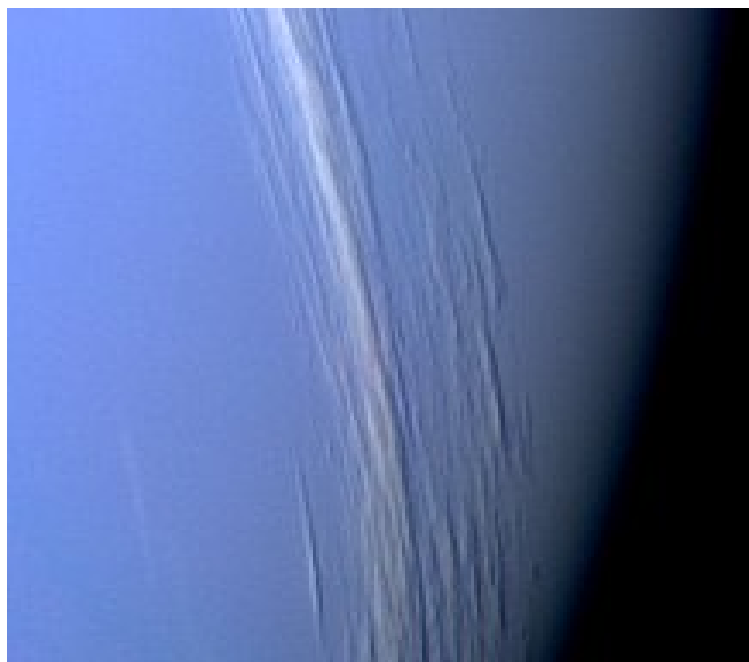
## Calore Interno

Si ritiene che le maggiori variazioni climatiche di Nettuno, comparate con quelle di Urano, siano dovute in parte al suo calore interno più elevato. Sebbene Nettuno sia distante dal Sole una volta e mezzo più di Urano e riceva quindi solo il 40% della quantità di luce, la superficie dei due pianeti è grosso modo uguale. Le regioni più superficiali della troposfera di Nettuno raggiungono la bassa temperatura di  $-221,4^{\circ}\text{C}$ . Alla profondità in cui la pressione atmosferica è pari a 1 bar la temperatura è di  $-201,15^{\circ}\text{C}$ . In profondità nello strato di gas, tuttavia, la temperatura sale costantemente; così come Urano, la sorgente di questo riscaldamento è sconosciuta, ma la discrepanza è maggiore: Urano irradia solo 1,1 volte la quantità di energia che riceve dal Sole, mentre Nettuno ne irradia 2,61 volte tanto, indicando che la sua sorgente interna di calore genera il 161% in più dell'energia ricevuta dal Sole. Nettuno è il pianeta del Sistema solare più lontano dal Sole, ma la sua sorgente interna di energia è sufficiente a causare i venti planetari più veloci visti in tutto il Sistema solare. Sono state suggerite alcune possibili spiegazioni fra le quali il calore radiogenico proveniente dal nucleo del pianeta, la dissociazione del metano in catene di idrocarburi sotto elevate pressioni atmosferiche, e i moti convettivi della bassa atmosfera che causano onde di gravità che si dissolvono sopra la tropopausa.

## Atmosfera

Ad alta quota, l'atmosfera di Nettuno è formata all'80% da idrogeno ed al 19% da elio, e tracce di metano. Notevoli bande di assorbimento del metano si trovano vicino alla lunghezza d'onda dei 600 nm nella parte rossa ed infrarossa dello spettro. Così come per Urano, quest'assorbimento della luce rossa da parte del metano atmosferico contribuisce a conferire a Nettuno il suo caratteristico colore azzurro intenso, sebbene il colore azzurro differisca dal più tenue acquamarina tipico di Urano. Dato che la quantità di metano contenuta nell'atmosfera di Nettuno è simile a quella di Urano, ci dev'essere qualche altra sostanza non conosciuta che contribuisca in modo determinante a conferire questa tonalità così intensa al pianeta.

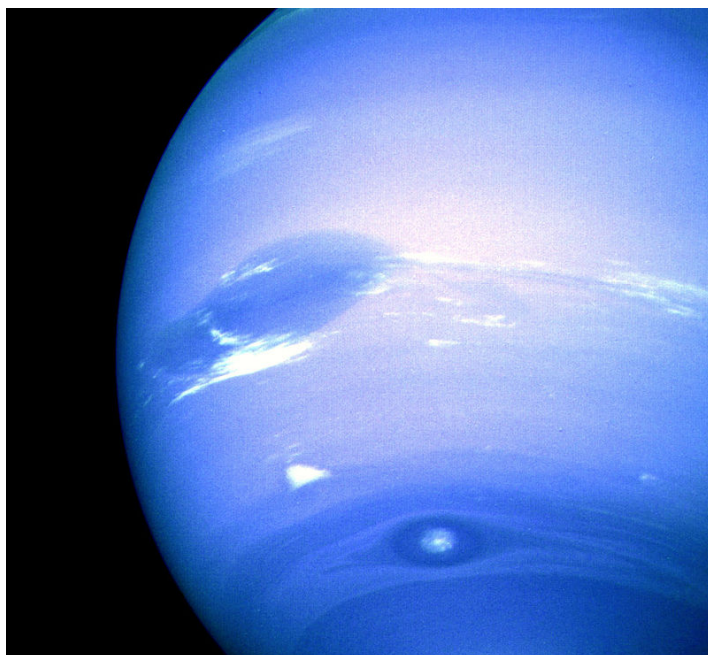
L'atmosfera di Nettuno è suddivisa in due regioni principali: la bassa troposfera, dove la temperatura decresce con l'altitudine, e la stratosfera, dove la temperatura aumenta con l'altitudine; il confine fra le due, la tropopausa si trova a circa 0,1 bar. La stratosfera, dunque, è seguita dalla termosfera alla pressione inferiore a  $10^{-4}$ – $10^{-5}$   $\mu$ bar. L'atmosfera sfuma gradualmente verso l'esosfera. I modelli suggeriscono che la troposfera di Nettuno sia attraversata da nubi di varia composizione a seconda dell'altitudine. Il livello superiore di nubi si trova a pressioni inferiori a 1 bar dove la temperatura è adatta alla condensazione del metano. Con pressioni fra  $1 \times 10^5$  bar si crede si formino nubi di ammoniaca e acido solfidrico; oltre i 5 bar di pressione, le nubi potrebbero essere costituite da ammoniaca, solfato d'ammonio ed acqua. Le nubi più profonde di ghiaccio d'acqua potrebbero formarsi a pressioni attorno ai 50 bar, dove la temperatura raggiunge gli 0 °C. Sotto ancora si potrebbero trovare delle nubi di ammoniaca e acido solfidrico. Sono state osservate nubi d'alta quota su Nettuno che formano delle ombre sopra l'opaco manto nuvoloso sottostante. Ci sono anche delle bande di nubi d'alta quota che circondano il pianeta a latitudini costanti; queste bande disposte a circonferenza hanno degli spessori di 50–150 km e si trovano a circa 50–110 km sopra il manto nuvoloso sottostante. Lo spettro di Nettuno suggerisce che i suoi strati atmosferici inferiori siano nebbiosi a causa della concentrazione di prodotti della fotolisi ultravioletta del metano, come etano e acetilene; l'atmosfera contiene anche tracce di monossido di carbonio e acido cianidrico. La stratosfera del pianeta è più tiepida di quella di Urano a causa dell'elevata concentrazione di idrocarburi. Per ragioni ancora non conosciute la termosfera planetaria possiede una temperatura insolitamente alta, pari a circa 750 K. Il pianeta è troppo lontano dal Sole perché il calore sia generato dalla radiazione ultravioletta; una possibilità per spiegare il meccanismo di riscaldamento è l'interazione atmosferica fra ioni nel campo magnetico del pianeta. Un'altra possibile causa è data dalle onde di gravità dall'interno che si disperdono nell'atmosfera. La termosfera contiene tracce di diossido di carbonio ed acqua, che potrebbero provenire da sorgenti esterne, come meteoriti e polveri.



**Una scia di nubi d'alta quota su Nettuno crea un'ombra sulla superficie di nubi sottostante**

## Fenomeni Meteorologici

Una differenza fra Nettuno e Urano che mostrò la sonda spaziale Voyager 2 fu il livello tipico di attività meteorologica. Quando la sonda sorvolò Urano, nel 1986, questo pianeta era visivamente privo di attività atmosferica, in contrasto, Nettuno mostrava notevoli fenomeni climatici durante il sorvolo della sonda, avvenuto nel 1989. Tuttavia, le osservazioni compiute su Urano nel corso del XXI secolo, quando questi entrò nella fase equinoziale, mostrarono un'attività atmosferica mai vista prima, rendendolo di fatto molto più simile a Nettuno rispetto a quanto si pensava in precedenza. Il tempo meteorologico di Nettuno è caratterizzato da sistemi tempestosi estremamente dinamici, con venti che raggiungono la velocità supersonica di 600 m/s. Più tipicamente, tracciando il movimento delle nubi persistenti, la velocità del vento sembra variare dai 20 m/s in direzione est fino ai 235 m/s in direzione ovest. Sulla cima delle nubi, i venti predominanti variano in velocità dai 400 m/s lungo l'equatore ai 250 m/s sui poli. Molti dei venti di Nettuno si muovono in direzione opposta rispetto alla rotazione del pianeta. Il livello generale dei venti mostra una rotazione progradata alle alte latitudini e retrogradata alle basse latitudini; si ritiene che la differenza della direzione dei flussi ventosi sia un effetto superficiale e non dovuto ad alcun processo atmosferico più profondo. A 70° S di latitudine, un getto ad alta velocità viaggia a  $300 \text{ m s}^{-1}$ . L'abbondanza di metano, etano e acetilene all'equatore di Nettuno è 10–100 volte superiore di quella dei poli; ciò è interpretato come un'evidenza della presenza di fenomeni di risalita all'equatore e di subsidenza verso i poli. Nel 2007 fu scoperto che gli strati superiori della troposfera del polo sud di Nettuno erano di circa 10 °C più tiepidi che nel resto del pianeta, con una media di circa -200 °C. Il differenziale di calore è sufficiente per consentire al gas metano, che in altri punti si gela nell'alta atmosfera del pianeta, di essere espulso verso lo spazio. Il relativo hot spot è dovuto all'inclinazione dell'asse di Nettuno, che ha esposto il polo sud al Sole per l'ultimo quarto di anno nettuniano, pari a circa 40 anni terrestri; similmente a quanto avviene nella Terra, l'alternanza delle stagioni farà in modo che il polo esposto al Sole sarà in seguito il polo nord, causando così il riscaldamento e la successiva emissione di metano dall'atmosfera in quest'ultimo polo. A causa del cambiamento stagionale, le bande di nubi dell'emisfero sud di Nettuno sono aumentate in dimensioni e albedo; questo processo fu osservato inizialmente nel 1980 e ci si aspetta che finirà attorno al 2020. Il lungo periodo orbitale di Nettuno causa un alternarsi stagionale in quarant'anni.

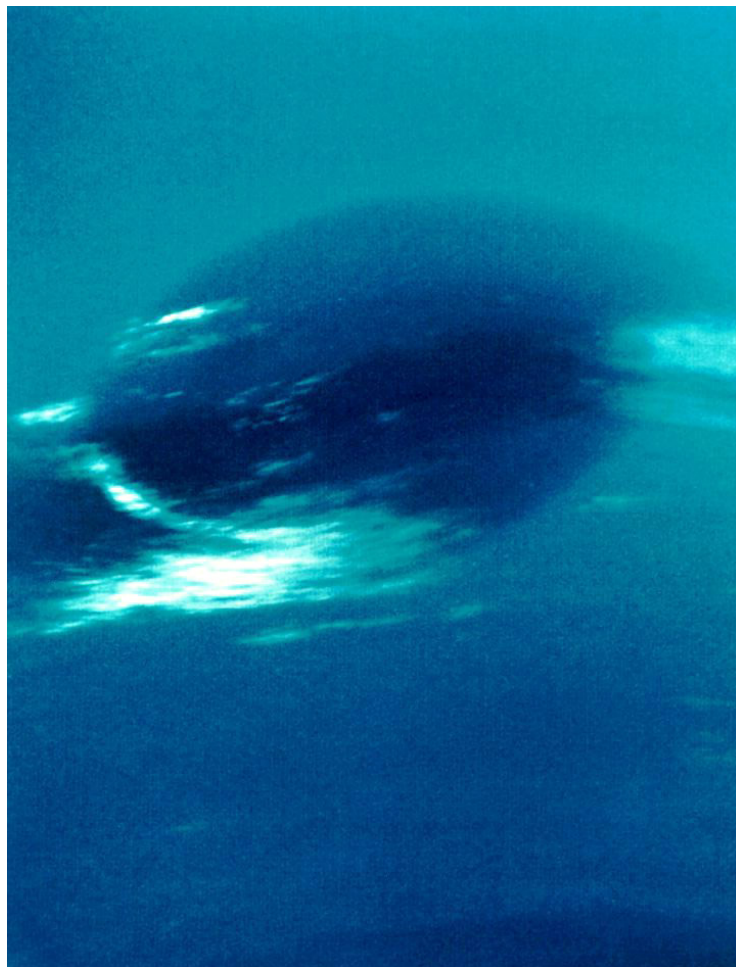




**La Grande Macchia Scura al centro, Scooter la nube bianca in mezzo, e la Piccola Macchia Scura in basso.**

## **Tempeste**

Nel 1989 fu scoperta dalla sonda Voyager 2 la Grande Macchia Scura, un sistema di tempeste anticiclonico delle dimensioni di  $13.000 \times 6.600$  km. La tempesta ricordava la Grande Macchia Rossa di Giove; tuttavia, il 2 novembre 1994, il Telescopio spaziale Hubble non riuscì ad osservare questa macchia scura sul pianeta. Al suo posto apparve una nuova tempesta simile alla Grande Macchia Scura nell'emisfero nord. Lo Scooter è un'altra tempesta, una nube bianca posta più a sud della Grande Macchia Scura; il suo nome deriva dalla sua prima osservazione nel mese precedente al sorvolo della sonda Voyager 2, si muoveva più velocemente della Grande Macchia Scura. Immagini successive rivelarono nubi ancora più rapide. La Piccola Macchia Scura è invece una tempesta ciclonica meridionale, la seconda tempesta più potente osservata durante il transito del 1989; inizialmente era completamente scura, ma come la sonda si avvicinò, iniziò a mostrarsi una macchia più chiara, visibile in tutte le immagini ad alta risoluzione. Si ritiene che le macchie scure di Nettuno siano posizionate nella troposfera ad altezze inferiori rispetto alle nubi più bianche e luminose del pianeta, così appaiono come buchi nello strato di nubi sovrastante; dal momento che sono strutture stabili che possono persistere per diversi mesi, si crede che possano essere strutture a vortice. Spesso nei pressi di queste strutture si trovano nubi di metano più brillanti e persistenti, che si formano presumibilmente all'altezza della tropopausa. La persistenza di nubi compagne mostra che alcune macchie oscure continuano ad esistere come cicloni, sebbene non siano più visibili come punti scuri; le macchie scure potrebbero anche dissiparsi quando migrano troppo vicino all'equatore, o con altri meccanismi sconosciuti.



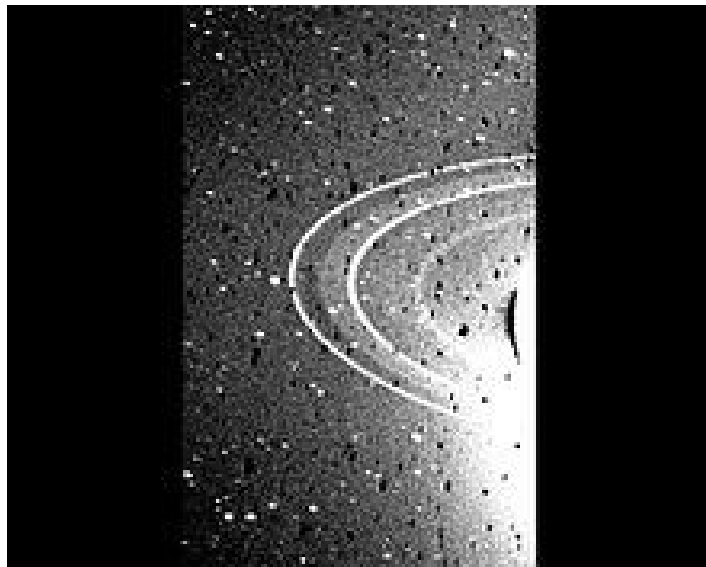
**La Grande Macchia Scura vista dalla Voyager 2**

## Magnetosfera

Un'altra somiglianza fra Nettuno e Urano risiede nella magnetosfera, con un campo magnetico fortemente inclinato verso l'asse di rotazione di  $47^\circ$  e decentrato di almeno 0,55 raggi circa 13.500 km rispetto al nucleo fisico del pianeta. Prima dell'arrivo della sonda Voyager 2 su Nettuno, era stato ipotizzato che la magnetosfera inclinata di Urano fosse il risultato della sua rotazione obliqua; tuttavia, comparando i campi magnetici dei due pianeti, gli scienziati pensano che questa orientazione estrema potrebbe essere caratteristica dei flussi presenti all'interno dei pianeti. Questo campo potrebbe essere generato da convezioni del fluido interno in un involucro sferico sottile di liquido conduttore elettrico (probabilmente composto da ammoniaca, metano e acqua che causano un'azione dinamo). Il campo magnetico alla superficie equatoriale di Nettuno è stimato sui  $1,42 \mu\text{T}$ , per un momento magnetico di  $2,16 \times 10^{17} \text{ Tm}^3$ . Il campo magnetico di Nettuno possiede una geometria complessa che include componenti non-dipolari, incluso un forte momento di quadrupolo che potrebbe superare in forza pure quello di dipolo. D'altra parte la Terra, Giove e Saturno hanno solo dei momenti di quadrupolo relativamente piccoli e i loro campi sono meno inclinati rispetto all'asse polare. Il grande momento di quadrupolo di Nettuno potrebbe essere il risultato del disallineamento dal centro del pianeta e dai vincoli geometrici del generatore della dinamo del campo. Il bow shock di Nettuno, ossia il punto in cui la magnetosfera inizia a rallentare il vento solare, avviene alla distanza di 34,9 volte il raggio del pianeta; la magnetopausa, ossia il punto in cui la pressione della magnetosfera controbilancia il vento solare, si estende alla distanza di 23–26,5 volte il raggio di Nettuno. La coda della magnetosfera si estende all'esterno fino ad almeno 72 volte il raggio del pianeta e probabilmente molto oltre.

## Anelli Planetari

Nettuno ha un sistema di anelli planetari, uno dei più sottili del Sistema solare. Gli anelli potrebbero consistere di particelle legate con silicati o materiali composti da carbonio, che conferisce loro un colore tendente al rossastro. In aggiunta al sottile Anello Adams, a 63.000 km dal centro del pianeta, si trova l'Anello Leverrier, a 53.000 km, ed il suo più vasto e più debole Anello Galle, a 42.000 km. Un'estensione più lontana di quest'ultimo anello è stata chiamata Lassell; è legata al suo bordo più esterno dall'Anello Arago, a 57.000 km. Il primo di questi anelli planetari fu scoperto nel 1968 da un gruppo di ricerca guidato da Edward Guinan, ma si era in seguito pensato che quest'anello potesse essere incompleto. Evidenze che l'anello avrebbe avuto delle interruzioni giunsero durante un'occultazione stellare nel 1984 quando gli anelli oscurarono una stella in immersione ma non in emersione. Immagini della sonda Voyager 2, prese nel 1989, mostrarono invece che gli anelli di Nettuno erano molteplici. Questi anelli hanno una struttura a gruppi, la cui causa non è ben compresa ma che potrebbe essere dovuta all'interazione gravitazionale con le piccole lune in orbita nei pressi. L'anello più interno, Adams, contiene cinque archi maggiori chiamati Courage, Liberté, Égalité 1, Égalité 2 e Fraternité. L'esistenza degli archi è stata difficile da spiegare poiché le leggi del moto predirebbero che gli archi verrebbero dispersi in un anello uniforme in una scala temporale molto breve. Gli astronomi ritengono che gli archi siano rinchiusi entro le loro forme attuali a causa degli effetti gravitazionali di Galatea, una luna posta all'interno dell'anello. Osservazioni condotte dalla Terra annunciate nel 2005 sembravano mostrare che gli anelli di Nettuno siano molto più instabili di quanto in precedenza creduto. Immagini prese con i Telescopi Keck nel 2002 e 2003 mostrano un decadimento considerevole negli anelli quando vengono comparati con le immagini prese dalla Voyager 2. In particolare, sembra che l'arco Liberté possa dissolversi entro la fine del XXI secolo.



**Gli anelli di Nettuno, visti dalla sonda Voyager 2 nel 1989**

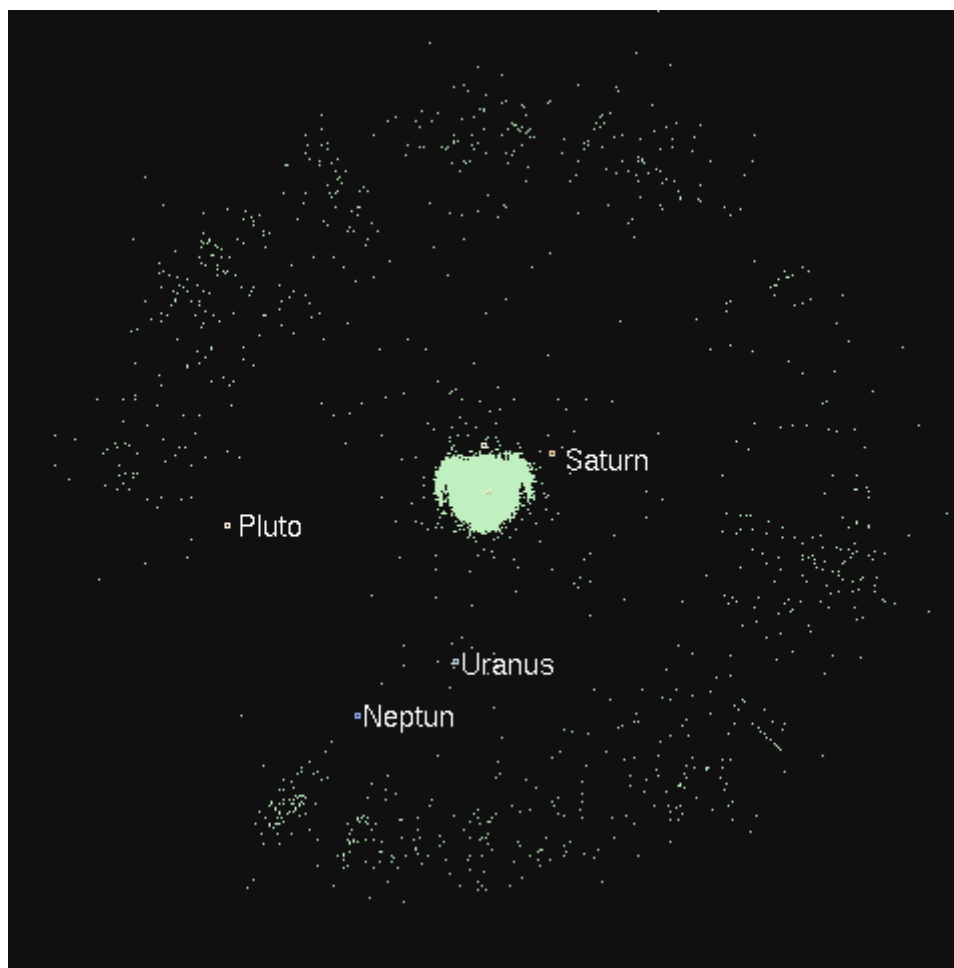
## **Satelliti Naturali**

Nettuno possiede quattordici satelliti naturali conosciuti, il maggiore dei quali è Tritone; gli altri satelliti principali sono Nereide, Proteo e Larissa. Tritone è l'unico satellite di Nettuno che possiede una forma ellissoidale; fu individuato per la prima volta dall'astronomo William Lassell appena 17 giorni dopo la scoperta del pianeta madre. Orbita in direzione retrograda rispetto a Nettuno, a differenza di tutti gli altri satelliti principali del sistema solare; è in rotazione sincrona con Nettuno e la sua orbita è in decadimento costante. A parte Tritone il satellite più interessante è Nereide, la cui orbita è la più eccentrica dell'intero sistema solare. Fra il luglio ed il settembre 1989 la sonda statunitense Voyager 2 ha individuato sei nuovi satelliti fra i quali spicca Proteo, le cui dimensioni sarebbero quasi sufficienti a conferirgli una forma sferoidale. È il secondo satellite del sistema di Nettuno, pur con una massa pari ad appena lo 0,25% di quella di Tritone. Una nuova serie di scoperte è stata annunciata nel 2004 e si tratta di satelliti minori e fortemente irregolari. Nel luglio del 2013 Mark Showalter scopre il 14° satellite, denominato Ippocampo, da immagini ottenute dal telescopio spaziale Hubble tra il 2004 e il 2009.



Le falci di Nettuno e Tritone, fotografate dalla Voyager 2 durante il suo allontanamento dal sistema nettuniano

## ***Fascia di Kuiper***



**Distribuzione degli oggetti della fascia di Kuiper finora scoperti.**

La fascia di Kuiper IPA: /'kaip.ə/ o fascia di Edgeworth-Kuiper dal nome dei due astronomi Kenneth Edgeworth e Gerard Peter Kuiper è una regione del sistema solare che si estende dall'orbita di Nettuno alla distanza di 30 UA fino a 50 UA dal Sole. Si tratta di una fascia costituita da corpi minori del sistema solare esterna rispetto all'orbita dei pianeti maggiori, simile alla fascia principale degli asteroidi, ma 20 volte più estesa e da 20 a 200 volte più massiccia. Inoltre, mentre la fascia principale è costituita in gran parte da asteroidi di natura rocciosa, gli oggetti della fascia di Kuiper sono composti principalmente da sostanze volatili congelate, come ammoniaca, metano e acqua. Nella fascia sono stati scoperti oltre 1.000 oggetti Kuiper belt objects, o KBO e si pensa che ne possano esistere oltre 100.000 con diametro superiore ai 100 km. Il più grande è Plutone e il più massiccio il pianeta nano Eris, scoperto nel 2005, anche se parte degli scienziati considerano Eris facente parte del disco diffuso piuttosto che della fascia di Kuiper. A partire dall'anno 2000 sono stati trovati altri oggetti di dimensioni ragguardevoli: 50.000 Quaoar, scoperto nel 2002, grande la metà di Plutone e più grande di Cerere, il maggiore degli asteroidi tradizionali. L'esatta classificazione di questi oggetti non è chiara, perché probabilmente sono molto differenti dagli asteroidi più interni. Alcuni satelliti dei pianeti del sistema solare sembrano provenire dalla fascia di Kuiper, come Tritone, la maggiore delle lune di Nettuno, e la luna saturniana Febe. La maggior parte dei KBO, come si è visto usando la spettroscopia, sono costituiti da ghiaccio e hanno la stessa composizione chimica delle comete e così come nelle comete è evidente la presenza di composti organici. Molti astronomi hanno pensato che siano appunto comete periodiche con periodo orbitale inferiore ai 200 anni che, non avvicinandosi mai al Sole, non emettono la loro coda. Tuttavia, a metà anni

Novanta si è dimostrato che la fascia di Kuiper è dinamicamente stabile e che il vero luogo di origine delle comete sia nel disco diffuso, una zona dinamicamente attiva creatasi dallo spostamento verso l'esterno di Nettuno, 4,5 miliardi anni fa.

## **Storia**

I primi astronomi a suggerire l'esistenza di questa fascia furono nel 1930 Frederick C. Leonard e Armin Otto Leuschner, che suggerirono che Plutone fosse solo uno dei tanti oggetti planetari a lungo periodo non ancora scoperti. Kenneth E. Edgeworth nel 1943 suggerì che quello spazio oltre Nettuno doveva essere formato da numerosi piccoli corpi che non si condensarono in pianeti durante la formazione del sistema solare perché a quella distanza erano troppo separati. Nel 1951 Gerard Kuiper ipotizzò che la fascia fosse presente all'epoca della formazione del sistema solare, ma che ora fosse scomparsa. Congetture più dettagliate furono esposte da Al G. W. Cameron nel 1962, da Fred L. Whipple nel 1964, e da Julio Ángel Fernández nel 1980. La fascia e gli oggetti in essa contenuti furono chiamati col nome di Kuiper dopo la scoperta di 1992 QB1, il primo oggetto conosciuto.

## **Nome**

Gli astronomi a volte usano il nome alternativo fascia di Edgeworth-Kuiper e talvolta i KBO sono indicati come EKO. Tuttavia, Brian Marsden sostenne che il merito non sarebbe da attribuire né a Edgeworth né a Kuiper, perché nessuno dei due ha scritto qualcosa di paragonabile a ciò che si osserva, dando maggior credito a Fred Whipple. Invece David Jewitt afferma che Fernández meriterebbe il maggior credito per la previsione sulla fascia di Kuiper nel 1980, pubblicata su *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. I KBO sono a volte chiamati in inglese Kuiperoids nome suggerito da Clyde Tombaugh, mentre gli oggetti classici della Fascia sono chiamati cubewani. Il termine oggetto transnettuniano TNO è meno controverso e accettato da vari astronomi, nonostante non sia un sinonimo esatto>: il termine TNO indica tutti gli oggetti in orbita attorno al Sole oltre l'orbita di Nettuno, non solo quelli nella fascia di Kuiper.



**Gerard Kuiper**

## **Formazione**

Le origini e la struttura della fascia di Kuiper non sono state completamente chiarite e il completamento di alcuni telescopi a grande campo, come il Pan-STARRS e il LSST, dovrebbe



consentire l'individuazione di altri KBO sconosciuti che potrebbero dare un quadro più chiaro su questa zona interna al sistema solare. La fascia di Kuiper è formata da planetesimi, frammenti del disco proto planetario attorno al Sole che miliardi di anni fa non riuscì a fondersi completamente per formare pianeti veri e propri, rimanendo corpi di piccole dimensioni, con i più grandi che hanno un diametro inferiore ai 3.000 km. Simulazioni al computer hanno mostrato che la fascia di Kuiper è stata fortemente influenzata da Giove e Nettuno, suggerendo inoltre che né Urano, né Nettuno si siano formati nelle loro attuali posizioni poiché non esisteva materia sufficiente in quella zona di spazio per la formazione di pianeti giganti, suggerendo invece che si siano formati molto più vicino a Giove. Ben presto la vicinanza ai più massicci Giove e Saturno provocò la migrazione di Urano e Nettuno verso l'esterno del sistema solare, a causa dello scattering gravitazionale provocato dai due pianeti più massicci, le cui orbite si spostarono al punto da essere in risonanza 2:1 tra loro. Lo spostamento di Nettuno verso l'esterno causò il caos e la dispersione di molti oggetti della fascia di Kuiper. Si pensa che la popolazione primordiale della Fascia di Kuiper sia stata ridotta del 99% a causa delle interazioni gravitazionali primordiali, spostando le orbite dei piccoli oggetti rimasti verso l'esterno. Tuttavia il modello di Nizza, il modello più popolare tra la comunità scientifica a proposito delle dinamiche del sistema solare, non riesce ancora a spiegare la distribuzione degli oggetti della Fascia di Kuiper poiché prevede eccentricità più elevate rispetto a quelle osservate da una parte dei KBO conosciuti, in particolare degli oggetti della popolazione fredda, che si sarebbero formati nella stessa zona dove attualmente si trovano, al contrario della popolazione calda, migrata all'esterno a causa delle interazioni avute coi giganti gassosi. Secondo uno studio di Rodney Gomes del 2012, nella fascia dovrebbero trovarsi anche oggetti di massa considerevole, paragonabili a Marte o alla Terra, per spiegare le orbite allungate di alcuni KBO. Sebbene alcuni astronomi abbiano supportato Gomes, altri come il planetologo Harold Levison nutrono seri dubbi sull'ipotesi di Gomes e sulla possibilità che un corpo di dimensioni minori di Nettuno possa influenzare le orbite degli oggetti della Fascia di Kuiper.

## Struttura

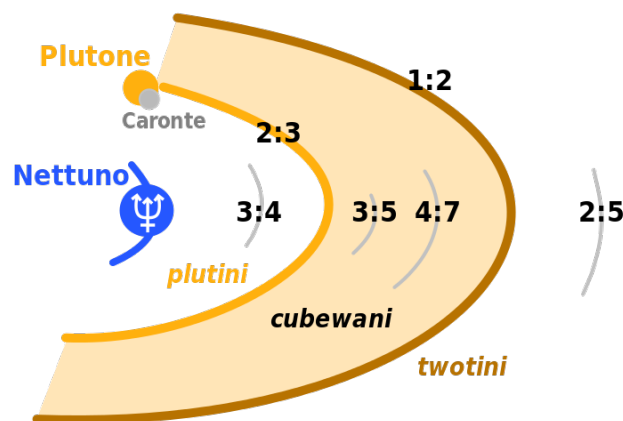
Comprendendo le sue regioni periferiche, la fascia di Kuiper si estende da 30 a 55 UA circa dal Sole, tuttavia talvolta viene considerata estendersi solo nella parte di spazio ove gli oggetti sono in risonanza orbitale 2:3 con Nettuno, cioè a 39,5 UA, e fino a 48 UA, dove gli oggetti hanno invece una risonanza 1:2 col pianeta gigante. La fascia di Kuiper è piuttosto spessa; la principale concentrazione di oggetti si estende fino a dieci gradi fuori dal piano dell'eclittica, sebbene oggetti siano presenti anche molto più lontano dall'eclittica. La forma della fascia di Kuiper è quindi più simile a quella di un toro o di una ciambella, piuttosto che a quella di una cintura. La presenza di Nettuno ha un profondo effetto sulla struttura della fascia di Kuiper a causa delle risonanze orbitali. Nel corso di un lasso di tempo paragonabile all'età del sistema solare, la gravità di Nettuno destabilizza le orbite degli oggetti che vengono a trovarsi in alcune regioni, mandandoli nel sistema solare interno, oppure spingendoli all'esterno, verso il disco diffuso o nello spazio interstellare. L'influenza gravitazionale di Nettuno fa sì che siano presenti lacune pronunciate nella struttura attuale della fascia, simili alle lacune di Kirkwood nella fascia degli asteroidi. Nella regione compresa tra 40 e 42 UA, per esempio, nessun oggetto può mantenere un'orbita stabile su scale temporali di miliardi di anni; quindi, gli oggetti osservati in quella regione sono evidentemente migrati in tempi recenti.

## KBO Classici

Tra le due zone con diversa risonanza con Nettuno 2:3 e 1:2, da 42 a 48 UA circa dal Sole, l'influenza gravitazionale di Nettuno è trascurabile, e gli oggetti possono mantenere le loro orbite invariate nel tempo. Questa regione è conosciuta come la fascia di Kuiper classica, e i suoi membri comprendono circa i due terzi dei KBO osservati fino a oggi. 15760 1992 QB1, il primo KBO moderno scoperto, Plutone e Caronte a parte, è considerato il prototipo di questo gruppo e da esso deriva il termine cubewani, termine che indica appunto i KBO classici e che è la traduzione

fonetica della sigla inglese QB1-os cubewanos. Secondo una linea guida della IAU il nome da dare ai KBO classici è quello di esseri mitologici associati alla creazione. La fascia di Kuiper classica sembra essere composta da due diverse popolazioni. La prima, nota come popolazione dinamicamente fredda, è composta da oggetti con orbite molto simili a quelle dei pianeti, ossia quasi circolari, con una eccentricità orbitale inferiore a 0,1, e inclinazioni orbitali non superiori a  $10^\circ$ . La seconda, la popolazione dinamicamente calda, ha orbite molto più inclinate rispetto all'eclittica, fino a  $30^\circ$ . Le due popolazioni sono state nominate in questo modo non per una differenza di temperatura, ma per l'analogia con le particelle di un gas, che aumentano la loro velocità relativa con la temperatura. Le due popolazioni non solo possiedono orbite diverse, ma diversi colori; la popolazione fredda è decisamente più rossa rispetto alla calda. Se il colore riflettesse diverse composizioni, indicherebbe che esse si siano formate in diverse regioni. Si ritiene che la popolazione calda si sia formata nei pressi di Giove e sia stata espulsa dai movimenti e dalle interazioni gravitazionali dei giganti gassosi. Inoltre si ritiene che la popolazione fredda si sia formata più o meno nella posizione attuale, anche se potrebbe essere stata scagliata verso l'esterno successivamente, durante la migrazione di Nettuno.

### **Fascia di Kuiper e risonanza orbitale**

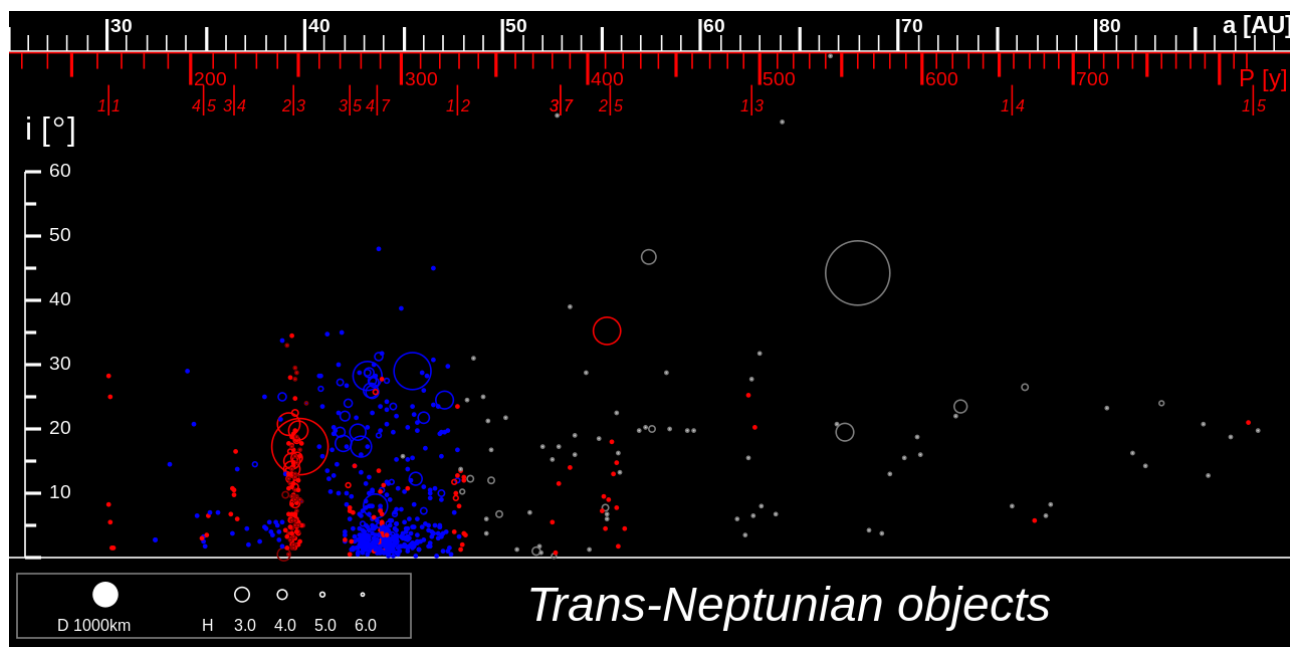


Le orbite e le risonanze dei diversi gruppi degli oggetti della Fascia di Kuiper.

### **KBO Risonanti**

Quando il periodo orbitale di un oggetto è un rapporto intero esatto con intero piccolo del periodo orbitale di Nettuno l'oggetto è sincronizzato col pianeta e si trova in risonanza orbitale. Se un oggetto compie due orbite attorno al Sole nello stesso tempo in cui Nettuno ne compie tre, allora l'oggetto è in risonanza 2:3 con Nettuno. La caratteristica di questi oggetti è di avere un semiasse maggiore di circa 39,4 UA e di questo tipo ne sono conosciuti circa 200, tra cui Plutone e le sue lune, prototipo dei membri di questa classe noti come Plutini. I Plutini hanno elevate eccentricità orbitali, suggerendo che essi non hanno avuto origine nelle loro posizioni attuali, ma sono stati scagliati verso il sistema solare esterno dalla migrazione di Nettuno. Le linee guida della IAU impongono che tutti i Plutini debbano, come Plutone, essere nominati a divinità associate al mondo sotterraneo. La zona con risonanza orbitale 1:2, i cui oggetti completano un'orbita mentre Nettuno ne compie due e hanno semiasse maggiori di  $\sim 47,7$  UA, è scarsamente popolata. I membri di questa classe sono noti come twotini. Esistono altre risonanze, con rapporti 3:4, 3:5, 4:7 e 2:5. Nettuno possiede anche un certo numero di asteroidi troiani che occupano i suoi punti lagrangiani L4 e L5; questi sono spesso in risonanza 1:1 con Nettuno e hanno orbite generalmente stabili. Non ci sono oggetti con semiasse maggiori di 39 UA. Questo fenomeno non può essere spiegato dalle risonanze attuali. L'ipotesi comunemente accettata è che la zona fu attraversata da aree di risonanza orbitale instabili durante la migrazione di Nettuno trattandosi di aree di influenza

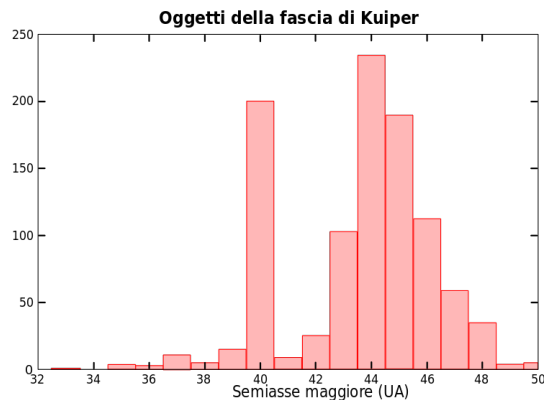
gravitazionale, a seguito di masse in movimento, anche le aree di risonanza modificano la propria posizione nello spazio - e che tutti gli oggetti al suo interno ne furono quindi espulsi.



**Distribuzione degli oggetti della fascia di Kuiper: in blu i cubewani, in rosso i plutini e in grigio gli oggetti del disco diffuso SDO. Sono indicate inclinazione orbitale e semiasse maggiore, mentre i cerchi rappresentano le dimensioni relative degli oggetti.**

## Scogliera di Kuiper

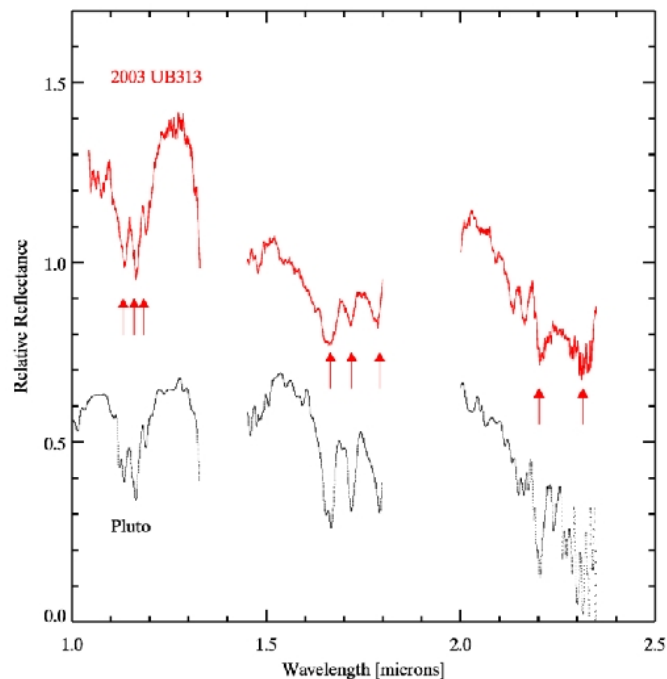
La distribuzione degli oggetti secondo la distanza dal Sole mostra una brusca interruzione a 48 UA, dove sono presenti i twotini. Oltre, alla distanza di 55 UA, si trovano alcuni oggetti con risonanza 2:5. Le stime della massa primordiale necessaria per formare Urano e Nettuno, così come corpi grandi come Plutone, suggerivano che il numero di oggetti di grandi dimensioni dovesse aumentare di un fattore due oltre le 50 UA; quindi, aver osservato una scarsa presenza di oggetti oltre questa precisa distanza, conosciuta come scogliera di Kuiper, è stato un risultato inatteso e la causa non è ancora nota al momento. Una possibile spiegazione è che il materiale presente a quella distanza fosse troppo scarso o troppo diffuso perché si potessero formare oggetti di grandi dimensioni. Secondo alcuni astronomi, come Alan Stern e Patryk Lykawka, la causa potrebbe essere l'interazione gravitazionale di un oggetto di massa planetaria ancora sconosciuto, della dimensione di Marte o della Terra. Un'ipotesi simile è stata suggerita nel 2012 dall'astronomo brasiliano Rodney Gomes, che oltre a prevedere un oggetto delle dimensioni di Marte a 53 UA, aggiunge che il pianeta sconosciuto potrebbe avere le dimensioni di Nettuno ed essere posto a 1.500 UA dal Sole. Mentre alcuni scienziati hanno sostenuto questi studi con cautela, altri hanno liquidato l'ipotesi senza mezzi termini.



Istogramma del numero degli oggetti della fascia di Kuiper in relazione al loro semiasse maggiore.

## Composizione

Gli oggetti della fascia di Kuiper sono essenzialmente costituiti da ghiacci, composti generalmente da una miscela di idrocarburi leggeri come il metano, ammoniaca e ghiaccio d'acqua, una composizione simile a quella delle comete, con una densità minore di  $1 \text{ g cm}^{-3}$ . La temperatura della fascia è di appena 50 K, così che diversi composti che sarebbero di natura gassosa se più vicini al Sole rimangono solidi. A causa delle loro piccole dimensioni e della grande distanza dalla Terra, la composizione chimica dei KBO è molto difficile da determinare. Il metodo principale con cui gli astronomi determinano la composizione di un oggetto celeste è la spettroscopia. Quando la luce di un oggetto viene suddivisa nelle sue componenti, si forma un'immagine simile a quella di un arcobaleno. Diverse sostanze assorbono la luce a diverse lunghezze d'onda e quando viene osservato un oggetto specifico appaiono delle linee scure, chiamate righe di assorbimento, uniche per ogni elemento o composto; ciò consente agli astronomi di determinarne la composizione chimica dell'oggetto. Inizialmente era impossibile analizzare dettagliatamente i KBO ed era possibile solo rilevare il colore e gli elementi più semplici presenti in essi. I primi dati mostrarono comunque una vasta gamma di colori tra i KBO osservati, dal grigio neutro al profondo rosso, suggerendo che le loro superfici fossero costituite da una vasta gamma di composti, che andavano dai ghiacci sporchi agli idrocarburi. Questa diversità fu in un certo senso sorprendente poiché ci si aspettava che i KBO fossero uniformemente scuri, avendo perso la maggior parte degli elementi volatili a causa del bombardamento dei raggi cosmici. Furono proposte diverse soluzioni a questa diversità, tra cui il rimodellamento della superficie dovuto a impatti o alla fuoriuscita di gas interni. Tuttavia, analisi spettroscopiche compiute da Jewitt e Luu nel 2001 sugli oggetti della fascia di Kuiper rivelarono che la variazione di colore era troppo estrema per essere facilmente spiegata con impatti casuali. Nonostante la difficoltà dell'analisi spettrale dovuta alla loro scarsa luminosità, Robert H. Brown et al. nel 1996 indicarono che, tramite analisi compiute sull'oggetto 1993 SC, la composizione superficiale dei KBO era generalmente simile a quella di Plutone e Tritone, la luna di Nettuno, entrambi in possesso di grandi quantità di ghiaccio di metano. Il ghiaccio d'acqua è stato rilevato in diversi KBO, tra cui 1996 TO<sub>66</sub>, 38628 Huya e 20.000 Varuna. Nel 2004, Mike Brown et al. determinarono l'esistenza di acqua ghiacciata cristallina e d'idrato di ammoniaca su uno dei più grandi KBO noti, 50.000 Quaoar. Entrambe queste sostanze sarebbero state distrutte nel corso della lunga vita del sistema solare, suggerendo che Quaoar sia stato recentemente rimodellato da un'attività tettonica interna o da impatti di meteoriti.

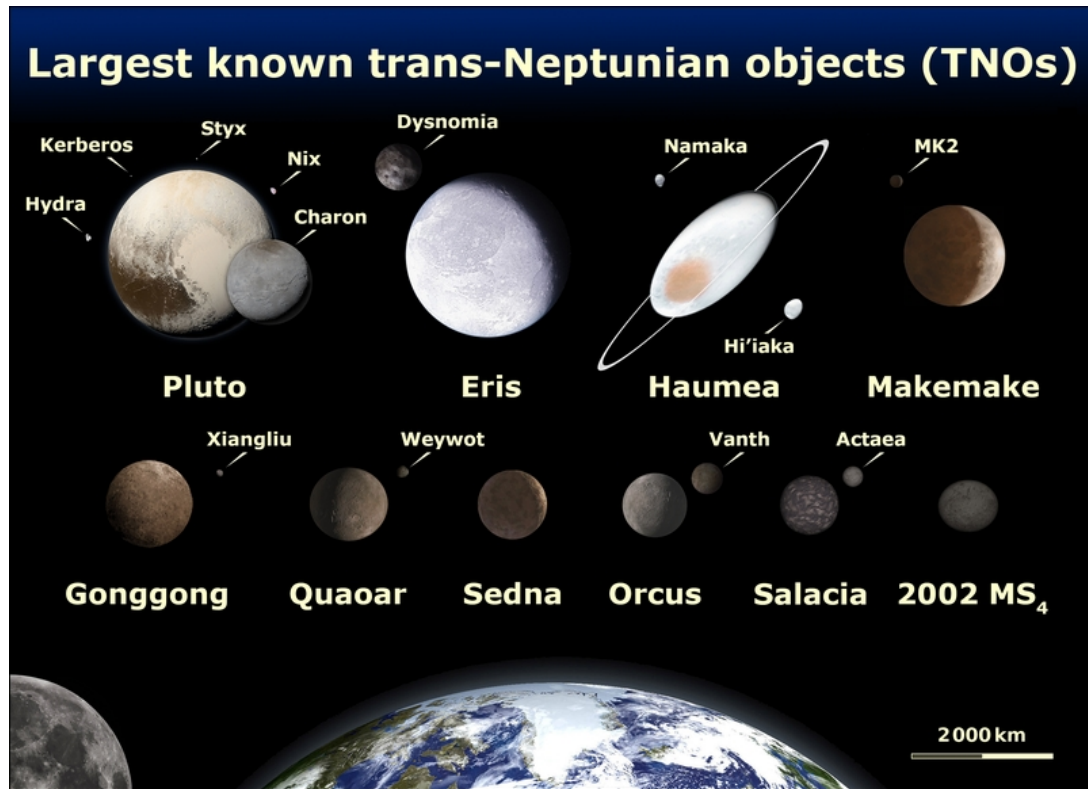


**Gli spettri all'infrarosso di Eris e Plutone: in entrambi sono visibili le linee d'assorbimento del metano.**

## Dimensioni

Nonostante la sua vasta estensione, la massa totale della fascia di Kuiper è relativamente bassa, compresa tra 1/25 e 1/10 della massa della Terra, con alcune stime che arrivano a calcolarla pari solo a un trentesimo di quella terrestre. Tuttavia, i modelli di formazione del sistema solare prevedono una massa totale della fascia di Kuiper pari a 30 masse terrestri; questa teoria difficilmente può essere sconfessata in quanto solo con questa massa mancante si sarebbero potuti formare i KBO con diametro superiore ai 100 km. Se la densità della fascia di Kuiper fosse stata sempre così bassa gli oggetti di grandi dimensioni non si sarebbero potuti formare. Inoltre, l'eccentricità e l'inclinazione delle orbite attuali renderebbero gli impatti piuttosto violenti con la conseguente distruzione degli oggetti piuttosto che un accrescimento degli stessi. Sembra che i membri della fascia di Kuiper si siano formati più vicino al Sole oppure che qualche meccanismo sconosciuto abbia disperso la massa originale. L'influenza attuale di Nettuno è troppo debole per spiegare un eventuale effetto aspirapolvere, anche se il modello di Nizza suggerisce che avrebbe potuto essere la causa della rimozione di massa in passato. La questione rimane aperta tra la comunità scientifica: una teoria proposta prevede uno scenario dove una stella di passaggio disgrega gli oggetti più piccoli in polvere e poi sia colpita e distrutta dalla radiazione solare. È difficile stimare il diametro degli oggetti della fascia di Kuiper e come previsto dal modello solo pochi oggetti hanno dimensioni relativamente grandi. Per quelli di cui sono conosciuti gli elementi orbitali, ad esempio Plutone e Caronte, è possibile conoscere con precisione i diametri tramite le occultazioni delle stelle. Per altri KBO di grandi dimensioni, il diametro può essere stimato da misure termiche nell'infrarosso. Se un corpo ha un'elevata albedo è probabilmente freddo, quindi non produce molta radiazione nell'infrarosso; al contrario, un corpo dall'albedo ridotta produce più radiazione infrarossa. Gli oggetti della fascia di Kuiper sono così lontani dal Sole da essere molto freddi e producono una radiazione con lunghezze d'onda che vanno dai 60 ai 160 micrometri. Questa radiazione è assorbita dall'atmosfera terrestre e gli astronomi devono quindi osservare la radiazione residua nel lontano infrarosso e il diametro stimato è affetto da una grossa incertezza. Inoltre, la radiazione emessa è molto debole e solo i corpi più grandi possono essere osservati con questo metodo.



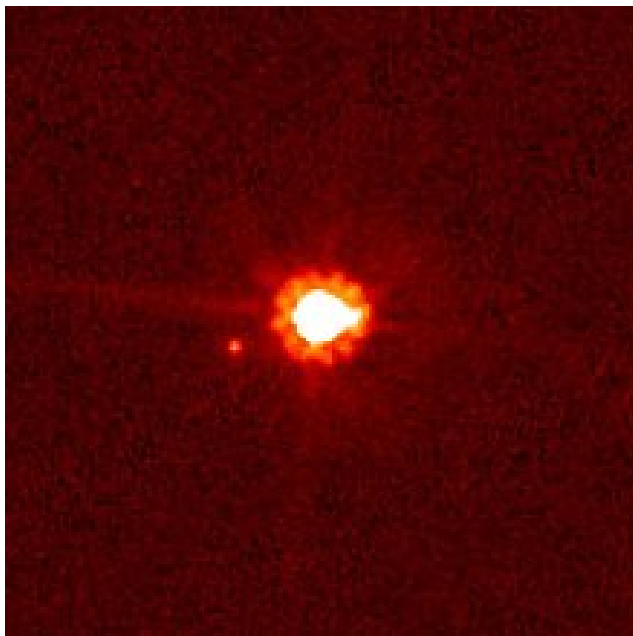


Le dimensioni degli otto maggiori oggetti trans nettuniani comparate con quelle della Terra.

<b>numero</b>	<b>nome</b>	<b>Diametro equatoriale km</b>	<b>albedo</b>	<b>Distanza media dal Sole UA</b>	<b>Data della scoperta</b>	<b>scopritore</b>	<b>Metodo usato per misura diametro</b>
134340	Plutone	2306	0,575	39,4	1930	Clyde Tombaugh	Occultazione
136472	Makemake	1900	0,8	45,7	2005	Trujillo Brown Rabinowitz	Albedo Stimata
136108	Haumea	1500	0,6	43,3	2005	Trujillo Brown Rabinowitz	Albedo Stimata
90482	Orcus	1500	0,1	39,4	2004	Trujillo Brown Rabinowitz	Albedo Stimata
50000	Quaor	1275	0,1	43,25	2002	Trujillo Brown Rabinowitz	Misura del Disco
134340	Caronte	1207	0,4	39,4	1978	James Chisty	Occultazione
28978	Issione	1115	0,4	39,39	2001	Deep Ecliptic Survey	Termico
55636	2002TX <sub>300</sub>	965	0,18	43,19	2002	Neat	Albedo Stimata
55637	2002UX <sub>25</sub>	910	0,08	42,71	2002	Spacewatch	Albedo Stimata
20000	Varuna	710	0,25	43,23	2000	McMillan	Termico
55565	2002AW <sub>197</sub>	725	0,19	47,52	2002	Brown Helin Pravdo Lawrence	Termico

## Oggetti del disco diffuso

Il disco diffuso è una regione scarsamente popolata, la cui parte più interna si sovrappone alla Fascia di Kuiper, e che si estende fino a 100 UA dal Sole e oltre. Gli oggetti percorrono orbite molto ellittiche e spesso molto inclinate rispetto all'eclittica. La maggior parte dei modelli sulla formazione del sistema solare mostra che sia i KBO sia gli oggetti del disco facevano parte di una cintura di comete primordiali e che le successive interazioni gravitazionali, in particolare con Nettuno, spedirono questi oggetti verso l'esterno, alcuni in orbite stabili KBO e altri in orbite instabili, andando a costituire il disco diffuso. A causa dell'instabilità delle orbite, si pensa che il disco diffuso sia il punto di origine di molte comete di corto periodo. Le loro orbite instabili di tanto in tanto portano nel sistema solare interno oggetti ghiacciati che diventano prima centauri, e poi comete di corto periodo. Secondo il Minor Planet Center, che cataloga ufficialmente tutti gli oggetti trans nettuniani, un KBO è un oggetto che orbita esclusivamente all'interno della Fascia di Kuiper, indipendentemente dalla sua origine e composizione. Oggetti trovati al di fuori della fascia sono classificati come oggetti del disco diffuso SDO. Tuttavia, in alcuni ambienti scientifici il termine oggetto della fascia di Kuiper è diventato sinonimo di qualsiasi corpo ghiacciato del sistema solare esterno che fece parte di quella classe iniziale di oggetti al di là dell'orbita di Nettuno, anche se la sua orbita durante la storia del Sistema Solare è sempre stata al di là della Fascia di Kuiper. Eris, che è noto per essere più massiccio di Plutone, viene spesso indicato come un KBO, ma tecnicamente è un SDO. Un consenso tra gli astronomi per quanto riguarda la definizione precisa della fascia di Kuiper deve ancora essere raggiunto. Si pensa che gli stessi centauri, che normalmente non sono considerati parte della fascia di Kuiper, abbiano avuto origine nel disco diffuso e che, al contrario degli altri situati nel disco, siano migrati verso l'interno del sistema solare anziché verso l'esterno; lo stesso Minor Planet Center li classifica assieme agli SDO come oggetti del disco.



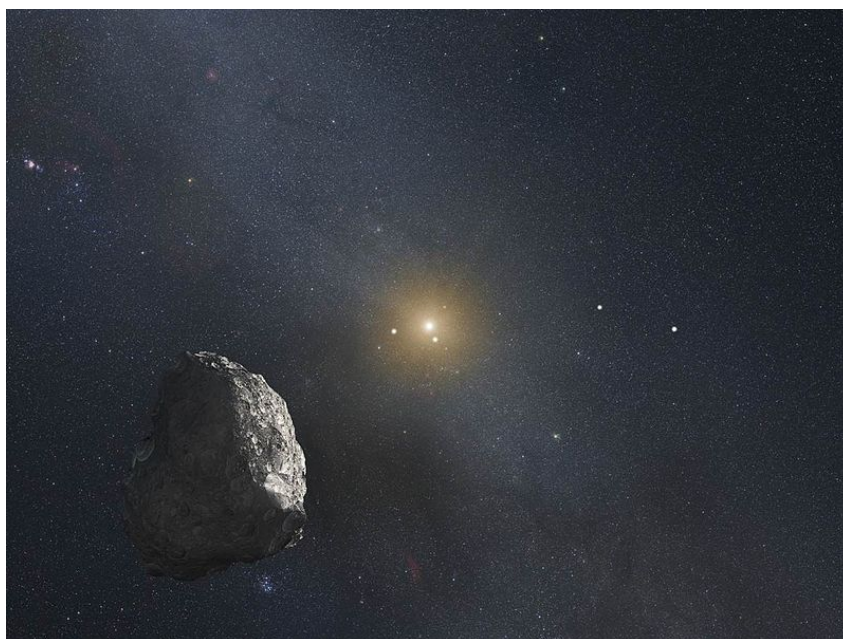
**Eris, il più grande oggetto del disco diffuso conosciuto e il suo satellite Disnomia.**

## Pianeti Ipotetici della Fascia di Kuiper

Basandosi sui calcoli astronomici di Percival Lowell sulle perturbazioni orbitali di Nettuno nella zona al di là di Nettuno, alcuni ritengono vi sia un pianeta ipotetico, detto Pianeta X. In realtà queste perturbazioni, qualora fossero reali, dovrebbero essere causate da una massa molto maggiore di quella di Plutone. In seguito, calcoli più precisi dimostrarono che queste perturbazioni erano solo apparenti e imputabili a un'imprecisa conoscenza della massa di Nettuno. Plutone fu scoperto per caso nel 1930 da Clyde Tombaugh. La sonda WISE della NASA ha scandagliato l'intero cielo nel campo dei raggi infrarossi tra il 2010 e il 2011 senza trovare prove della presenza di pianeti delle dimensioni di Saturno nel raggio di 10.000 UA dal Sole. Inoltre, nessun pianeta più grande di Giove pare esistere entro una distanza di 26.000 UA. Probabilmente nessun pianeta gigante e nessuna piccola stella sono presenti nel sistema solare esterno. Il 20 giugno 2017 uno studio dell'Università dell'Arizona afferma di aver analizzato particolari perturbazioni nella Fascia di Kuiper paragonabili a quelle prodotte da un corpo di massa pari a quella della Terra o di Marte.

## Esplorazione

Il 19 gennaio 2006 è stata lanciata la New Horizons, la prima sonda spaziale che esplorerà la fascia di Kuiper. La missione è guidata da Alan Stern del Southwest Research Institute. La sonda è arrivata nelle vicinanze di Plutone il 14 luglio 2015 e, salvo imprevisti, studierà successivamente un altro KBO. Sarà scelto un KBO con diametro compreso tra 40 e 90 km e di colore bianco o grigio in contrapposizione a Plutone, di colore rossastro. John Spencer, astronomo del team della missione New Horizons, afferma che nessun obiettivo per un incontro con un oggetto della fascia dopo l'avvicinamento a Plutone è ancora stato scelto, in quanto sono in attesa i dati dell'indagine Pan-STARRS che garantiranno il più ampio campo di opzioni possibili. Il progetto Pan-STARRS, parzialmente operativo dal maggio 2010, sorveglia l'intera volta celeste con quattro telecamere digitali da 1.4 gigapixel per individuare eventuali oggetti in movimento, dagli oggetti vicini alla Terra ai KBO. Per accelerare il processo di rilevamento, il gruppo di New Horizons ha promosso una campagna che permette ai cittadini di partecipare alla ricerca di KBO idonei. Il 15 ottobre 2014 la NASA ha annunciato di aver individuato diversi KBO che potrebbero costituire l'obiettivo della New Horizons.

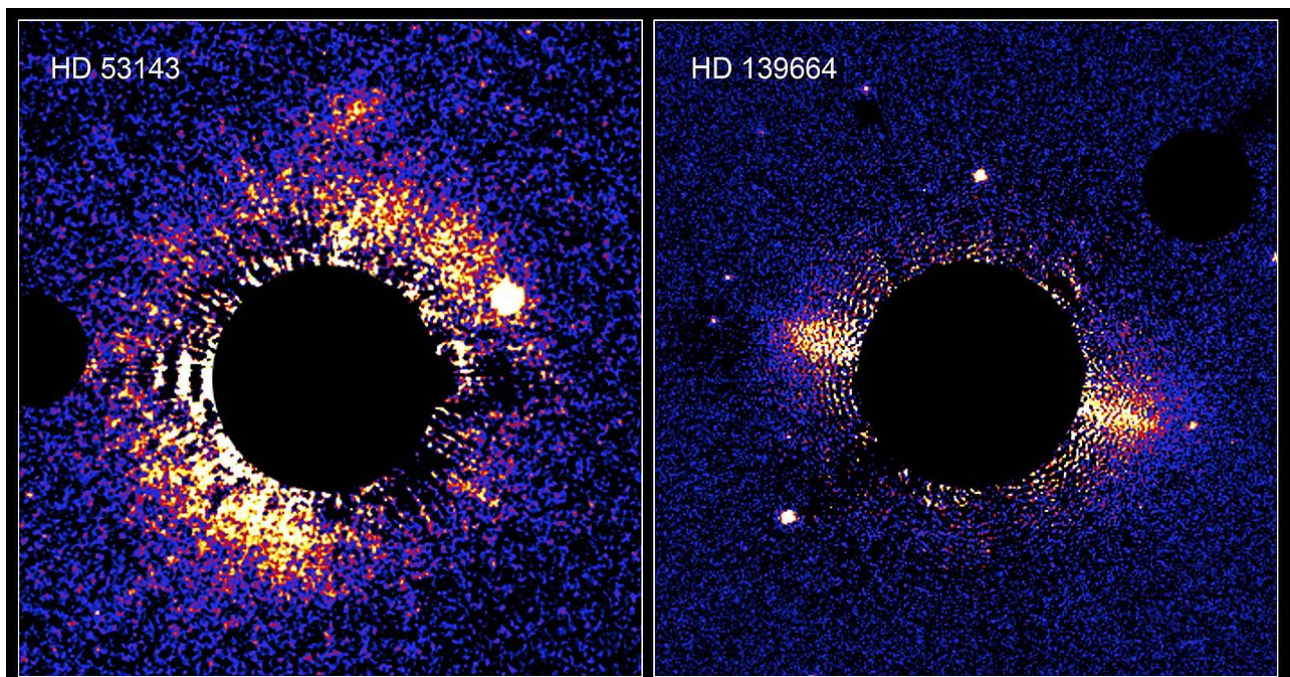


**Immagine artistica di un oggetto della Fascia di Kuiper, possibile obiettivo della sonda New Horizons.**



## Fasce di Kuiper extrasolari

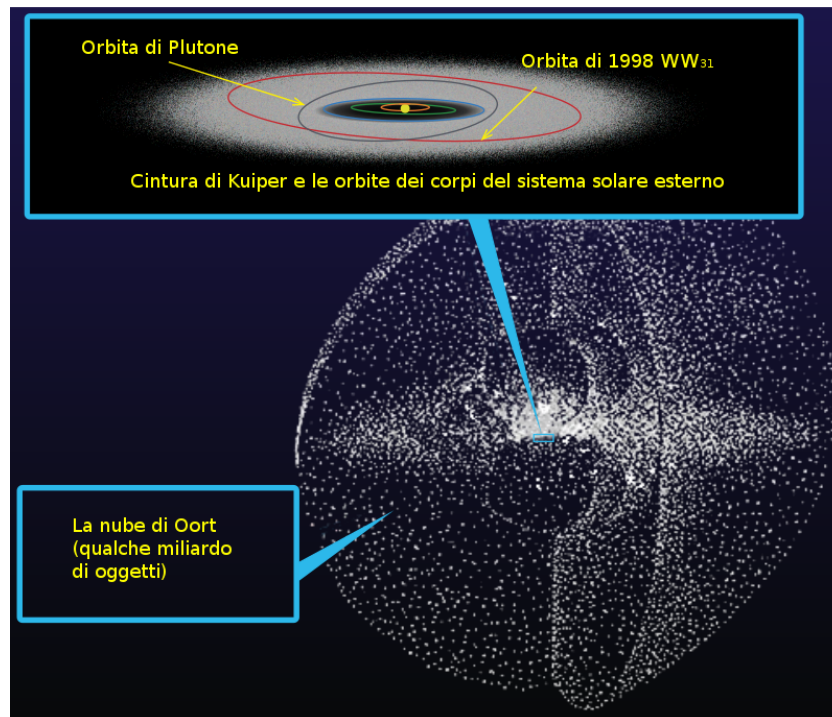
Fino al 2006, gli astronomi avevano risolto dischi circumstellari attorno a nove stelle che si ritiene possano essere paragonabili alla Fascia di Kuiper del sistema solare. Esse possono dividersi in due categorie: fasce estese, con raggi di oltre 50 UA, e cinture strette come la nostra fascia di Kuiper, con raggi compresi tra 20 e 30 UA e dai contorni più netti. Il 15-20 % delle stelle osservate di tipo solare mostra un eccesso nell'infrarosso che sembra indicare la presenza di massicce strutture paragonabili alla Fascia di Kuiper. La maggior parte dei dischi di detriti attorno ad altre stelle è abbastanza giovani, ma il Telescopio spaziale Hubble nel 2006 riprese l'immagine di strutture con almeno 300 milioni di anni che si pensa siano in configurazioni stabili attorno alle stelle. La giovane stella bianca Fomalhaut è provvista di almeno due dischi circumstellari; il più interno è paragonabile alla Fascia principale del sistema solare, ma la più esterna ed estesa, situata appena al di là del pianeta scoperto nel 2008 alla distanza di circa 150 UA, pare costituita in prevalenza da oggetti ghiacciati ed è quindi paragonabile alla Fascia di Kuiper del nostro sistema solare. Come Fomalhaut anche Vega mostra due tipi diversi di strutture attorno a sé, una più interna e calda e probabilmente formata da corpi rocciosi e una più fredda paragonabile alla Fascia di Kuiper solare, anche se dimensioni maggiori.



**Dischi di detriti attorno alle stelle HD 139664 e HD 53143, riprese dalla Hubble's Advanced Camera for Surveys del telescopio spaziale Hubble.**



## Nube di Oort

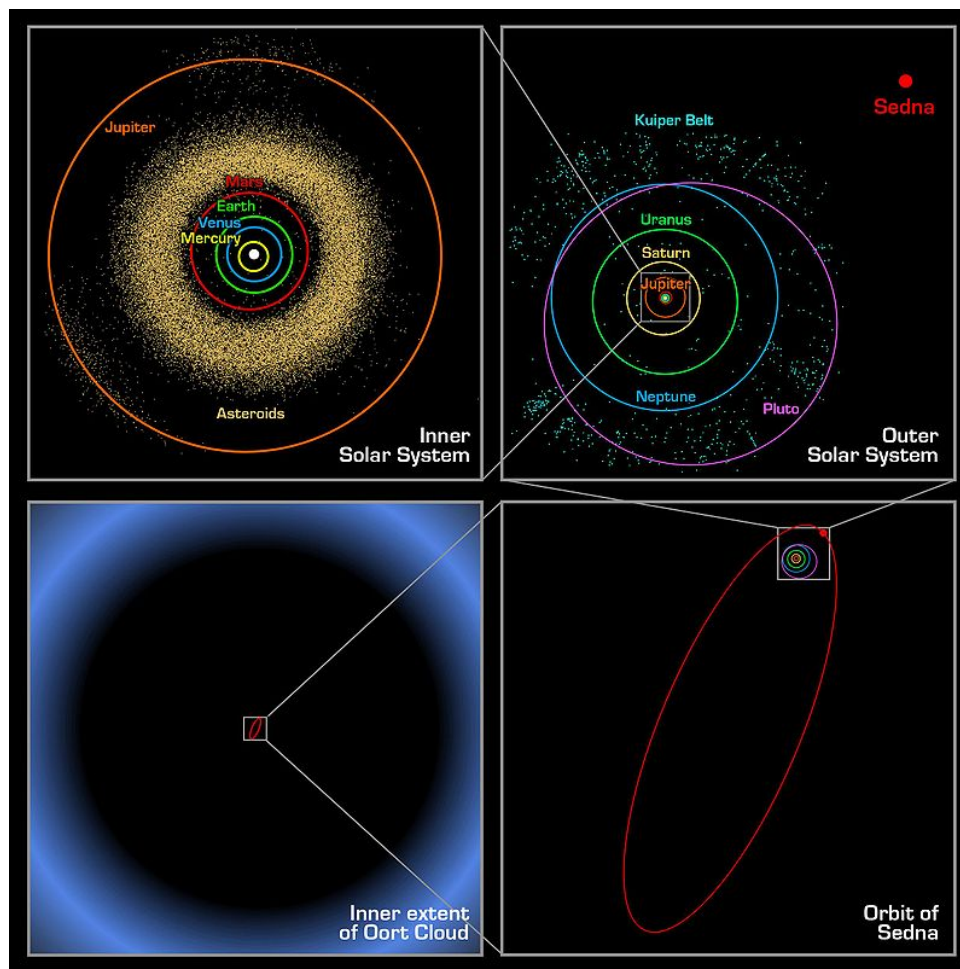


Rappresentazione artistica della Fascia di Kuiper sopra e della nube di Oort sotto

La nube di Oort è una nube sferica di comete posta tra 20 000 e 100.000 UA o 0,3 e 1,5 al dal Sole, cioè circa 2 400 volte la distanza tra il Sole e Plutone. Questa nube non è mai stata osservata perché troppo lontana e buia perfino per i telescopi odierni, ma si ritiene che sia il luogo da cui provengano le comete di lungo periodo come la Hale-Bopp e la Hyakutake, avvistate alla fine del XX secolo che attraversano la parte interna del sistema solare. Nel 1932, l'astronomo estone Ernst Öpik ipotizzò che le comete avessero origine da una nube situata al bordo esterno del sistema Solare. Nel 1950, l'idea fu ripresa dall'astronomo olandese Jan Oort per spiegare un'apparente contraddizione: le comete vengono periodicamente distrutte dopo numerosi passaggi nel sistema solare interno: perciò, se le comete si fossero originate all'inizio del sistema, oggi sarebbero tutte distrutte. Il fatto che le si possa ancora osservare implica che abbiano un'origine diversa. Secondo la teoria, la nube di Oort conterrebbe milioni di nuclei di comete, che sarebbero stabili perché la radiazione solare è troppo debole per avere un effetto a quelle distanze. La nube fornirebbe una provvista continua di nuove comete, che rimpiazzerebbero quelle distrutte. La teoria sembrerebbe essere confermata dalle osservazioni successive, che ci mostrano come le comete provengano da ogni direzione, con simmetria sferica. La nube di Oort sarebbe un residuo della nebulosa originale da cui si formarono il Sole e i pianeti cinque miliardi di anni fa e sarebbe debolmente legata al sistema solare. Si pensa che anche le altre stelle abbiano una nube di Oort e che i bordi esterni delle nubi di due stelle vicine possano a volte sovrapporsi, causando un'occasionale intrusione cometaria.

## Ipotesi

Nel 1932 Ernst Öpik ipotizzò che le comete di lungo periodo potessero originarsi in una nube di corpi celesti posizionata al confine estremo del Sistema Solare. Nel 1950, l'idea venne ripresa dall'astronomo olandese Jan Oort, che si proponeva di risolvere uno dei più interessanti paradossi astronomici. L'orbita delle comete è molto instabile, essendo la dinamica ciò che determina se esse sono destinate a collidere con il Sole o con qualche altro pianeta, o se, viceversa, sono destinate a essere espulse a causa della perturbazione dei corpi celesti del sistema solare. Inoltre, il ghiaccio e gli altri elementi piuttosto volatili di cui sono composte le comete consentono la dispersione graduale a causa della radiazione elettromagnetica, sino a raggiungere il punto in cui la cometa si divide e si assottiglia fino a uno strato di crosta isolante che rallenta la perdita di ulteriori gas. A seguito di ciò, Oort capì che le comete non potevano essersi formate nella loro orbita attuale e che perciò dovevano essersi trattenute in una lontana regione spaziale, un deposito, per la maggior parte della loro esistenza. Esistono due principali classi di cometa: le comete di corto periodo, che presentano orbite inferiori alle 10 UA e le comete di lungo periodo che mostrano orbite maggiori alle 1.000 UA. Oort analizzò queste ultime e riscontrò che la maggior parte possedevano un Afelio la distanza maggiore dal Sole di circa 20.000 UA e sembravano provenire da tutte le direzioni, ciò rafforzava la sua ipotesi e suggerivano un deposito di forma sferica. Le poche comete che possedevano Afelio di 10.000 UA dovevano essere passate attraverso il Sistema solare e dovevano aver avuto le loro orbite modificate verso l'interno dalla forza di gravità generata dai pianeti.



L'immagine mostra le distanze delle orbite di diversi oggetti nel sistema solare, da alto a sinistra e in senso orario: i pianeti interni, i pianeti esterni, l'orbita di Sedna e la nube di Oort

## Composizione e Struttura

Si pensa che la nube di Oort si estenda tra 2.000 e 5.000 UA fino ad arrivare a 50.000 au dal Sole. Altre stime collocano il confine della nube di Oort tra 100 000 e le 200.000 UA. È possibile suddividere la nube di Oort in due regioni: la nube di Oort esterna 20.000 – 50.000 UA, di forma sferica e la nube di Oort interna 2.000 – 20.000 UA di forma toroidale. La parte esterna della nube è molto poco legata al Sole, ed è la fonte della maggior parte delle comete di lungo periodo. La nube interna è conosciuta anche come nube di Hills, in onore dell'astronomo J. G. Hills, che suppose la sua esistenza nel 1981. I modelli ipotizzano che la nube dovrebbe possedere al suo interno decine o centinaia di volte le comete presenti nella nube esteriore. Sembra che la nube di Hills sia fonte di comete per la nube esterna, più tenue, nella misura in cui quelle posizionate in questa zona si esauriscono. La nube di Hills spiega perciò l'esistenza della nube di Oort dopo miliardi di anni dalla sua nascita. Si pensa che la nube di Oort possa contenere comete anche di 1,3 chilometri di diametro e cinquecentomila milioni con una magnitudine assoluta minore di +10,9 più è basso il valore, maggiore è la luminosità. Nonostante l'altissima densità di comete, ciascuna di esse è separata dall'altra in media da decine di milioni di chilometri. La massa della nube di Oort non si conosce con certezza, ma se si prende la Cometa di Halley come prototipo di cometa della nube esteriore, si stima che la massa sia circa di  $3 \times 10^{25}$  kg, circa cinque volte la massa della Terra.

## Possibili candidati ad appartenere alla Nube di Oort

Vi sono varie ipotesi od osservazioni relativi a oggetti trans nettuniani di grandi dimensioni che orbitano attorno al Sole su di un'orbita particolarmente eccentrica e che siano parte della nube di Oort. 90377 Sedna è un oggetto trans nettuniano di dimensioni approssimativamente pari ai due terzi di quelle di Plutone. Gli scopritori sostengono che Sedna sia il primo corpo della nube di Oort a essere osservato, affermando che è troppo lontano dal Sole per essere considerato un oggetto della fascia di Kuiper. Tuttavia è assai più vicino al Sole di quanto ci si attenderebbe da un oggetto della nube di Oort, soprattutto nei pressi del perielio, e la sua inclinazione orbitale non si discosta eccessivamente dall'eclittica. Sedna appartiene piuttosto alla nube di Oort interna, una regione relativamente poco spessa situata sul piano dell'eclittica ed estesa dalla fascia di Kuiper sino alla nube esteriore. 2012 VP113 è un planetoidale avente magnitudine assoluta di 4,1,2, forse classificabile come pianeta nano e che ha il più grande perielio conosciuto per un oggetto del sistema solare. L'ultimo passaggio al perielio è avvenuto attorno al 1979, a una distanza di 80 AU e al momento della scoperta era a 83 AU dal Sole. Sono noti solo altri quattro oggetti del sistema solare aventi perieli superiori a 47 UA: 90377 Sedna 76 UA, 2004 XR190 51 UA, 2010 GB174 48 UA e 2004 VN112 47 UA. La scarsità di corpi celesti con perieli compresi fra 50 e 75 UA non sembra essere un artefatto legato alle osservazioni. Di contro, Tyche è il nome dato a un ipotetico pianeta gigante gassoso situato nella nube di Oort, proposto per la prima volta nel 1999 dall'astronomo John Matese dell'Università della Louisiana. L'esistenza di Tyche può essere ipotizzata dallo studio dei punti d'origine delle comete a lungo periodo. Molti astronomi hanno espresso scetticismo circa l'esistenza di questo oggetto. L'analisi condotta sui dati del telescopio spaziale WISE ha escluso l'esistenza di tale pianeta.

Numero	Nome	Diametro Equatoriale km	Perielio UA	Afelio UA	Data della Scoperta	Scopritore	Metodo usato per misura diametro
90377	Sedna	1.180 1.800	76,1	892	2003	Brown Trujillo Rabinowitz	Termico
-	2012 VP113	-	80,6	446	2012	Trujillo Sheppard	-
148209	148209 2000CR105	265	44,3	397	2000	Lowell Observatory	-



*Raccolta da*

**Mauro Aldigi**