

## IL MOTO DEI PIANETI

### Le Leggi del Moto dei Pianeti

Sin dai tempi di Aristotele si pensava che i pianeti si muovessero intorno alla Terra seguendo traiettorie circolari o combinazioni di moti circolari. Secondo Aristotele, infatti, l'unico moto naturale e perfetto era quello circolare ed i pianeti, la cui perfezione era indubbia, non potevano che muoversi in quel modo. Le stelle, poi, ancor più perfette, erano fisse sulla sfera celeste con la quale condividevano un altrettanto perfetto moto circolare.

Il modello aristotelico di universo geocentrico venne perfezionato dal grande astronomo e matematico greco Claudio Tolomeo (II secolo d.C.). Egli, utilizzando i dati raccolti dai suoi predecessori, elaborò la *Megisté Syntaxis* (Grande Sintesi), una maestosa opera di astronomia, più nota col titolo latinizzato della sua traduzione araba, *Almagesto*, nella quale espose una teoria che, seppur con grandi complicazioni geometrico-matematiche, riusciva a giustificare con sufficiente precisione i moti apparenti dei pianeti.

Nel sistema tolemaico, la Terra è immobile al centro dell'universo. Attorno ad essa, la Luna, Mercurio, Venere, il Sole, Marte, Giove e Saturno percorrono delle circonferenze, dette *deferenti*, i cui centri si discostano di poco dal centro della Terra. Inoltre, solo il Sole percorre direttamente il proprio deferente con moto circolare uniforme; la Luna e gli altri pianeti si muovono su altri cerchi, detti *epicicli*, i cui centri sono a loro volta animati di moto uniforme e percorrono i rispettivi deferenti.

L'universo di Tolomeo, sebbene fosse un modello puramente cinematico e non rendesse conto quindi delle cause dei moti planetari, divenne una delle pietre d'angolo della filosofia del mondo antico fino alla pubblicazione, nel 1543, del *De Revolutionibus Orbium Coelestium* di Nicola Copernico (1473-1543). In quell'opera, rapidamente messa al bando dalla censura ecclesiastica, si ponevano le basi del *sistema eliocentrico*, con il Sole immobile al centro dell'universo e la Terra e i pianeti a ruotare intorno ad esso. Il modello copernicano non ottenne un grande successo tra gli astronomi in quanto si dimostrava altrettanto inadeguato di quello tolemaico a giustificare le osservazioni. Questo a causa del fatto che Copernico mantenne per i pianeti l'ipotesi di traiettorie circolari percorse a velocità uniforme.

Quasi contemporaneamente a Copernico, l'astronomo danese Tycho Brahe (1546-1601) compì una serie di osservazioni molto accurate sul moto dei pianeti. Un suo allievo, Johannes Kepler (1571-1630), tentò di correlare i dati di Tycho utilizzando curve geometriche. Nel 1609, dopo otto anni di lavoro, Keplero pubblicò i risultati delle sue ricerche, sintetizzati nelle famose tre leggi:

**Prima Legge** – Le orbite dei pianeti sono ellissi delle quali il Sole occupa uno dei due fuochi.

**Seconda Legge** – Il segmento che unisce il pianeta al Sole (raggio vettore) descrive aree equivalenti in tempi uguali.

**Terza Legge** – Il quadrato del tempo di rivoluzione di un pianeta è proporzionale al cubo della sua distanza media dal Sole.

Sia le leggi di Keplero che il modello di Copernico rimanevano delle descrizioni del moto dei pianeti e non delle spiegazioni, per le quali occorrerà attendere il 1687 e la pubblicazione del *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* di Isaac Newton (1642-1727). In quest'opera, una delle più grandi conquiste della mente umana, Newton pose le basi della meccanica moderna enunciando i tre principi fondamentali della dinamica:

**Primo Principio** – In assenza di forze applicate, ogni corpo mantiene il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme.

**Secondo Principio** – L'accelerazione che un corpo subisce per effetto di una forza applicata è proporzionale e parallela alla forza stessa.

**Terzo Principio** – Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria.

Insieme ad esse, Newton formulò la:

**Legge della Gravitazione Universale** - Due corpi si attraggono con una forza proporzionale al prodotto delle loro masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa.

L'applicazione di questi quattro postulati fondamentali permette di risolvere il problema del moto dei corpi celesti. In realtà, i calcoli necessari per fare ciò risultano notevolmente complicati, tanto che la soluzione analitica del problema è possibile unicamente nel caso di due soli corpi. Il problema dei tre corpi (cioè lo studio del movimento di tre corpi sotto la reciproca attrazione gravitazionale) venne risolto soltanto negli anni '60, grazie all'avvento dei calcolatori elettronici, in occasione del progetto *Apollo* per la conquista della Luna (i tre corpi in questione erano la Terra, la Luna e la capsula Apollo). La soluzione di problemi con più corpi è possibile solo facendo ipotesi semplificative che, se poste in maniera adeguata, consentono di ottenere notevoli risultati, come testimoniato, ad esempio, dai successi delle missioni *Voyager*.

### Moti Apparenti dei Pianeti

E' opportuno scomporre il moto di un pianeta sulla sfera celeste in due componenti: il *moto proprio*, dovuto alla rivoluzione del pianeta e della Terra intorno al Sole; e il *moto di trascinamento*, dovuto alla rotazione della Terra intorno al suo asse. Il moto effettivo – cioè quello che osserviamo – è dato dalla composizione di moto proprio e moto di trascinamento.

Per quel che riguarda il moto di trascinamento, il pianeta si comporta, né più né meno, come tutti gli astri: sorge a Est, percorre un arco di circonferenza e tramonta a Ovest.

## IL MOTO DEI PIANETI

Il moto proprio è molto più complesso. Tolomeo è considerato il più grande astronomo dell'antichità per essere riuscito a fornirne una giustificazione (seppur errata); e Copernico, Newton e Keplero sono ritenuti i più grandi astronomi moderni per esser riusciti a correggere l'errore di Tolomeo!

Per questo non ci addenteremo più di tanto in spiegazioni, dicendo soltanto che, nel lungo periodo (qualche settimana o qualche mese per i pianeti più distanti), ci si accorge che la traiettoria apparente del pianeta presenta dei tratti in cui il moto è diretto (da Ovest verso Est, come in Fig. 1, punto A) ed altri in cui è retrogrado (da Est verso Ovest, punto C). I punti che segnano l'inizio di uno di questi tratti e il termine dell'altro sono detti punti di stazionarietà (B e D).

Le orbite planetarie giacciono su piani diversi ma molto vicini tra loro, e perciò il moto apparente avviene sempre in prossimità dell'eclittica.

I pianeti vengono solitamente classificati in superiori e inferiori, a seconda che le loro orbite siano esterne (Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone) o interne (Mercurio e Venere) a quella terrestre (Fig. 2).

Visti dalla Terra, i pianeti inferiori oscillano intorno al Sole non scostandosi mai più di un angolo massimo ( $28^\circ$  per Mercurio,  $48^\circ$  per Venere), detto massima elongazione. In tali posizioni, i pianeti inferiori presentano delle fasi, cioè si vede parte della loro superficie illuminata dal Sole e parte in ombra, come avviene per la Luna.

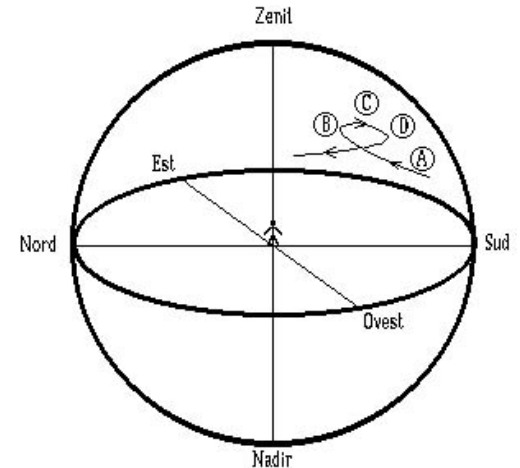


Fig. 1 Moto dei Pianeti.

Alla minima e alla massima distanza dalla Terra i pianeti inferiori si trovano rispettivamente in congiunzione inferiore e congiunzione superiore con il Sole. Nel secondo caso il pianeta non è osservabile, mentre nel primo si può osservare il transito del pianeta sul disco solare, che però non avviene ad ogni rivoluzione a causa della non complanarità delle orbite di questi pianeti con quella terrestre.

Per la terza legge di Keplero, i pianeti inferiori hanno periodi di rivoluzione più brevi di quello della Terra. Riprendiamo allora la Fig. 2 e, tenendo la Terra fissa, facciamo percorrere al pianeta inferiore la sua orbita in senso antiorario a partire dalla congiunzione superiore. Osserviamo che esso si muove in senso diretto (da Ovest verso Est) fino a raggiungere la massima elongazione occidentale, quindi il suo moto si inverte e il pianeta si avvicina al Sole, raggiungendo la massima elongazione orientale, per poi invertire nuovamente il suo moto. In realtà, mentre il pianeta fa tutto ciò anche la Terra si muove lungo la sua orbita in senso antiorario, ma qualitativamente le cose non cambiano più di tanto.

I pianeti superiori presentano movimenti apparenti più ampi di quelli inferiori. Le posizioni fondamentali sono dette congiunzione, opposizione, quadratura orientale e quadratura occidentale (v. ancora la Fig. 2). Le migliori condizioni per l'osservazione sono quelle in prossimità dell'opposizione, quando il pianeta è alla minima distanza dalla Terra.

Prendiamo ancora in esame la Fig. 2 e stavolta teniamo fisso il pianeta superiore, muovendo la Terra (che è più veloce) a partire dall'opposizione. Mentre la Terra si sposta in senso antiorario, il pianeta appare animato di moto retrogrado fino a che la Terra, vista dal pianeta, non raggiunge la sua massima elongazione occidentale: a quel punto il moto del pianeta si inverte e diviene diretto. Quando la Terra, vista dal pianeta, giunge alla massima elongazione orientale, il moto apparente del pianeta si inverte nuovamente. A questo punto siamo all'incirca nella posizione indicata con (B) nella Fig. 1. Il moto retrogrado si mantiene poi per tutto il tratto intorno all'opposizione (punto C in Fig. 1) fino a che la Terra non torna alla massima elongazione occidentale (punto D).

Il tempo impiegato da un pianeta per effettuare una rivoluzione completa intorno al Sole rispetto alle stelle fisse è detto periodo siderale. I periodi siderali dei pianeti sono riportati nelle tabelle in fondo a questo capitolo. L'intervallo di tempo tra due successive congiunzioni o opposizioni è invece detto periodo sinodico. La conoscenza del periodo sinodico è molto importante, in quanto permette di stabilire quanto tempo occorre aspettare prima che il pianeta si

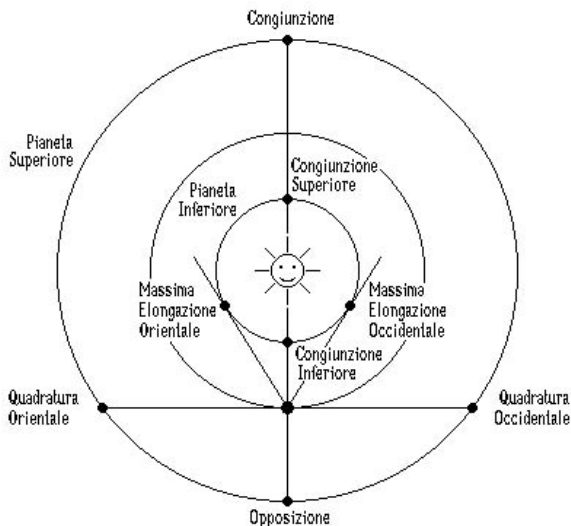


Fig. 2 Classificazione dei Pianeti.

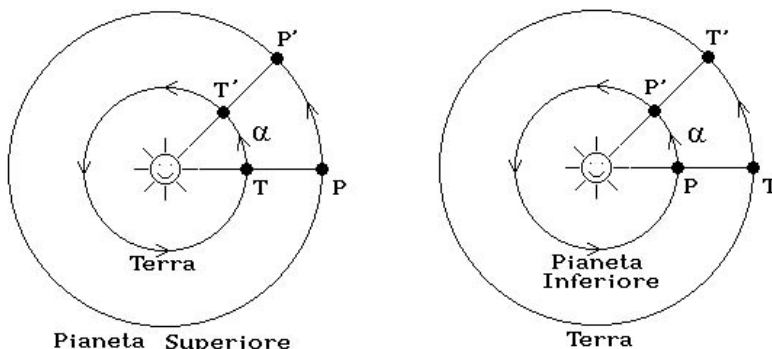


Fig. 3 Periodo Sinodico.

Il tempo impiegato da un pianeta per effettuare una rivoluzione completa intorno al Sole rispetto alle stelle fisse è detto periodo siderale. I periodi siderali dei pianeti sono riportati nelle tabelle in fondo a questo capitolo. L'intervallo di tempo tra due successive congiunzioni o opposizioni è invece detto periodo sinodico. La conoscenza del periodo sinodico è molto importante, in quanto permette di stabilire quanto tempo occorre aspettare prima che il pianeta si

## IL MOTO DEI PIANETI

ripresenti nella stessa posizione rispetto alla Terra.

Indichiamo con  $A$  l'anno siderale terrestre ( $365^d 6^h$  circa), con  $P$  il periodo siderale del pianeta superiore e con  $S$  il suo periodo sinodico. Definiamo poi velocità angolare l'arco percorso nell'unità di tempo: per la Terra, essa è pari a  $360^\circ/A$ , mentre per il pianeta è  $360^\circ/P$ .

In un periodo sinodico,  $S$ , la Terra percorre un arco di  $360^\circ + \alpha$ , mentre il pianeta soltanto l'arco  $\alpha$  (Fig. 3).

Tradotto in formule ciò vuol dire:

$$\begin{aligned}(360^\circ/A) \times S &= 360^\circ + \alpha \\ (360^\circ/P) \times S &= \alpha\end{aligned}$$

Eliminando  $\alpha$  dalle due relazioni precedenti si ha:

$$1/S = 1/A - 1/P$$

che permette di ricavare il periodo sinodico di un pianeta superiore.

Per un pianeta inferiore il discorso è lo stesso, salvo invertire i ruoli della Terra e del pianeta: procedendo come sopra si ottiene

$$1/S = 1/P - 1/A$$

### Elementi Orbitali

Per la prima legge di Keplero, l'orbita di un pianeta è un'ellisse avente un fuoco coincidente con il Sole. Conoscendo la posizione del pianeta e la sua velocità orbitale in un certo istante di riferimento, è possibile determinare la posizione del pianeta in ogni istante futuro o, all'occorrenza, passato, risolvendo le equazioni della meccanica celeste.

Posizione e velocità del pianeta sono tuttavia delle quantità che, a priori, non dicono nulla circa le caratteristiche dell'orbita del pianeta. Si può dimostrare che esistono dei particolari parametri, detti elementi orbitali, che risultano equivalenti alle suddette quantità, ma hanno il vantaggio di fornire un'immagine diretta della forma e dell'orientamento dell'orbita nello spazio.

Per descrivere la forma dell'orbita del pianeta sul suo piano orbitale si utilizzano le proprietà geometriche dell'ellisse. L'ellisse è una curva piana che scaturisce dall'intersezione di una superficie conica con un piano la cui normale  $\mathbf{n}$  formi con l'asse del cono un angolo inferiore al complementare della semiapertura  $\alpha$  del cono stesso (Fig. 4). Alternativamente, l'ellisse può essere definita come il luogo dei punti del piano per i quali è costante la somma delle distanze da due punti fissi, detti fuochi.

Su un piano cartesiano, l'ellisse ha equazione canonica:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

dove  $a$  e  $b$  sono rispettivamente il semiasse maggiore e il semiasse minore.

Nella figura 5 sono indicati anche i fuochi ( $F_1$  ed  $F_2$ ), in uno dei quali si trova il Sole, e le distanze afeliaca,  $r_a$ , e pereliaca,  $r_p$ .

Per definire una particolare ellisse su questo piano è sufficiente fornire i due semiassei; in astronomia si preferisce tuttavia fornire il semiasse maggiore e l'eccentricità:

$$e = \frac{x_f}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

che dà una misura di quanto l'ellisse si discosta da una circonferenza (l'eccentricità di una circonferenza è zero perché i due fuochi coincidono con il centro).

Dobbiamo ora individuare l'orientamento del piano orbitale rispetto al piano dell'eclittica. Definiamo, a tal fine, un nuovo sistema di riferimento, detto eliocentrico, in cui il Sole è situato nell'origine degli assi coordinati.

In Figura 6, il piano X-Y è l'eclittica. L'asse X è diretto verso il punto d'Ariete; l'asse Z è perpendicolare al piano dell'eclittica e punta verso l'emisfero Nord della sfera celeste; l'asse Y è orientato in modo che la terna d'assi X-Y-Z sia destra.

Definiamo nodi (Fig. 7) i due punti d'intersezione tra l'orbita e il piano dell'eclittica. Il nodo ascendente è il punto in cui il pianeta passa da "sotto" a "sopra" il piano dell'eclittica (il "sotto" e il "sopra" contengono rispettivamente il Polo Sud e il Polo Nord terrestre); il nodo discendente quello in cui passa da "sopra" a "sotto". La retta che passa per i nodi, e che costituisce

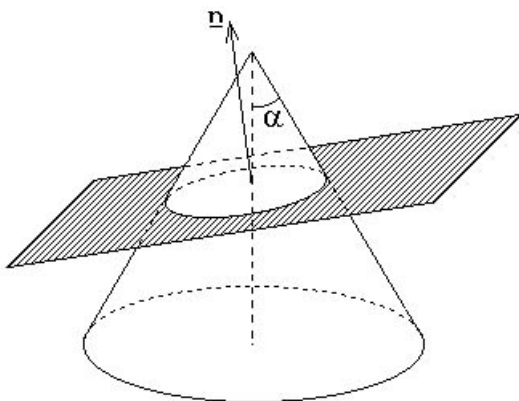


Fig. 4 Determinazione dell'orbita.

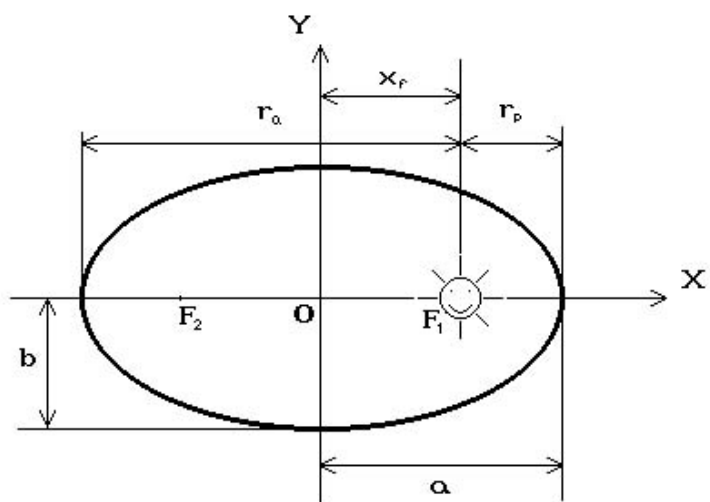


Fig. 5 Ellisse.

## IL MOTO DEI PIANETI

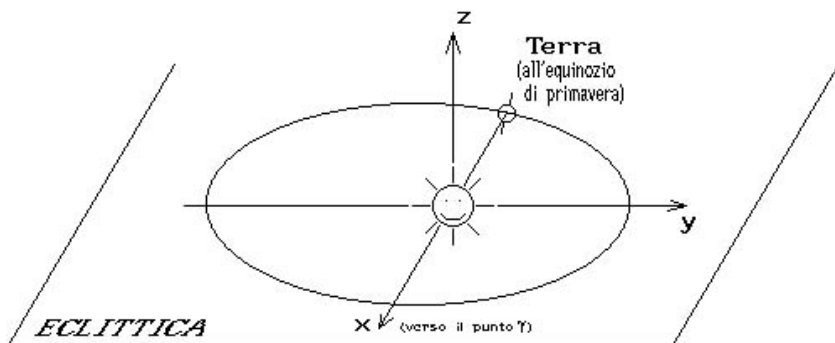


Fig. 6 Eclittica.

nodi dalla parte del nodo ascendente e la linea degli absidi dalla parte del perielio: quest'angolo, misurato nel senso del moto del pianeta, è detto argomento del perielio.

L'orbita è così univocamente definita, in quanto ne sono note la forma (tramite  $a$  ed  $e$ ), il piano su cui giace (tramite  $i$  e  $\Omega$ ) e l'orientazione su tale piano (tramite  $\omega$ ). Il sesto e ultimo elemento orbitale (l'angolo  $v_0$  in Fig. 7, anomia vera all'epoca  $T_0$ ) indica la posizione del pianeta ad un certo istante di tempo  $T_0$  fissato convenzionalmente.

Con questi elementi conosciamo direttamente la posizione del pianeta all'istante  $T_0$ ; risolvendo le equazioni della meccanica celeste – il che è possibile a patto di disporre di una sufficiente capacità di calcolo e di elaborazione – possiamo conoscerne la posizione in ogni istante. Fino a

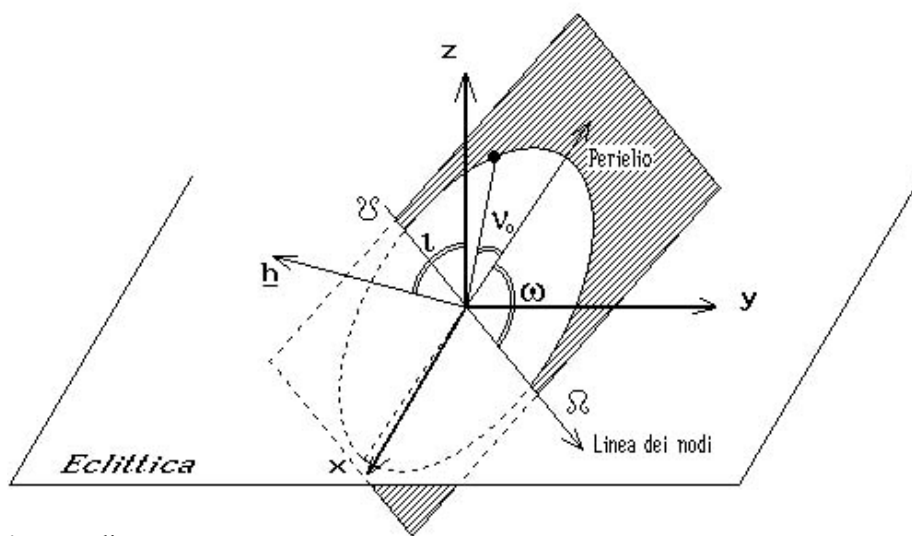


Fig. 7 Nodi.

non molto tempo fa, soltanto gli istituti di ricerca più importanti possedevano computer di potenza adeguata: le *effemeridi* (cioè l'insieme delle coordinate dei pianeti) da loro calcolate venivano pubblicate annualmente sugli almanacchi sotto forma di tabelle. Oggi, grazie all'enorme sviluppo avuto dall'informatica negli ultimi quindici anni, il calcolo delle effemeridi può essere fatto anche con un *personal computer* che è in grado, con il software opportuno, di determinare in pochi secondi l'aspetto della sfera celeste all'istante desiderato.

### Principali caratteristiche dei Pianeti, del Sole e dei Satelliti

Nelle successive tabelle sono riportate alcune delle principali caratteristiche dei pianeti e dei loro satelliti.

Tabella 1 - Caratteristiche dinamiche dei pianeti

| Pianeta  | Semiassse maggiore (UA) | Eccentricità | Periodo siderale (giorni) | Inclinazione (°) | Satelliti noti |
|----------|-------------------------|--------------|---------------------------|------------------|----------------|
| Mercurio | 0,39                    | 0,2056       | 87d,969                   | 7°00'15"         | nessuno        |
| Venere   | 0,72                    | 0,0068       | 224d,701                  | 3°23'40"         | nessuno        |
| Terra    | 1,00                    | 0,0167       | 365d,256                  | -                | 1              |
| Marte    | 1,52                    | 0,0934       | 686d,980                  | 1°51'00"         | 2              |
| Giove    | 5,20                    | 0,0485       | 4332d,589                 | 1°18'07"         | 16             |
| Saturno  | 9,54                    | 0,0557       | 10759d,22                 | 2°29'22"         | 17             |
| Urano    | 19,18                   | 0,0472       | 30685d,4                  | 0°46'23"         | 15             |
| Nettuno  | 30,06                   | 0,0086       | 60189d                    | 1°46'22"         | 8              |
| Plutone  | 39,44                   | 0,25         | 90465d                    | 17°10'           | 1              |

l'intersezione tra piano orbitale ed eclittica, prende il nome di linea dei nodi.

Per individuare l'orientamento del piano orbitale rispetto all'eclittica si prendono i due angoli  $i$  (inclinazione) e  $\Omega$  (longitudine del nodo ascendente).

L'inclinazione è l'angolo formato dalla normale al piano orbitale del pianeta e l'asse Z (perpendicolare al piano dell'eclittica). La longitudine del nodo ascendente è l'angolo che la linea dei nodi, dalla parte del nodo ascendente, forma rispetto all'asse X.

A questo punto dobbiamo determinare come è orientata l'orbita sul suo piano, cioè come è messa la linea degli absidi. Si considera allora l'angolo  $\omega$  tra la linea dei

## IL MOTO DEI PIANETI

Tabella 2 - Caratteristiche fisiche dei pianeti e del Sole

| Pianeta         | Raggio (km) | Massa (Terra = 1) | Densità (kg/dm <sup>3</sup> ) | Periodo di rotazione            | Inclinazione asse (°) |
|-----------------|-------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| <b>Sole</b>     | 695700      | 332'776           | 1,41                          | 25 <sup>d</sup> 9 <sup>h</sup>  | 7°30'                 |
| <b>Mercurio</b> | 2439        | 0,055             | 5,43                          | 58 <sup>d</sup> 12 <sup>h</sup> | ~ 28°                 |
| <b>Venere</b>   | 6052        | 0,815             | 5,24                          | 244 <sup>d</sup> 7 <sup>h</sup> | ~ 178°                |
| <b>Terra</b>    | 6378        | 1,000             | 5,52                          | 23 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup> | 23°27'                |
| <b>Marte</b>    | 3397        | 0,108             | 3,94                          | 24 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> | 23°59'                |
| <b>Giove</b>    | 71492       | 317,8             | 1,33                          | 9 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup>  | 3°05'                 |
| <b>Saturno</b>  | 60268       | 95,15             | 0,69                          | 10 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup> | 26°44'                |
| <b>Urano</b>    | 25559       | 14,54             | 1,27                          | 10 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup> | 97°55'                |
| <b>Nettuno</b>  | 24765       | 17,23             | 1,64                          | 17 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> | 28°48'                |
| <b>Plutone</b>  | 1152        | 0,002             | 2,00                          | 6 <sup>d</sup> 9 <sup>h</sup>   | ~ 94°                 |

Tabella 3 - I satelliti della Terra, di Marte, Giove e Saturno, Urano, Nettuno e Plutone

| Satellite         | Distanza (× 10 <sup>3</sup> km) | Raggio (km) | Periodo (giorni) | Anno di scoperta | Scopritore |
|-------------------|---------------------------------|-------------|------------------|------------------|------------|
| <b>(Terra)</b>    |                                 |             |                  |                  |            |
| <i>Luna</i>       | 384,4                           | 1738        | 27,3             | -                | -          |
|                   |                                 |             |                  |                  |            |
| <b>(Marte)</b>    |                                 |             |                  |                  |            |
| <i>Deimos</i>     | 9,4                             | 11          | 0,32             | 1877             | Hall       |
| <i>Phobos</i>     | 23,5                            | 6           | 1,26             | 1877             | Hall       |
|                   |                                 |             |                  |                  |            |
| <b>(Giove)</b>    |                                 |             |                  |                  |            |
| <i>Metis</i>      | 128,0                           | 20          | 0,29             | 1979             | Synnott    |
| <i>Adrastea</i>   | 129,0                           | 10          | 0,30             | 1979             | Jewitt     |
| <i>Amalthea</i>   | 181,3                           | 82          | 0,50             | 1892             | Barnard    |
| <i>Thebe</i>      | 221,9                           | 55          | 0,67             | 1979             | Synnott    |
| <i>Io</i>         | 421,6                           | 1815        | 1,77             | 1610             | Galilei    |
| <i>Europa</i>     | 670,9                           | 1569        | 3,55             | 1610             | Galilei    |
| <i>Ganymede</i>   | 1070                            | 2631        | 7,16             | 1610             | Galilei    |
| <i>Callisto</i>   | 1883                            | 2400        | 16,69            | 1610             | Galilei    |
| <i>Leda</i>       | 11094                           | 8           | 238,7            | 1974             | Kowal      |
| <i>Himalia</i>    | 11480                           | 93          | 250,6            | 1904             | Perrine    |
| <i>Lysithea</i>   | 11720                           | 18          | 259,2            | 1938             | Nicholson  |
| <i>Elara</i>      | 11737                           | 38          | 259,7            | 1904             | Perrine    |
| <i>Ananke</i>     | 21200                           | 15          | 631 ®            | 1951             | Nicholson  |
| <i>Carme</i>      | 22600                           | 20          | 692 ®            | 1938             | Nicholson  |
| <i>Pasiphae</i>   | 23500                           | 25          | 735 ®            | 1908             | Melotte    |
| <i>Sinope</i>     | 23700                           | 18          | 758 ®            | 1914             | Nicholson  |
|                   |                                 |             |                  |                  |            |
| <b>(Saturno)</b>  |                                 |             |                  |                  |            |
| <i>Atlas</i>      | 137,6                           | 16          | 0,60             | 1980             | Terrile    |
| <i>Prometheus</i> | 139,4                           | 55          | 0,61             | 1980             | Collins    |
| <i>Pandora</i>    | 141,7                           | 45          | 0,63             | 1980             | Collins    |
| <i>Epimetheus</i> | 151,4                           | 60          | 0,70             | 1980             | Fountain   |
| <i>Janus</i>      | 151,5                           | 95          | 0,94             | 1966             | Dollfus    |
| <i>Mimas</i>      | 185,5                           | 196         | 0,94             | 1789             | Herschel   |
| <i>Enceladus</i>  | 238,0                           | 250         | 1,37             | 1789             | Herschel   |
| <i>Tethys</i>     | 294,7                           | 530         | 1,89             | 1684             | Cassini    |

## IL MOTO DEI PIANETI

| Satellite        | Distanza ( $\times 10^3$ km) | Raggio (km) | Periodo (giorni) | Anno di scoperta | Scopritore       |
|------------------|------------------------------|-------------|------------------|------------------|------------------|
| <i>Telesto</i>   | 294,7                        | 13          | 1,89             | 1980             | Pascu            |
| <i>Dione</i>     | 377,4                        | 560         | 2,74             | 1684             | Cassini          |
| <i>Helene</i>    | 377,4                        | 16          | 2,74             | 1980             | Lecacheux        |
| <i>Rhea</i>      | 527,0                        | 765         | 4,52             | 1672             | Cassini          |
| <i>Titan</i>     | 1222                         | 2575        | 15,95            | 1655             | Huygens          |
| <i>Hyperion</i>  | 1481                         | 150         | 21,28            | 1848             | Bond             |
| <i>Iapetus</i>   | 3561                         | 730         | 79,33            | 1671             | Cassini          |
| <i>Phoebe</i>    | 12952                        | 110         | 551 ®            | 1898             | Pickering        |
| <b>(Urano)</b>   |                              |             |                  | 1781             | Herschel         |
| <i>Cordelia</i>  | 49,8                         | 13          | 0,34             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Ophelia</i>   | 53,8                         | 15          | 0,38             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Bianca</i>    | 59,2                         | 21          | 0,44             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Cressida</i>  | 61,8                         | 31          | 0,47             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Desdemona</i> | 62,7                         | 27          | 0,48             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Juliet</i>    | 64,6                         | 42          | 0,49             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Portia</i>    | 66,1                         | 54          | 0,52             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Rosalind</i>  | 69,6                         | 27          | 0,56             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Belinda</i>   | 76,3                         | 33          | 0,72             | 1986             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Puck</i>      | 86,0                         | 77          | 0,76             | 1985             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Miranda</i>   | 129,8                        | 240         | 1,41             | 1948             | Kuiper           |
| <i>Ariel</i>     | 191,2                        | 579         | 2,52             | 1851             | Lassell          |
| <i>Umbriel</i>   | 266,0                        | 586         | 4,14             | 1851             | Lassell          |
| <i>Titania</i>   | 435,8                        | 790         | 8,71             | 1787             | Herschel         |
| <i>Oberon</i>    | 582,6                        | 762         | 13,46            | 1787             | Herschel         |
|                  |                              |             |                  |                  |                  |
| <b>(Nettuno)</b> |                              |             |                  | 1846             | Galle-D'Arrest   |
| <i>Naiad</i>     | 48,0                         | 27          | 0,30             | 1989             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Thalassa</i>  | 50,0                         | 40          | 0,31             | 1989             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Despoina</i>  | 52,5                         | 75          | 0,33             | 1989             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Galatea</i>   | 62,0                         | 80          | 0,43             | 1989             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Larissa</i>   | 73,6                         | 95          | 0,55             | 1989             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Proteus</i>   | 117,6                        | 240         | 1,12             | 1989             | <i>Voyager 2</i> |
| <i>Triton</i>    | 354,8                        | 1356        | 5,88 ®           | 1846             | Lassell          |
| <i>Nereid</i>    | 5514                         | 170         | 360,2            | 1949             | Kuiper           |
|                  |                              |             |                  |                  |                  |
| <b>(Plutone)</b> |                              |             |                  | 1930             | Tombaugh         |
| <i>Charon</i>    | 19,1                         | 615         | 6,39             | 1978             | Christy          |

(Nota: ® indica rotazione retrograda)

### Riferimenti Bibliografici

- ❑ Flora "Astronomia Nautica" Ed. Hoepli
- ❑ <http://astroemagazine.astrofili.org>
- ❑ Istituto Idrografico della Marina "Manuale dell'Ufficiale di Rotta"
- ❑ Istituto Idrografico della Marina "Effemeridi Nautiche 2000"
- ❑ Nicoli "Navigazione Astronomica" Ed. Del Bianco
- ❑ [web.tiscali.it/cosmoweb/orientamento.html](http://web.tiscali.it/cosmoweb/orientamento.html)
- ❑ [www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab\\_2166/gakdsp1.htm](http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab_2166/gakdsp1.htm)
- ❑ [www.math.nus.edu.sg/Heavenly Mathematics Highlights of Cultural Astronomy.htm](http://www.math.nus.edu.sg/HeavenlyMathematics/Highlights%20of%20Cultural%20Astronomy.htm)
- ❑ [www.mtsn.tn.it/astrofili](http://www.mtsn.tn.it/astrofili)
- ❑ [www.nauticoartiglio.lu.it](http://www.nauticoartiglio.lu.it)