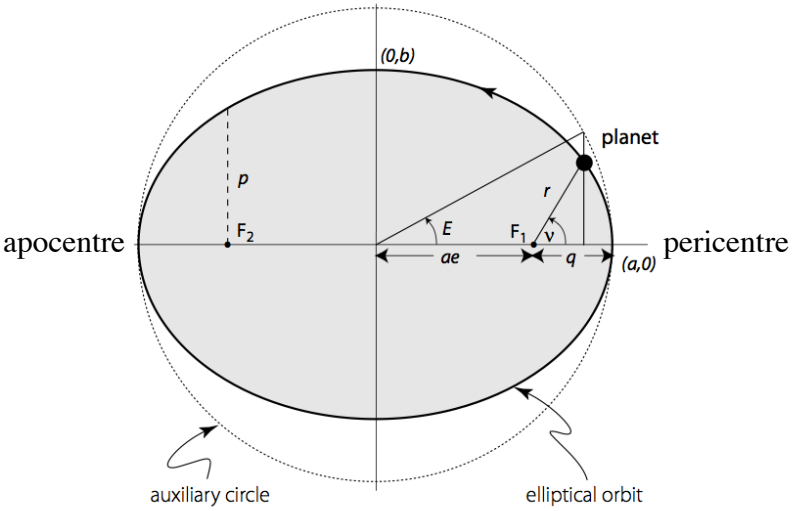
Proprietà dinamiche e architettura del Sistema Solare

SolSys 5

Orbital parameters

- Over a short period of time the motion of a planet around its host star can be treated as the two objects are isolated in space and moving around each other according to Keplerian two-body motion
  - The secondary body moves in an elliptical orbit, with the primary body at the focus



$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\nu}$$

$$q = a(1-e)$$

Orbital elements

- Positions of a body moving in an elliptical orbit can be computed from a set of 6 orbital parameters (or elements) that specify the size, shape, and orientation of the orbit in space and the position of the body at a particular instant in time known as the "epoch"

- Commonly used parameters are

  a = the semi-major axis of the ellipse

  e = the eccentricity of the ellipse

  i = the inclination of the orbital plane to the reference plane

  Ω = the longitude of the node of the orbital plane on the reference plane

  ω = the argument of the pericenter

  T = the epoch at which the body is at the pericenter

Orbital elements

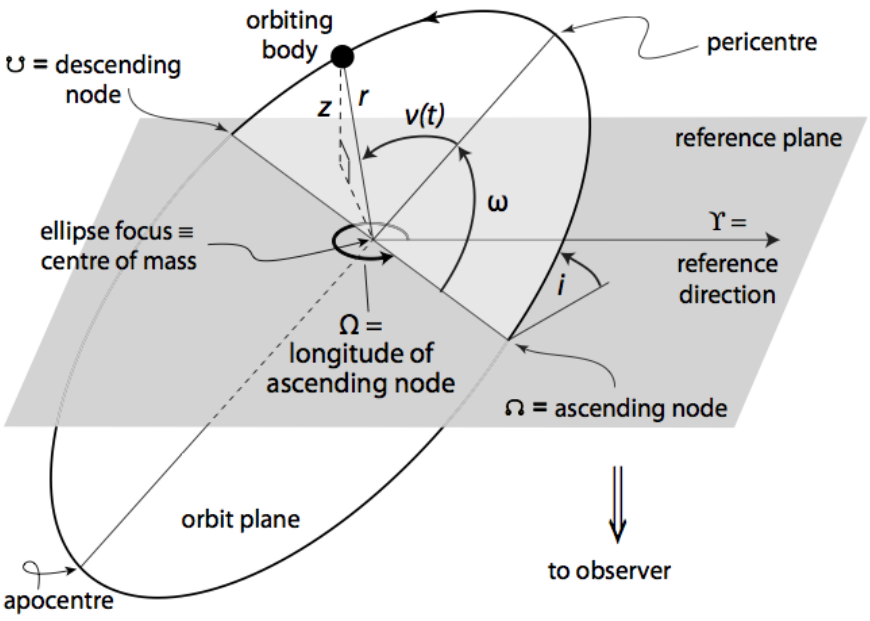


Table 2: Caratteristiche orbitali dei pianeti del Sistema Solare

Pianeta	$P_{\rm siderale}$ [anni]	a [AU]	e	i [gradi]	$\overline{v}_{\rm orb}$ [km/s]
Mercurio	0.241	0.387	0.2056	7.005	47.9
Venere	0.615	0.723	0.0068	3.395	35.0
Terra	1.000	1.000	0.0167	0.000	29.8
Marte	1.881	1.523	0.0934	1.851	24.1
Giove	11.856	5.203	0.0484	1.305	13.1
Saturno	29.423	9.537	0.0542	2.485	9.7
Urano	83.747	19.191	0.0472	0.770	6.8
Nettuno	163.723	30.068	0.0086	1.770	5.5

$$P^2 = \frac{4\,\pi^2\,a^3}{G\,(M_* + M_{\rm p})}$$

- Moti orbitali dei pianeti
  - Periodo e semiasse maggiore obbediscono alla III legge di Keplero
  - Hanno generalmente basse eccentricità
  - Sostanzialmente coplanari, con piccole inclinazioni sull'eclittica
  - Moti progradi rispetto alla rotazione solare

Distribuzione della massa tra le diverse componenti del Sistema Solare

Sole

$M_{\rm sole} = 2.0 \times 10^{33}$ g

Pianeti e satelliti

$M_{\rm pianeti} = 2.67 \times 10^{30}$ g

Terra

$M_{\rm Terra} = 5.97 \times 10^{27}$ g

Pianeti nani e corpi minori

$M_{\rm corpi\ minori} \sim 2 \times 10^{24}$ g

Momento angolare del Sistema Solare

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{r} \times m\boldsymbol{v}$$

- Momento angolare rotazionale

$$L^{(rot)}_{Sole} = 1{,}6 \cdot 10^{40}\ (kg \cdot m^2)/s$$
$$L^{(rot)}_{Giove} = 4{,}5 \cdot 10^{38}\ (kg \cdot m^2)/s$$
$$L^{(rot)}_{Saturno} = 7{,}7 \cdot 10^{37}\ (kg \cdot m^2)/s$$

- Momento angolare orbitale dei pianeti

$$L^{(orb)}_{Giove} = 1{,}9 \cdot 10^{43}\ (kg \cdot m^2)/s$$
$$L^{(orb)}_{Saturno} = 7{,}9 \cdot 10^{42}\ (kg \cdot m^2)/s$$

- La maggior parte del momento angolare del Sistema Solare è concentrata nel momento angolare orbitale dei pianeti giganti

Architettura del Sistema Solare: La "linea dei ghiacci"

- La "linea dei ghiacci" ("ice-line" o "snow-line")
  - Luogo delle distanze dal Sole in corrispondenza delle quali un corpo riscaldato dalla radiazione solare e raffreddato dall'emissione di corpo nero raggiunge una temperatura di equilibrio tale da permettere la formazione di ghiacci (H_2O, NH_3, CH_4)

Architettura del Sistema Solare: posizione dei pianeti rispetto alla "linea dei ghiacci"

- La "linea dei ghiacci" ("ice-line" o "snow-line")

Esercizio: calcolare la distanza dal Sole della "linea dei ghiacci" data la luminosità solare, $L_\odot$, la temperatura di condensazione dei ghiacci, T_{ice}, e la frazione di luce riflessa dai corpi ghiacciati, A

$$\sigma T^4_{eff} = \tfrac{1}{4} S (1-A)$$
$$S = L / (4 \pi d_{ice}^2)$$

Soluzione generale:

$$d_{ice} \simeq \frac{1}{4 T_{ice}^2} \sqrt{\frac{L_\odot (1-A)}{\pi \sigma}}$$

Per il Sistema Solare:

$$d_{ice}[\mathrm{AU}] \simeq \left(\frac{272}{T_{ice}\,[\mathrm{K}]} \right)^2 \sqrt{(1-A)}$$

Table 2: Caratteristiche orbitali dei pianeti del Sistema Solare

Pianeta	$P_{siderale}$ [anni]	a [AU]	e	i [gradi]	$\overline{v}_{orb}$ [km/s]
Mercurio	0.241	0.387	0.2056	7.005	47.9
Venere	0.615	0.723	0.0068	3.395	35.0
Terra	1.000	1.000	0.0167	0.000	29.8
Marte	1.881	1.523	0.0934	1.851	24.1
Giove	11.856	5.203	0.0484	1.305	13.1
Saturno	29.423	9.537	0.0542	2.485	9.7
Urano	83.747	19.191	0.0472	0.770	6.8
Nettuno	163.723	30.068	0.0086	1.770	5.5

Pianeti terrestri

linea dei ghiacci

Per $T_{ice} \sim 150$ K

Pianeti giganti

$$1 \text{ AU} = 1.495 \times 10^8 \text{ km}$$

La linea dei ghiacci cade entro la fascia degli asteroidi

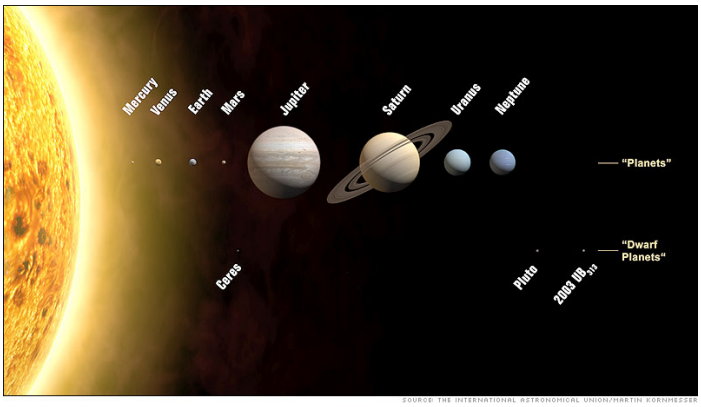
Architettura planetaria del Sistema Solare

- Pianeti rocciosi ("terrestri")
  - Mercurio, Venere, Terra, Marte
    $\langle\rho\rangle \sim 4 - 5$ g cm^{-3} ; d < 2 AU ; R ~ 0.4 − 1 R_{terra}

Entro la "linea dei ghiacci"

- Pianeti giganti gassosi
  - Giove, Saturno
    $\langle\rho\rangle \sim 0.7 - 1.3$ g cm^{-3} ; d ~ 5 − 10 AU ; R ~ 9 − 11 R_{terra}
- Pianeti giganti ghiacciati
  - Urano, Nettuno
    $\langle\rho\rangle \sim 1.3 - 1.6$ g cm^{-3} ; d ~ 20 − 30 AU ; R ~ 4 R_{terra}

Oltre la "linea dei ghiacci"



Effetti perturbativi gravitazionali

Risonanze

Forze mareali

- Nel caso reale, con più di due corpi, le perturbazioni gravitazionali indotte dagli altri corpi, portano ad alterare i parametri orbitali del sistema
  - Esempio: precessione del pericentro

    tale precessione porta alla ben nota precessione degli equinozi direttamente osservabile dal pianeta

- Esistono diversi tipi di perturbazioni che si manifestano con diverse intensità e scale di tempo
  - Il tipo di perturbazione può essere caratterizzato introducendo il concetto di risonanza

Cause ed effetti delle risonanze

- Le perturbazioni gravitazionali tra due corpi hanno un effetto cumulativo quando i periodi sono in risonanza

- Le risonanze possono portare ad effetti di stabilizzazione o a effetti di destabilizzazione delle orbite

- Poichè periodo orbitale P e semiasse maggiore a sono legati mediante la III legge di Keplero, le risonanze giocano un ruolo essenziale nel determinare l'architettura dei sistemi planetari

Risonanze

- Risonanza orbitale

$$P_{1,\mathrm{orb}}/P_{2,\mathrm{orb}} = n/m$$

  - Quando il rapporto dei periodi di rivoluzione di due corpi celesti è esprimibile come rapporto di due numeri interi piccoli
  - Viene chiamata "MEAN MOTION ORBITAL RESONANCE"
  - La presenza di una risonanza orbitale può causare instabilità e portare all'espulsione dal sistema di uno dei due corpi coinvolti su scale di tempo dinamiche

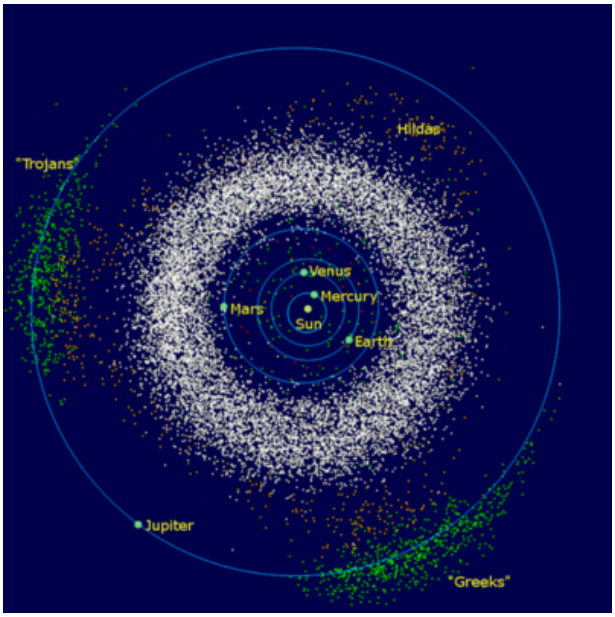
- Risonanza secolare

$$P_{1,\mathrm{prec}}/P_{2,\mathrm{prec}} = n/m$$

  - Quando il rapporto dei periodi di precessione dei periapsidi è esprimibile come rapporto di due numeri interi piccoli
  - La presenza di una risonanza secolare può portare a cambiamenti in eccentricità ed inclinazione su scale di tempo dell'ordine dei milioni di anni

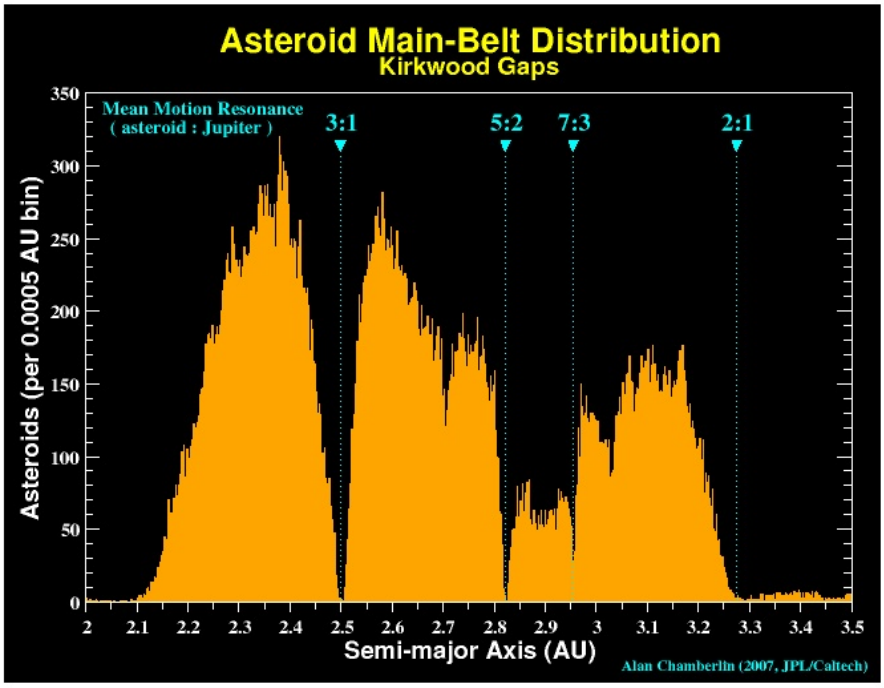
Risonanze orbitali
Esempi di stabilizzazione

- Concentrazioni di asteroidi stabilizzate dinamicamente
  - Hilda family: risonanza orbitale 3:2 con Giove
  - Trojans: risonanza 1:1 con Giove



Risonanze orbitali
Esempi di destabilizzazione

La distribuzione in semiassi maggiore nella fascia principale degli asteroidi risente degli effetti di risonanza con il periodo orbitale di Giove



- Altri esempi di risonanze
  - L'architettura degli anelli attorno ai pianeti giganti deriva da effetti di risonanza con i satelliti
  - Tali effetti generano i gaps visibili all'interno del disco di "detriti" formatosi entro il limite di Roche
  - La presenza di gaps porta al caratteristico pattern di anelli

Tidal effects

Tidal effects are ubiquitous in the universe

An example is provided by two bodies interacting gravitationally, the size of at least one of them being not negligible with respect to their mutual distance

$$R \sim r$$

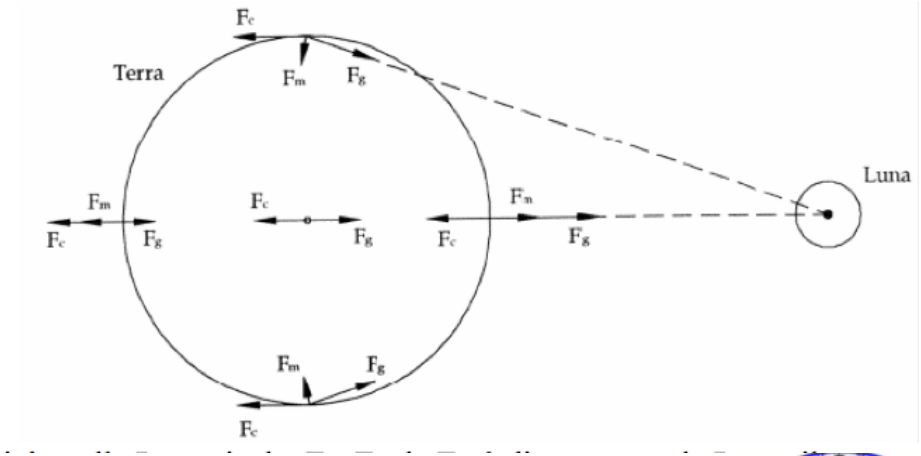
In this case gravity gradients give rise to forces and torques that cause deformations and changes in the rotational state of affected bodies

Tidal forces tend to vanish very rapidly with distance

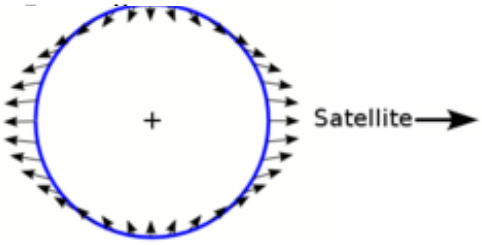
From differentiation of Newton's law in distance, r

$$f_T \sim r^{-3}$$

Maree superficiali



La somma vettoriale della forza gravitazionale (con il suo gradiente) e di quella centrifuga spiega l'effetto delle maree superficiali



Tidal locking

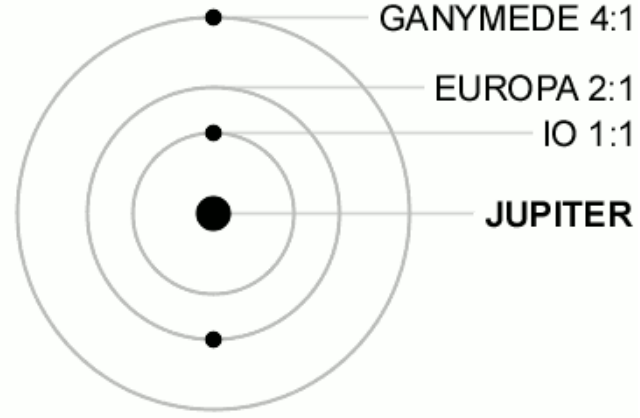
- Mechanism
  - Tidal forces create a bulge
  - If $P_{rot} > P_{orb}$, the body rotates through its tidal bulge, generating internal friction
  - Friction slows downs the rotation period
  - The friction stops when $P_{rot} = P_{orb}$
- We say that a body is "tidally locked" when tidal effects induced by a central body slow down the rotation period to the point that $P_{rot} = P_{orb}$
- Examples
  - Satellites around planets: Moon-Earth and Titan-Saturn systems
  - Also important for planets around stars

Tidal heating

- The dissipation of tidal forces leads to internal heating of satellites
- The best known example is the satellite Io, orbiting Jupiter

Combined effects of tidal locking and resonances
The case of the Jupiter satellites

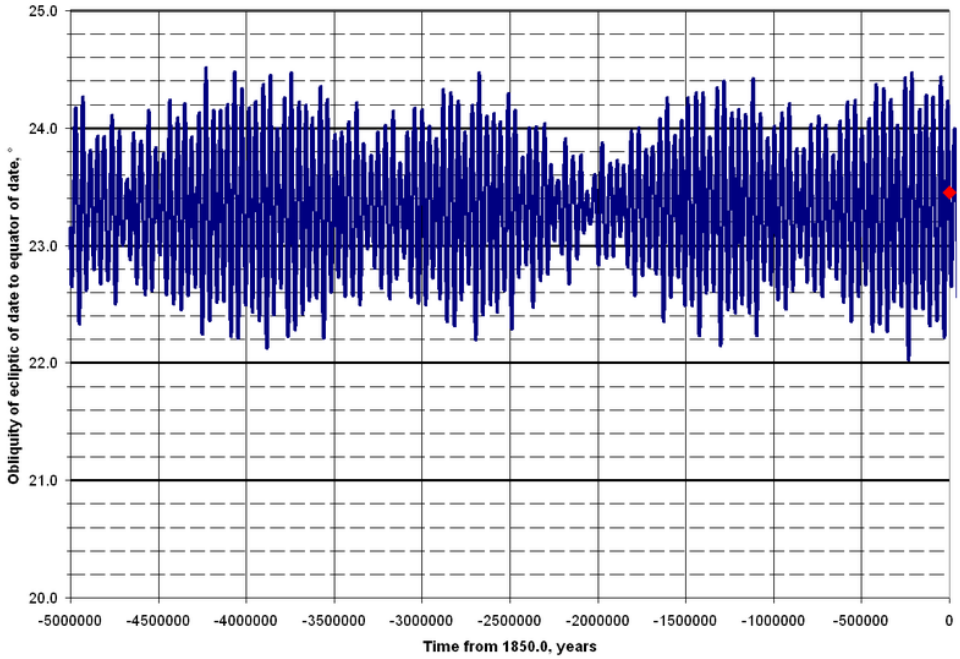
Io is tidally locked
Europa and Ganymede are in resonance



Altri effetti perturbativi: variazioni dell'inclinazione dell'asse di rotazione dei pianeti

- L'inclinazione dell'asse di rotazione dei pianeti influenza il clima e pertanto l'abitabilità planetaria
- Le perturbazioni gravitazionali tra diversi pianeti tendono ad alterare l'inclinazione dell'asse di rotazione con un andamento caotico
  - Si ritiene, ad esempio, che l'inclinazione dell'asse di rotazione di Marte evolva in maniera significativa, portando anche a valori di inclinazione estremamente elevati
- Effetto stabilizzatore della Luna
  - La Luna produce un effetto stabilizzatore dell'inclinazione dell'asse terrestre, che pertanto non varia in maniera significativa, sebbene oscilli attorno al suo valore tipico di 23.5 gradi

Evoluzione dell'obliquità dell'asse terrestre nel corso degli ultimi 5 milioni di anni, ottenuta mediante simulazioni numeriche



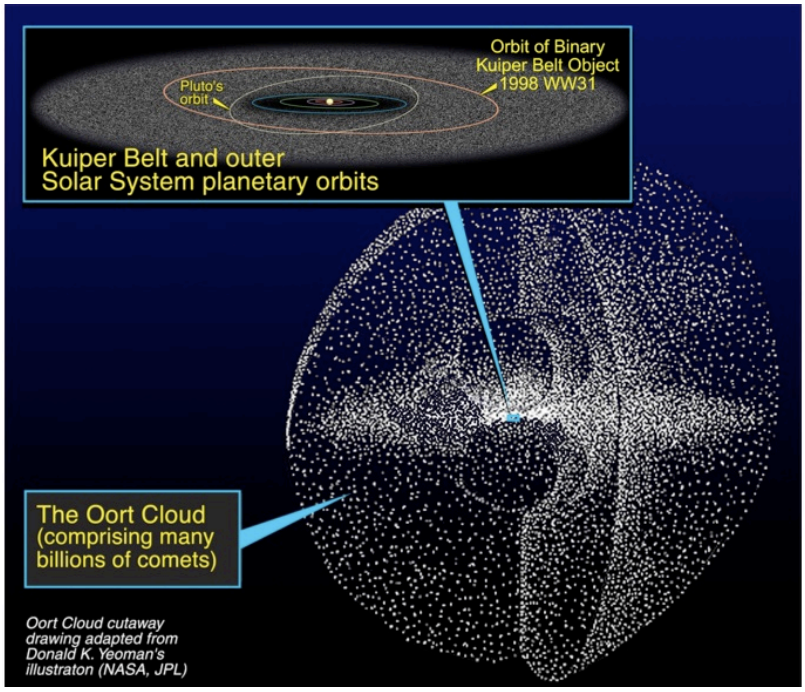
Periodi di rotazione e inclinazione dell'asse di rotazione

Planet	Sidereal rotation period (days)	Inclination of equator to orbit (degrees)
Mercury	58.6	0.0
Venus	-243.0	177.3
Earth	0.997	23.5
Mars	1.025	25.2
Jupiter	0.413 (deep interior)	3.1
Saturn	0.444 (deep interior)	26.7
Uranus	-0.718	97.9
Neptune	0.671	29.6

Rotazione generalmente prograda con la rotazione solare
Inclinazioni generalmente < 30 gradi

Eccezioni: Mercurio, Venere, Urano

Effetti dinamici e distribuzione delle comete



Oort cloud

- La *nube di Oort* (*Oort cloud*)
  - Distribuzione estesa di comete su orbite con inclinazione casuale
    Nube a simmetria sferica
  - Si estende fino a 5 x 10^4 AU
    Fino al limite delle perturbazioni gravitazionali con stelle esterne
  - Si ritiene che le comete della nube di Oort non siano state originate *in situ*, ma siano il risultato di processi di scattering di corpi formatisi nella regione dei pianeti giganti

Kuiper belt

- La *cintura di Kuiper* (*Kuiper belt*)
  - Distribuzione a forma di disco di corpi transnettuniani
  - Se ne conoscono ormai circa un migliaio e si stima che esistano ~10^5 KBO con diametro maggiore di 50 km

  - Probabilmente originati *in situ*

    Materiale che non è riuscito a formare un pianeta

    Conserva le caratteristiche dinamiche del materiale della nube protosolare che si è aggregato in tale regione del Sistema Solare

Dynamical stability of the Solar System

- How stable is the Solar System ?
  - We are not able to provide a simple analytical description of the dynamical evolution of a set of N > 3 bodies under the effects of recyprocal gravitational interaction
  - The long-term dynamical stability of the Solar System can be tested with N-body gravitational simulations
- N-body simulations indicate that small variations of the orbital parameters of the solar system bodies lead to unstable configurations, with possible ejection of a body from the system
- This type of investigation tells us that dynamical interactions are essential in shaping the architecture of planetary systems