

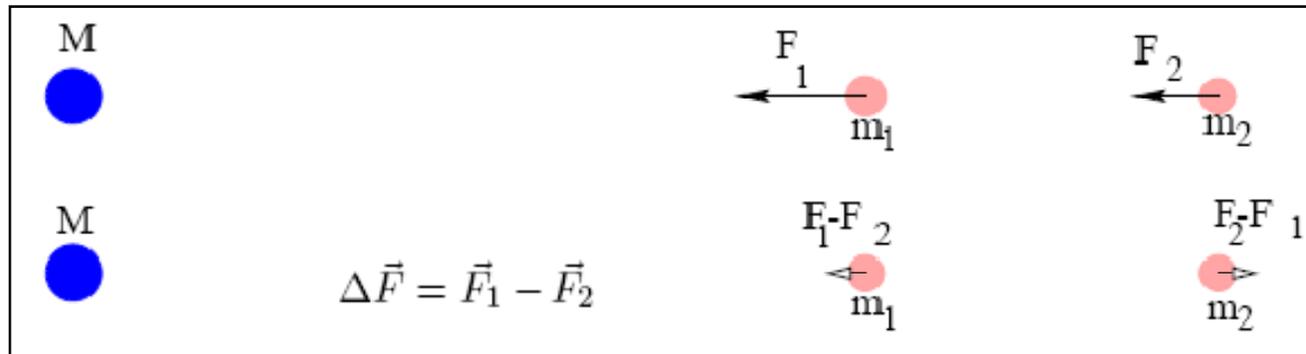
Introdução à Astrofísica

Forças Gravitacionais Diferenciais e Sistema Solar

Rogemar A. Riffel

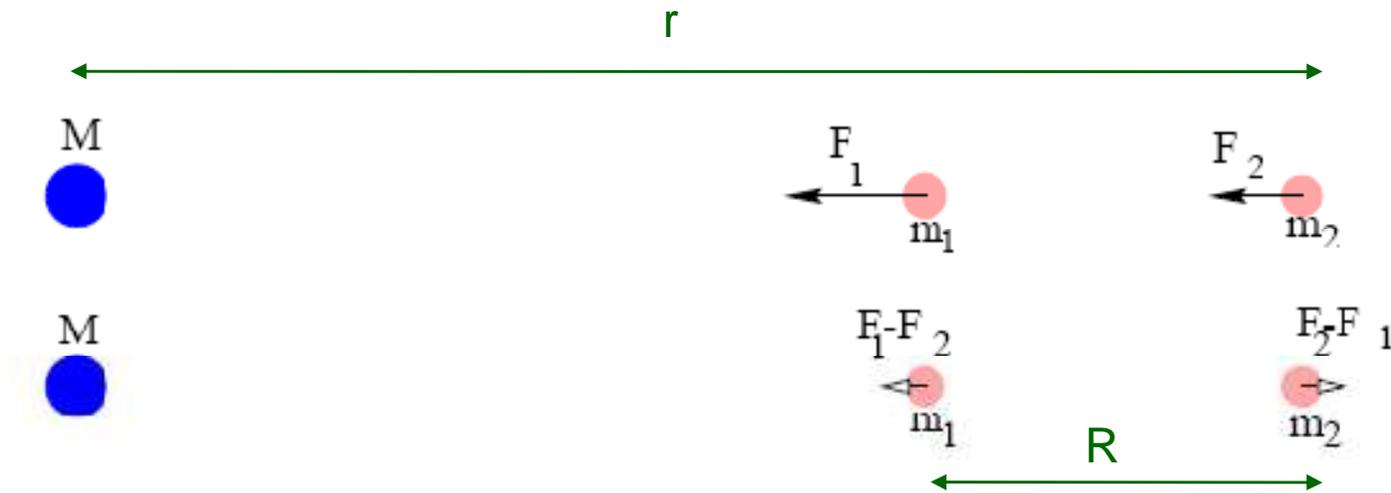
Derivação da força diferencial

- A *força gravitacional diferencial* é a diferença entre as forças exercidas em duas partículas vizinhas por um terceiro corpo, mais distante;
- Responsáveis por fenômenos como a precessão e as marés;



- A força diferencial tende a separar as duas partículas, pois em relação ao centro de massa elas se afastam.

Derivação da força diferencial



$$\Delta F = F_1 - F_2$$

$$F_1 = \frac{GMm_1}{(r - R)^2}$$

$$F_2 = \frac{GMm_2}{r^2}$$

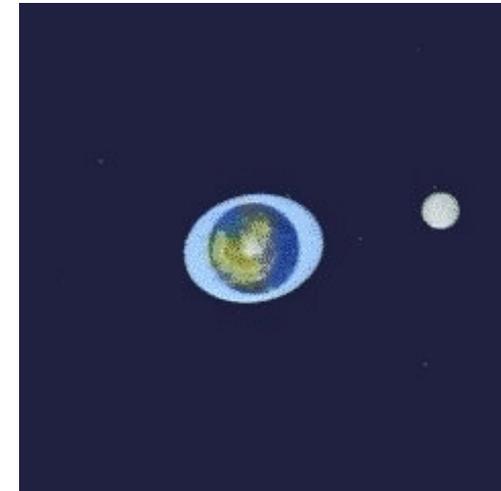
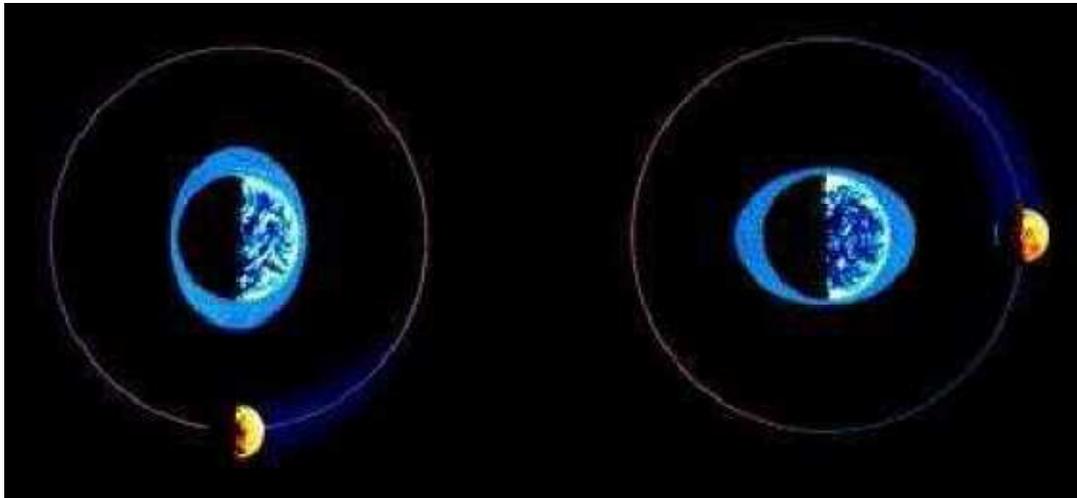
$$\Delta F = \frac{2GMm}{r^3}R$$

Derivando a lei da gravitação universal

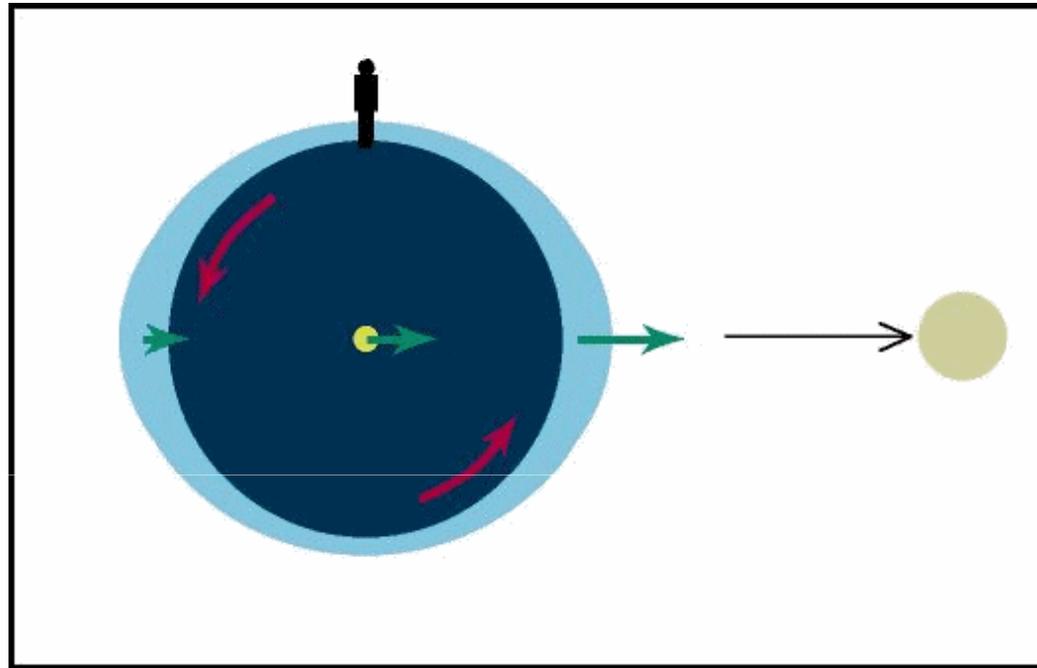
$$dF = \frac{2GMm}{r^3}dr.$$

Marés

- Atração gravitacional exercida pelo Sol e Lua na Terra;
- A atração gravitacional sentida por cada ponto da Terra devido à Lua (Sol) depende da distância do ponto a Lua;
- Em relação ao centro da Terra, um lado está sendo puxado na direção da Lua e o outro sendo puxado na direção contrária.

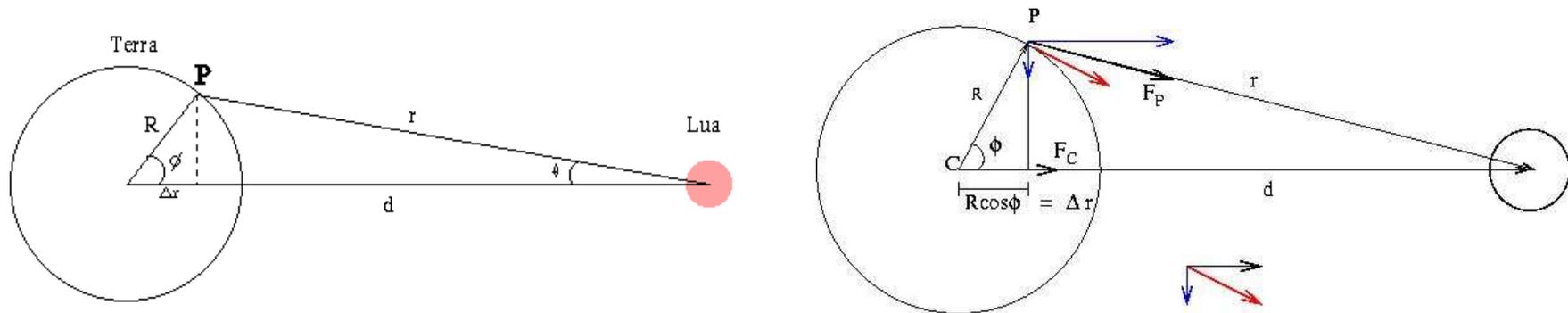


Marés



As marés acontecem duas vezes a cada 24h 48min, que é a duração do dia lunar

Marés

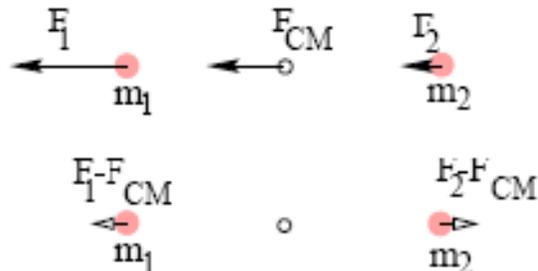


$$\Delta \vec{F} = \vec{F}_P - \vec{F}_C$$

Como r é muito maior do que R , θ é muito pequeno e F_P é quase paralela a direção de F_C .

M

M



$$\Delta F = \frac{2GMm}{r^3} \Delta r$$

$$\Delta F \propto \frac{M}{d^3} R$$

Marés na Terra pela Lua e pelo Sol

$$\Delta F \propto \frac{M}{d^3} R$$

$$\frac{dF_{\odot}}{dF_L} = \frac{M_{\odot}}{M_L} \left(\frac{d_L}{d_{\odot}} \right)^3 = \frac{2 \times 10^{30} \text{ kg}}{7,35 \times 10^{22} \text{ kg}} \left(\frac{384\,000 \text{ km}}{149\,600\,000 \text{ km}} \right)^3 = 0,46$$

A força de maré aplicada pela Lua na Terra é mais de 2 vezes maior do que a aplicada pelo Sol.

Marés e a rotação sincronizada da Lua

$$dF_{(T \rightarrow L)} = \frac{2GM_{\text{Terra}}m_{\text{partícula}}}{d_{L-T}^3} R_{\text{Lua}}$$

Força de maré causada pela Terra em uma partícula na Lua

$$dF_{(L \rightarrow T)} = \frac{2GM_{\text{Lua}}m_{\text{partícula}}}{d_{L-T}^3} R_{\text{Terra}}$$

Força de maré causada pela Lua em uma partícula na Terra

$$dF_{(T \rightarrow L)} = \frac{M_{\text{Terra}}}{M_{\text{Lua}}} \frac{R_{\text{Lua}}}{R_{\text{Terra}}} dF_{(L \rightarrow T)} \simeq 20 dF_{(L \rightarrow T)}$$

A força de maré causada pela Terra na Lua é aproximadamente 20 vezes maior do que a força de maré causada pela Lua na Terra.

Marés e a rotação sincronizada da Lua

- Acredita-se, que no passado o período de rotação da Lua era menor do que o seu período de translação em torno da Terra;
- Ao girar, ela tentava arrastar consigo os bojos de maré, que sempre ficavam alinhados na direção da Terra;
- Movimento relativo entre diferentes partes da Lua, que gerava atrito, que por sua vez tendia a frear a rotação.
- Rotação sincronizada com a translação: Marte, Phobos e Deimos; cinco luas de Júpiter; 9 luas de Urano; a lua Tritão de Netuno; Plutão-Caronte.

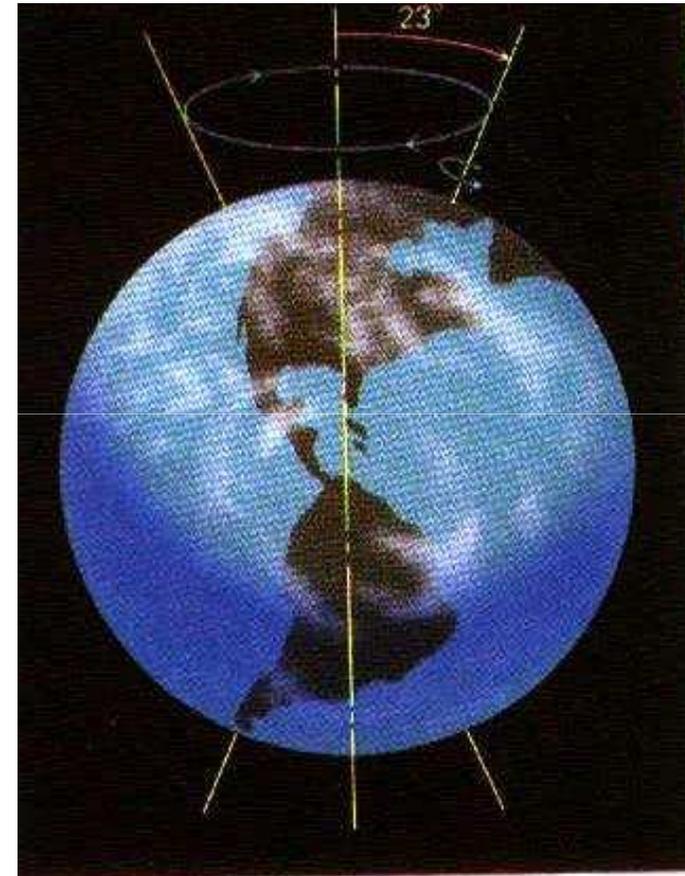
Limite de Roche

- É a distância mínima do centro do planeta que um satélite fluido pode chegar sem se tornar instável frente a rompimento por maré.

$$d = 2,44 \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R.$$

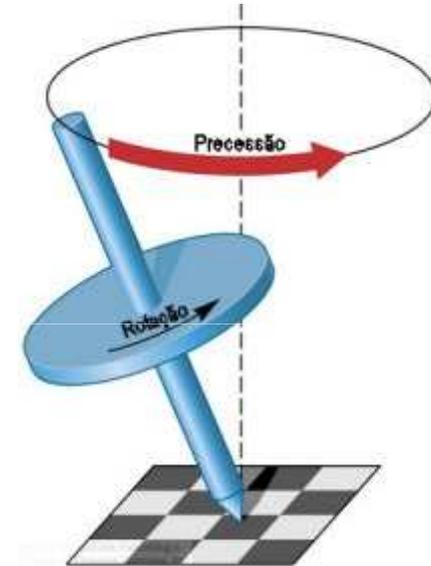
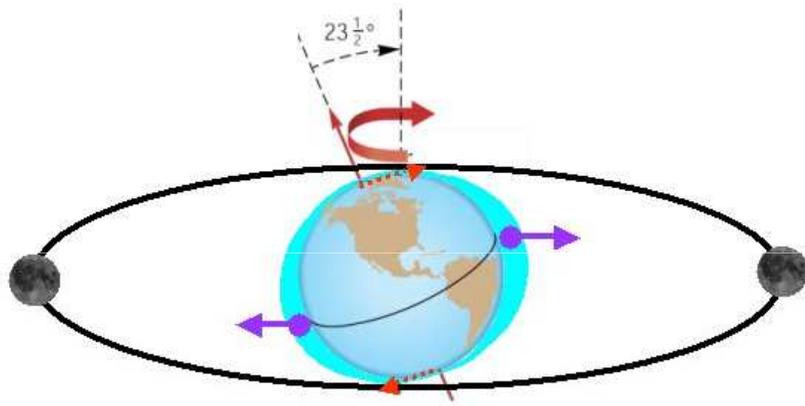
Precessão

- A Terra não é perfeitamente esférica, mas achatada nos pólos e bojuda no equador (d_E é $40 \text{ km} > d_P$);
- O plano de equador terrestre, e portanto o plano do bojo equatorial, está inclinado $\sim 23^\circ$ em relação a eclíptica, que por sua vez está $\sim 5^\circ$ em relação ao plano da órbita da Lua;
- As forças diferenciais (mais importantes nos bojos) tentem não apenas achatá-la mais ainda, mas também tendem a “endireitar” o seu eixo, alinhando-o com o eixo da eclíptica.



Precessão

- Como a Terra está girando, o eixo da Terra não se alinha com o eixo da eclíptica, mas *precessiona* em torno dele, da mesma forma que um pião posto a girar precessiona em torno do eixo vertical ao solo



$$\vec{N} = \vec{r} \times m\vec{g}.$$

Torque

$$\vec{N} = \frac{d\vec{L}}{dt}.$$

$$d\vec{L} = \vec{N} dt$$

Varição do momentum angular

Como \mathbf{L} e \mathbf{N} são perpendiculares o torque não altera o módulo de \mathbf{L} , mas apenas sua direção, fazendo-o precessionar em torno do eixo perpendicular ao solo.

Precessão

- No caso da Terra, **as forças diferenciais gravitacionais da Lua e do Sol produzem um torque** que tende a alinhar o eixo de rotação da Terra com o eixo da eclíptica, mas como esse torque é perpendicular ao momentum angular de rotação da Terra, **seu efeito é mudar a direção do eixo de rotação, sem alterar sua inclinação.**



Variação do pólo Norte celeste em relação ao pólo da eclíptica

Cada pólo celeste se move lentamente em torno do respectivo pólo da eclíptica, descrevendo uma circunferência em torno dele com raio de $23,5^\circ$.

O tempo necessário para descrever uma volta completa é 25 770 anos.

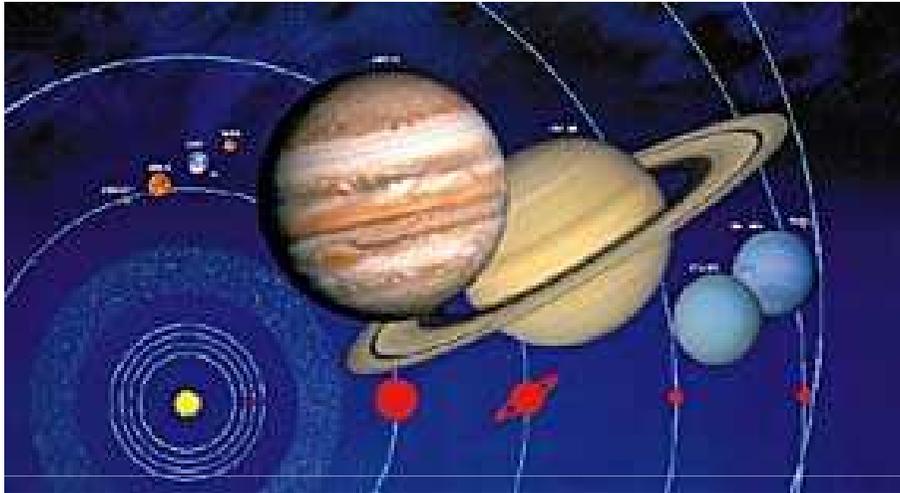
Atualmente o Pólo Celeste Norte está nas proximidades da estrela Polar, na constelação da Ursa Menor, mas isso não será sempre assim. Daqui a cerca de 13000 anos ele estará nas proximidades da estrela Vega, na constelação de Lira.

Precessão

- **A precessão não tem nenhum efeito importante sobre as estações, uma vez que o eixo da Terra mantém sua inclinação de $23,5^\circ$ em relação ao eixo da eclíptica enquanto precessiona em torno dele .**
- Como o ano do nosso calendário é baseado nos equinócios, a primavera continua iniciando em setembro no hemisfério sul, e em março no hemisfério norte.
- **A única coisa que muda são as estrelas visíveis no céu durante a noite em diferentes épocas do ano.**
- A intensidade das estações pode ser alterada. Atualmente é **verão** no hemisfério Sul quando o Sol está no **periélio** e **inverno** no hemisfério Sul quando o Sol está no **afélio**. Em ~13000 anos a situação se reverterá.

Nutação: Componente não circular (bamboleio) do movimento do pólo da terra em torno do pólo da eclíptica, causada principalmente por pequenas variações na inclinação da órbita da lua e pelo deslocamento da linha dos nodos da órbita. Principal componente: 9,5" de amplitude e período 18,613 anos.

O Sistema Solar



- Sol
- Planetas com suas luas e anéis
- Asteróides
- Cometas

Tabela 14.1: Massa no Sistema Solar

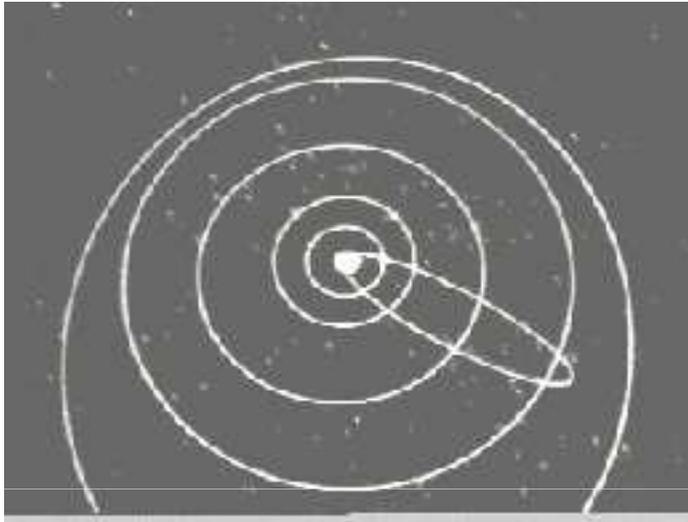
Componente	Massa
Sol	99,85%
Júpiter	0,10%
Demais planetas	0,04%
Cometas	0,01% (?)
Satélites e anéis	0,000 05%
Asteróides	0,000 000 2%
Meteoróides e poeira	0,000 000 1% (?)

Composição Química da Atmosfera do Sol

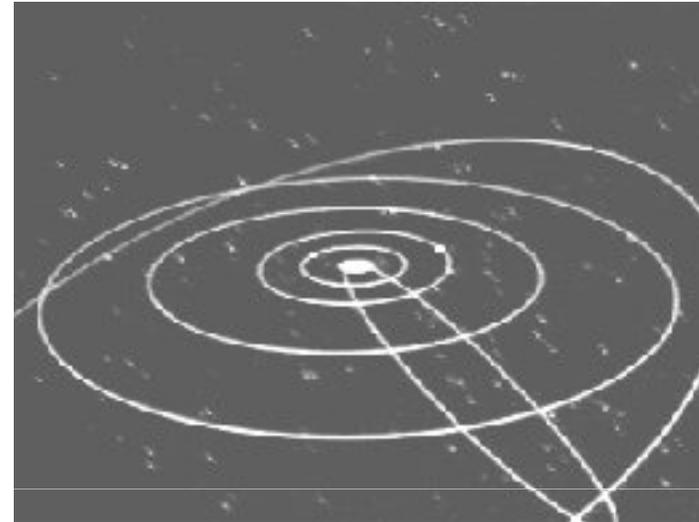
Tabela 14.2: Composição Química da Atmosfera do Sol

Elemento	Z	A	Percentagem em massa	Percentagem em número de partículas
H	1	1	70,57 %	91,2%
He	2	4	27,52%	8,7%
O	8	16	0,9592%	0,078%
C	6	12	0,3032%	0,043%
Ne	10	20	0,1548%	
Fe	26	56	0,1169%	
N	7	14	0,1105%	
Si	14	28	0,0653%	
Mg	12	24	0,0513%	
S	16	32	0,0396%	
Ne	12	24	0,0208%	
Mg	12	26	0,0079%	
Ar	18	36	0,0077%	
Fe	26	54	0,0072%	
Mg	12	25	0,0069%	
Ca	20	40	0,0060%	
Al	13	27	0,0058%	
Ni	28	58	0,0049%	
C	6	13	0,0037%	
He	2	3	0,0035%	
Si	14	29	0,0034%	
Na	11	23	0,0033%	
Fe	26	57	0,0028%	
Si	14	30	0,0024%	
H	1	2	0,0023%	

O Sistema Solar



Órbitas dos planetas externos em torno do Sol e do cometa Halley



A órbita de Plutão é inclinada 17° em relação ao plano médio dos outros planetas

A origem do Sistema Solar

Hipótese Nebular

- Origem em 1755 (Kant) e desenvolvida em 1976 (Laplace);
- Como **todos os planetas estão no mesmo plano, giram em torno do Sol na mesma direção**, e também **giram em torno de si mesmos na mesma direção** (com exceção de Vênus), **só poderiam ter se formado da mesma nuvem de partículas em rotação**;
- A medida que a nuvem colapsava, a rotação da nuvem aumentava por conservação de momentum angular, e com o passar do tempo a massa de gás rotante assumiria uma forma discoidal, com uma concentração central que deu origem ao Sol;
- Os planetas teriam se formado a partir do disco.

