

Capítulo 3

O SISTEMA SOLAR

Este capítulo será dedicado ao estudo sistema solar, principalmente no que se refere aos componentes que orbitam o Sol, nossa estrela. Nesta primeira parte discutiremos então a respeito dos planetas e dos corpos menores que compõem o meio interplanetário. Por se tratar de um tópico bastante extenso, não nos aprofundaremos no estudo individual dos planetas, apresentando somente suas características mais relevantes. Na segunda parte, a formação do sistema solar será apresentada, num estudo também conhecido como cosmogonia.

Parte I Meio Interplanetário

Planetas

Corpos Menores

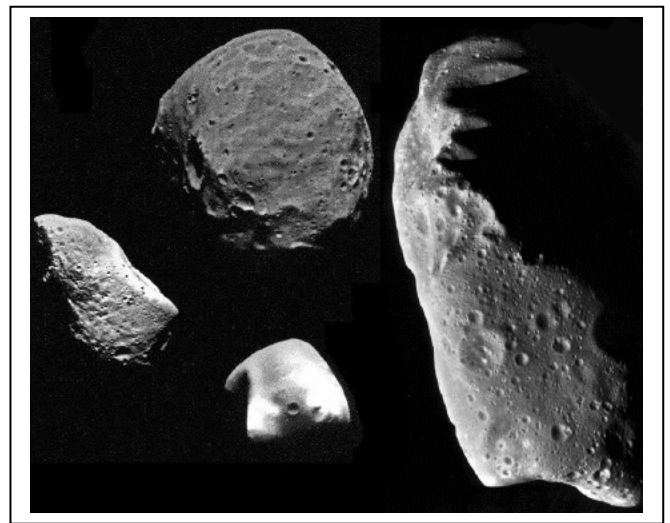
Satélites e Anéis

Asteróides

Cometas

Meteoritos e Meteoros

Gás e Poeira Zodiacal



Parte II Formação do Sistema Solar

Movimento dos Planetas

Teoria de Formação

Disco Protoplanetário

Bibliografia

- *Introductory Astronomy & Astrophysics*, de Zeilik & Smith (cap 7)
- *Astronomy: a beginner's guide to the Universe*, Chaisson & McMillan (cap 4)

Meio Interplanetário

O Sol e seus nove planetas são os principais constituintes do **sistema solar**, que além desses componentes possui vários outros elementos, como satélites, asteróides, meteoróides, cometas e poeira zodiacal. Por concentrar quase a totalidade da massa do sistema solar (99,87%), o Sol exerce uma poderosa atração sobre os demais corpos, fazendo-os gravitar ao seu redor.

A órbita de Plutão representa o tamanho aparente do sistema solar e a luz do Sol leva 5 horas e meia para chegar até esse planeta. Este tempo é bastante curto quando comparado com a distância média até as estrelas vizinhas, que é de aproximadamente 5 anos-luz. Para termos uma idéia das escalas de distâncias envolvidas, poderíamos supor que dois sistemas planetários vizinhos seriam como dois vilarejos com extensão de apenas 1km cada, ambos localizados no Continente Sul Americano; um no extremo sul e outro no extremo norte.

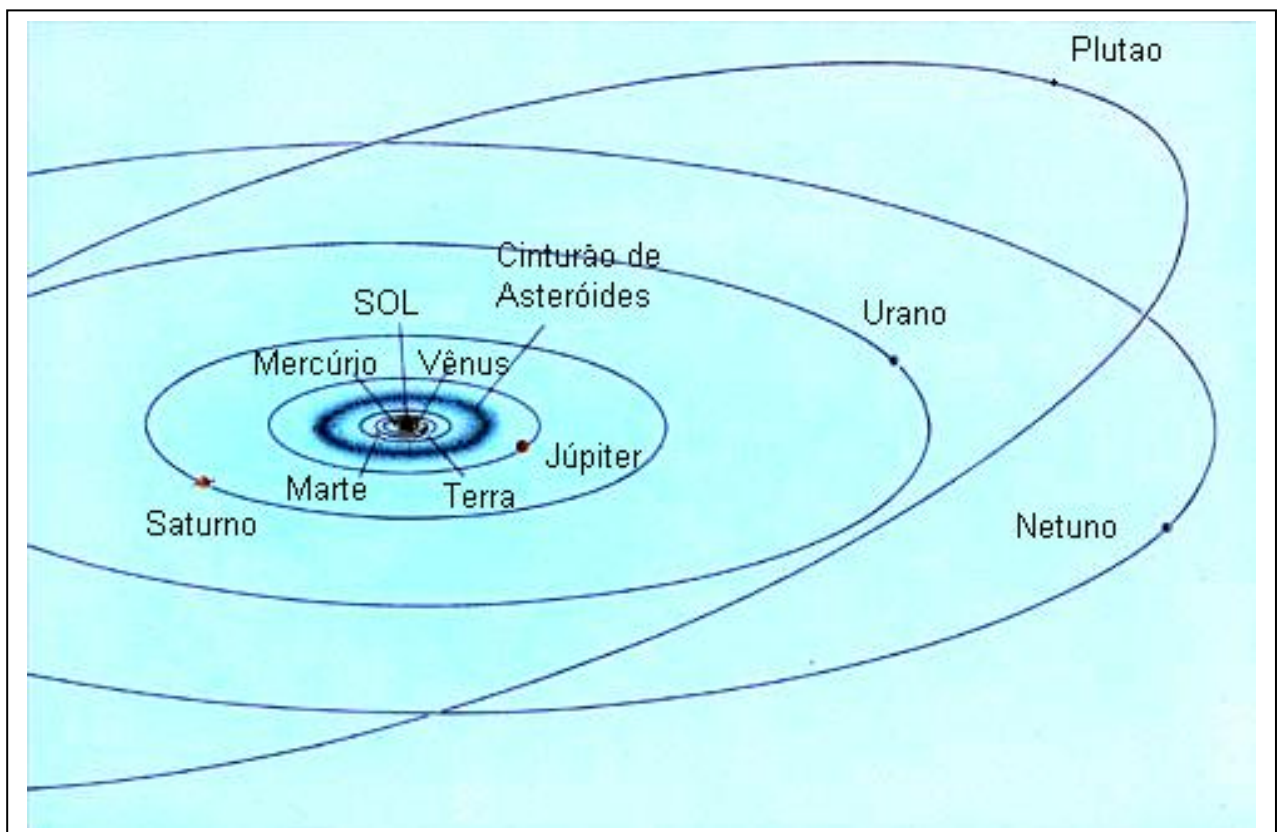


Figura 1. Representação em perspectiva do Sistema Solar. Com exceção a Mercúrio e Plutão, as órbitas dos planetas estão aproximadamente no mesmo plano. A dimensão total do sistema solar é de 80 U.A.

PLANETAS

Como já vimos anteriormente a palavra **planeta** é de origem grega e significa **astro errante**. Somando a massa de todos os planetas verificamos que ela corresponde a uma pequena fração (0,134%) da massa de todo o Sistema Solar.

A massa dos planetas é determinada aplicando-se a terceira lei de Kepler, considerando o movimento de seus satélites. No caso de Mercúrio e Vênus (que não têm satélites), a massa é determinada pela análise de perturbações gravitacionais que esses planetas exercem no movimento de outros planetas, asteróides ou cometas.

Júpiter, Saturno, Urano e Netuno (também chamados planetas externos) têm baixa densidade e são classificados como **planetas jovianos**, pois seu protótipo é o planeta Júpiter. Seus principais constituintes são substâncias livres: hidrogênio e hélio gasoso, gelo de água, metano, dióxido de carbono e amônia.

Mercúrio, Vênus, Terra e Marte são os planetas com densidade maior, formando a classe dos **planetas telúricos** (neste caso, o protótipo é a Terra). São constituídos de rochas (silicatos e óxidos) e metais, como níquel e ferro. Já o planeta Plutão não tem classificação exata.

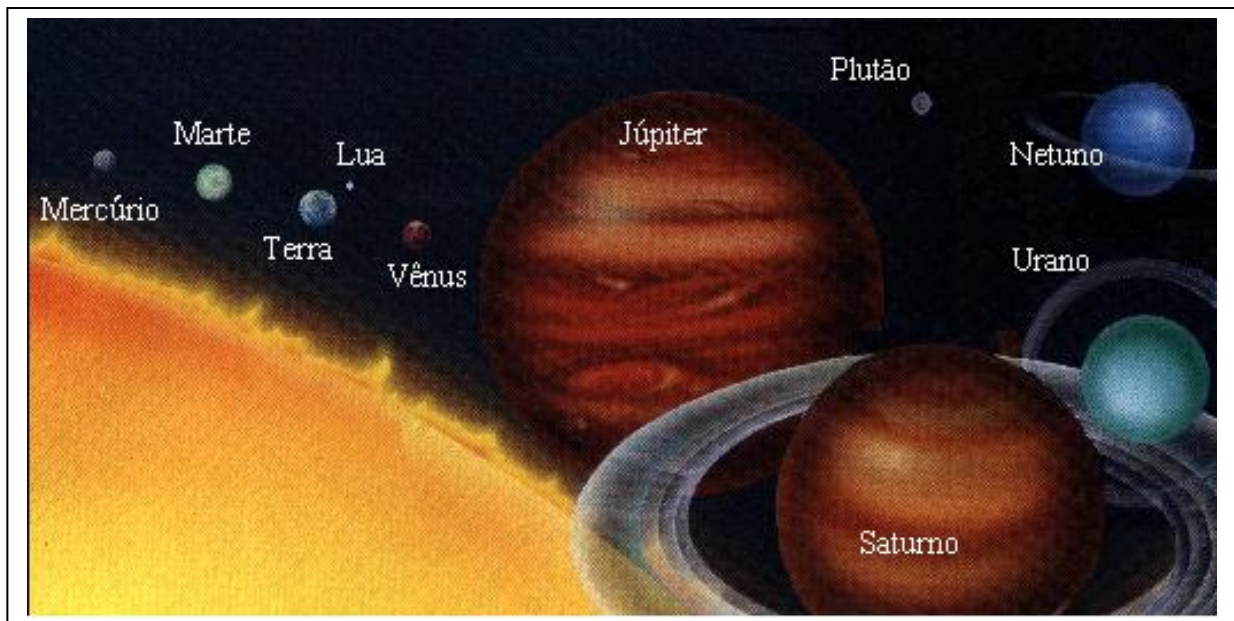


Figura 2. Representação em escala dos tamanhos relativos dos planetas e o Sol. A proporção das órbitas não foi respeitada

CORPOS MENORES

Os corpos menores, com dimensões inferiores às dos planetas, têm enorme importância no estudo da formação do Sistema Solar. Muitos não foram submetidos a altas pressões e temperaturas, portanto não sofreram metamorfismos decorrentes da fusão e fracionamento gravitacional. Os que permaneceram longe do Sol retiveram os compostos voláteis originais, sendo considerados verdadeiros “fósseis” por ainda guardarem o registro das condições físicas e químicas primordiais do Sistema Solar.

(a) Satélites e anéis

Fazem parte do meio interplanetário os satélites que orbitam ao redor dos planetas e também os anéis que os planetas jovianos possuem. Nas tabelas a seguir, são listados os números de satélites e de anéis dos Planetas.

Planeta	Mercúrio	Vênus	Terra	Marte	Plutão
Nº de satélites	0	0	1	2	1

Planeta	Júpiter	Saturno	Urano	Netuno
Nº de satélites	16	20	15	8
Anéis	1*	7	10	3*

(*) O sistema de anéis de Júpiter é composto de um halo interior, um anel principal e um anel difuso exterior. Um dos anéis de Netuno é composto de quatro arcos.

(b) Asteróides

O significado da palavra Asteróide está relacionado a “objeto com aparência estelar”. Por se encontrarem relativamente próximos, os asteróides apresentam movimento próprio. Quando tomamos uma fotografia de longa exposição o asteróide deixa traços sobre o fundo de estrelas fixas.

Antigamente, os asteróides recebiam nomes mitológicos como por exemplo, Ceres o primeiro asteróide descoberto em 1801 por Piazzi. Hoje são designados pelo ano de descoberta seguido de duas letras.

A maior parte dos asteróides já catalogados (cerca de 2000) têm órbitas circulares e localizam-se no **cinturão de asteróides**, que fica entre Marte e Júpiter. Sondas espaciais constataram que ele é surpreendentemente desprovido de poeira fina. Um subgrupo de asteróides (Troianos) é encontrado na mesma órbita de Júpiter.

O **tamanho** de um asteróide pode ser determinado quando uma estrela é ocasionalmente ocultada, ou então, através da medida da quantidade de luz solar que ele reflete. Ceres, o maior de todos, tem diâmetro de 1025 km, mas somente 30 asteróides têm dimensões maiores que 200 km. Através de ocultação de estrelas foram descobertos asteróides duplos. Em 1993 a sonda espacial Galileu fotografou o asteróide Ida, com cerca de 56 km junto com sua lua esférica de 1,5 km.

Por não apresentarem simetria esférica e por possuírem movimento de rotação, seu brilho, devido à reflexão da luz solar, não é constante. Essas modulações da curva de luz permitem inferir o período de rotação que varia de horas a anos.

A determinação da **massa** é feita através da medida da perturbação gravitacional, por ocasião de um encontro próximo ou demorado entre dois asteróides. Juntos, todos os asteróides têm apenas um centésimo da massa de Mercúrio, ou o dobro da massa de Ceres.

Através de espectrofotometria podemos estudar sua **composição química**. Cerca de 60% dos asteróides têm composição similar àquela dos meteoritos carbonáceos, são escuros e orbitam na parte externa do cinturão. Cerca de 30% são rochosos-ferrosos (rochas, ferro e níquel em partes iguais), mais claros e orbitam nas partes mais internas. Os demais têm composição ferrosa.



(a)

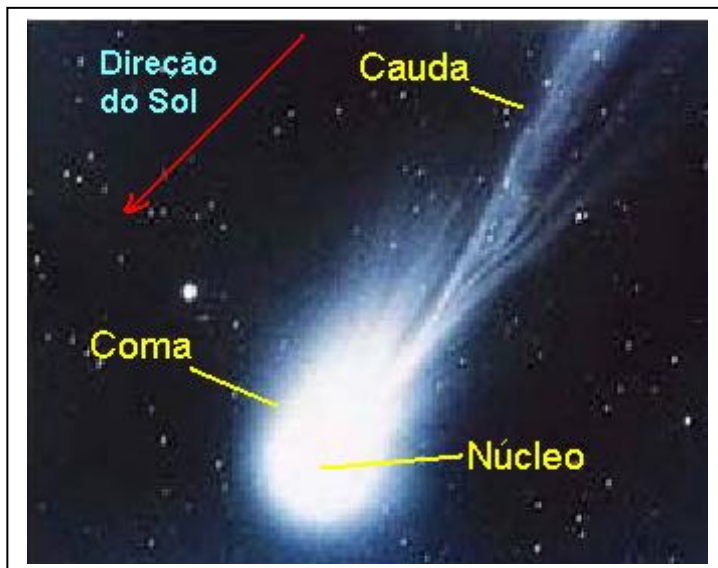


(b)

Figura 3. Fotos obtidas pela sonda espacial Galileu. (a) Asteróide Gaspra (diâmetro ~20 km) fotografado a uma distância de 1600 km (b) O asteróide Ida (diâmetro ~50 km) visto a 3400 km. Ao lado de Ida aparece sua lua esférica Dáctil, com 1,5 km de diâmetro.

(c) Cometas

A parte sólida de um cometa, o **núcleo**, constitui-se de gelo com impurezas, tem forma irregular e mede vários quilômetros. Seu principal componente é a água, formando hidratos de várias substâncias: metano, amônia, dióxido de carbono, etc.



As impurezas misturadas ao gelo são constituídas de matéria meteórica não volátil de diversos tamanhos: desde grãos submicrométricos de poeira até fragmentos maiores provenientes dos chamados *chuviros de meteoros*.

Figura 4. Foto do cometa de Halley em 1986, cerca de 1 mês antes de sua passagem no perihélio. São indicadas as características de um cometa típico, mostrando o núcleo, coma, envoltório de hidrogênio e cauda.

Um estudo das características das órbitas dos cometas levou o holandês Jan H. Oort a propor a existência de uma nuvem hipotética, que hoje leva seu nome. Essa nuvem seria uma espécie de camada que teria um raio médio de 100 mil UA, envolvendo todo o Sistema Solar. Cerca de 100 bilhões de cometas estariam hibernando nessa camada, já que não sofreriam desgastes por vaporização, por estarem muito distantes do Sol.

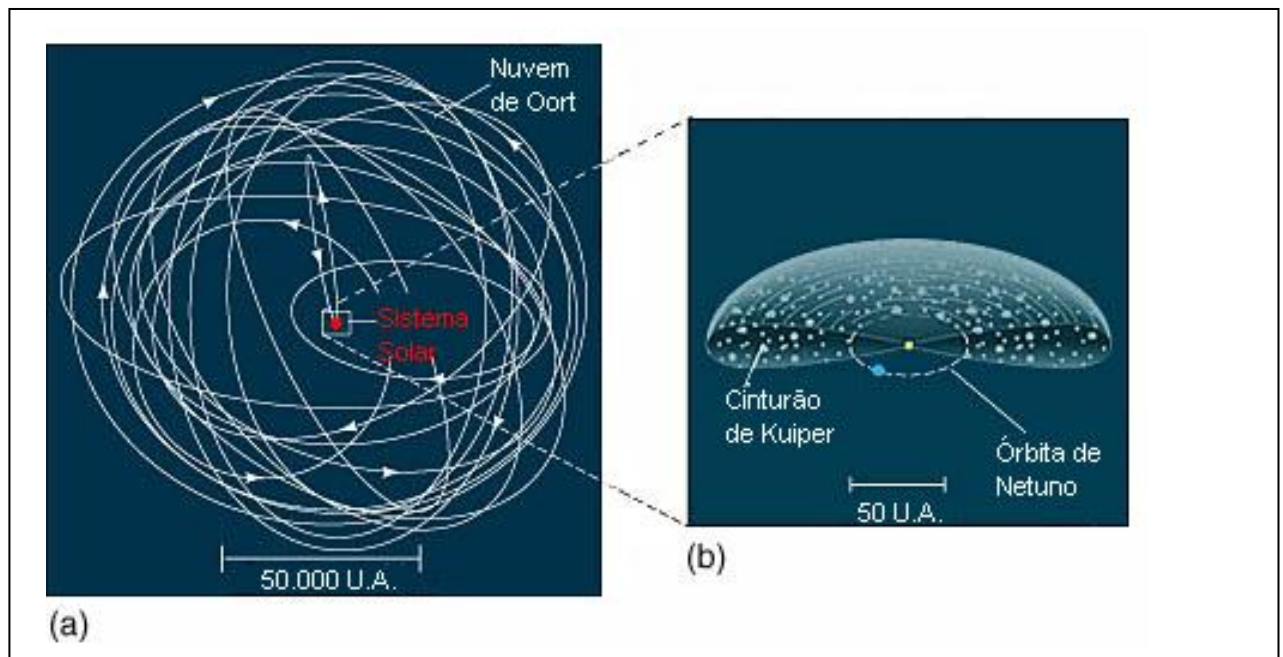


Figura 5. (a) Diagrama da nuvem de Oort mostrando algumas órbitas cometárias. De todas as órbitas, somente aquelas com maior excentricidade entrarão no Sistema Solar. (b) Cinturão de Kuiper onde se acredita que seja a origem dos cometas de curto período.

O movimento do Sol na Via Láctea, induz perturbações gravitacionais devido às estrelas vizinhas, que alterariam as órbitas desses cometas, projetando uns para fora do Sistema Solar e outros para as proximidades do Sol. Quando a segunda alternativa ocorresse, veríamos um cometa “novo”, cuja órbita é elíptica e o período seria da ordem de milhões de anos.

Os afélios de cometas “novos” não se confinam ao plano da eclíptica, mas se distribuem por todas as direções no espaço. Esse fato fundamenta a escolha da forma de camada e não de anel para a nuvem de Oort.

À medida que um cometa se aproxima do Sol, o gelo do núcleo se aquece e se vaporiza, ejetando gases que arrastam consigo grãos de poeira. A **coma** é uma tênue nuvem de gás e de poeira, de forma aproximadamente esférica (raio da ordem de 100 mil km) que envolve o núcleo. Trata-se de matéria que o cometa está perdendo para o meio interplanetário. A cada aproximação do Sol o cometa perde cerca de um centésimo de sua massa total.

O brilho da coma se deve, em parte, aos grãos de poeira que refletem a luz do Sol; por outro lado, as moléculas de gás também reemitem a luz solar, através do processo de fluorescência ressonante.

As **caudas** podem ser entendidas como prolongamentos da coma na direção oposta a do Sol. Desta forma as caudas se classificam em dois tipos:

Tipo I → gás ionizado pela radiação solar é empurrado pelo vento solar. A cauda é retilínea, mais estreita e mais estruturada.

Tipo II → grãos de poeira de diversos tamanhos. Os grãos são empurrados através da pressão exercida pela radiação solar. Essa ação é menos intensa do que na cauda de Tipo I. Por isso tende a ser encurvada na direção de procedência do cometa, além de ser mais larga.



Figura 6. Diagrama de parte da órbita de um cometa típico. Conforme o cometa se aproxima do Sol, ele desenvolve uma cauda sempre dirigida na direção contrária à do Sol. Quando se encontra mais próximo do Sol, uma cauda de poeira curva também dirigida na direção contrária a do Sol pode aparecer.

(d) Meteoritos e Meteoros

São objetos menores ainda, que podem colidir entre si ou com os planetas, satélites e asteróides. **Meteoróides** consistem em restos de cometas ou fragmentos de asteróides. Quando um meteoróide entra na atmosfera terrestre gera um **traço de luz no céu** chamado **meteoro**. Se parte **sobrevive** e atinge o chão temos um **meteorito**.

(e) Gás e Poeira Zodiacal

A poeira zodiacal é uma nuvem de grãos, os quais medem de 1 a 10 μ m, ficam concentrados no plano da eclíptica, descrevendo órbitas aproximadamente circulares. Esses grãos refletem a luz solar, produzindo a chamada **luz zodiacal** que forma uma faixa no céu ao longo da eclíptica.

COSMOGONIA

A primeira parte deste capítulo foi dedicada à descrição geral dos planetas e dos corpos menores. Em continuidade a esse estudo, nesta segunda parte será apresentada a teoria de formação do nosso sistema planetário. A constatação de várias semelhanças entre os planetas e seus movimentos, observadas há muito tempo atrás, levou à atual proposta de teoria de formação.

Considerando as propriedades dinâmicas dos componentes do sistema solar, verifica-se que algumas características são regulares. Entre elas, destacam-se: (i) distância dos planetas ao Sol; (ii) órbitas coplanares (Mercúrio e Plutão são exceções); (iii) movimento orbital dos planetas e da rotação do Sol num mesmo sentido; (iv) a rotação dos planetas é no mesmo sentido do movimento orbital, com exceção apenas de Vênus e Urano; (v) a relação entre os planetas gigantes e seus sistemas de satélites e anéis é a mesma relação que ocorre entre o Sol e planetas e asteróides; (vi) há diferenças sistemáticas de composição química que distinguem os planetas internos (telúricos), dos externos (jovianos); (vii) embora 99,87% da massa do Sistema Solar esteja no Sol e apenas 0,13% nos planetas, 99% do momento angular está nos planetas e apenas 0,5% no Sol; (viii) cometas de longo período tem órbitas excêntricas com inclinações quaisquer.

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Distribuição das Órbitas dos Planetas

Os planetas seguem as leis de Kepler e de Newton nas suas órbitas elípticas em torno do Sol, e a distribuição de tamanhos dessas órbitas apresenta-se com uma certa regularidade. O espaçamento entre as órbitas cresce geometricamente à medida que se afastam do Sol.

Em 1766 (antes da descoberta de Urano, Netuno e Plutão) Titius de Wittenberg encontrou uma regra empírica aproximada para a distribuição das distâncias médias Sol-Planeta (semi-eixo maior da órbita). Johann Bode popularizou essa relação em 1772, que passou a ser conhecida como Lei de Bode ou regra de Titius-Bode.

A regra consiste em escrever a série:

$[4]; [4 + (3 \times 2^0)]; [4 + (3 \times 2^1)]; [4 + (3 \times 2^2)]; [4 + (3 \times 2^3)]; \dots$

e dividir cada um por 10, de modo a chegar na sequência:

$[0,4]; [0,7]; [1,0]; [1,6]; [2,8]; [5,2]; [10,0]; [19,6]; [38,8]; [77,2] \dots$

Uma sequência semelhante pode ser observada se escrevemos as distâncias dos planetas até o sol, em U.A.

Mercúrio	Vênus	Terra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Netuno	Plutão
0,39	0,72	1,0	1,52	5,20	9,54	19,2	30,1	39,5

Tomando a distância Sol – Terra (1 U.A.), verificamos que fora a falha em 2,8 UA (cinturão de asteróides), a lei de Bode é bastante correta para os primeiros 7 planetas.

A teoria da formação

Não há, até o momento, uma teoria cosmogônica inteiramente satisfatória. Colocam-se como principais questões (i) se a formação do Sol e dos planetas foi simultânea, e (ii) se a matéria prima dos planetas teve origem estelar ou interestelar.

A explicação mais aceita é a da Nebulosa Solar Primitiva (NSP), primeiramente proposta por Laplace, em 1796: os planetas seriam subprodutos da formação do Sol e todo o Sistema Solar teria se formado da matéria interestelar.

A formação de estrelas tem início quando uma nuvem interestelar passa por processos de fragmentação e colapso. A massa crítica que deflagra a instabilidade inicial é a chamada Massa de Jeans, estabelecendo o nível abaixo do qual a nuvem não entra

em colapso. Entre os valores típicos de uma nuvem interestelar densa, a nuvem em colapso tem massa de mil a 1 milhão de vezes maior que a massa solar. Um único colapso pode resultar em uma grande quantidade de estrelas. Por esse motivo é comum se encontrar estrelas em aglomerados, associações e sistemas múltiplos.



A imagem ao lado apresenta uma região de formação de estrelas.

À esquerda da nuvem interestelar de gás e poeira, chamada Barnard 86.

No lado direito aparece o aglomerado estelar jovem NGC6520.

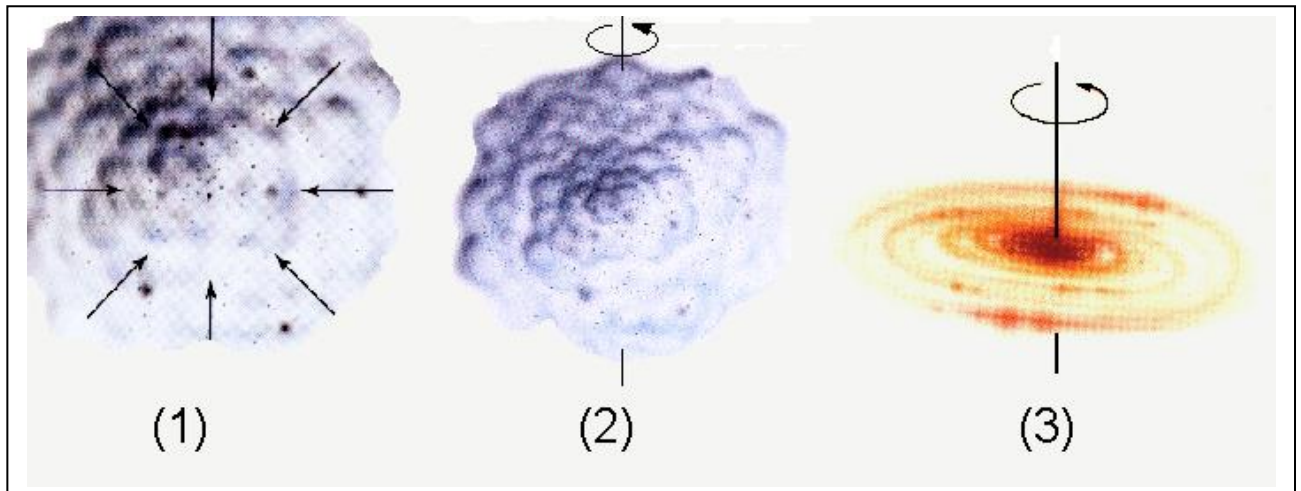
Figura 7. Imagem de nuvem escura Barnard 86, obtida por D. Malin / Anglo Australian Observatory.

A história da NSP começa quando o fragmento que daria origem ao Sistema Solar adquiriu individualidade. Isso ocorreu há 4,6 bilhões de anos. O fragmento também sofreu colapso gravitacional enquanto sua parte central não se aquecia, pois não era suficientemente densa e opaca para impedir o escape da radiação. Mais tarde a radiação passou a ter dificuldade para escapar causando um aquecimento e aumento de pressão na parte central. A partir disso, a contração ficou lenta e o proto-Sol passou a emitir radiação infravermelha. Um fator indispensável para a formação do sistema planetário é a rotação lenta da estrela, a qual propicia a formação de um disco.

Disco protoplanetário

Se a rotação inicial for muito alta, cerca de metade da massa pode se destacar formando uma estrela companheira. Não foi esse o caso do Sol. Uma rotação mais lenta deu origem a um disco. A gravidade atrai a matéria radialmente para o centro de massa, mas a força centrífuga atua perpendicularmente ao eixo de rotação.

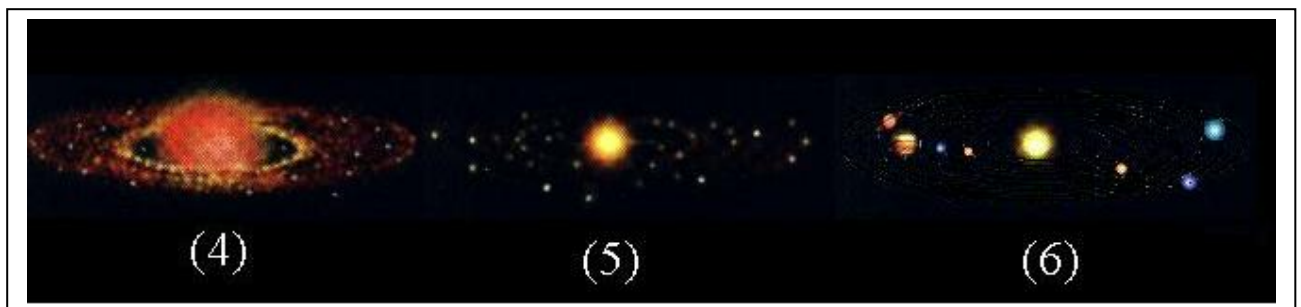
Dessa combinação de forças resulta, no centro, uma concentração maior de matéria que vai se transformar no proto-Sol e, no plano equatorial, um disco de gás e poeira que inicialmente se estenderia até a órbita de Plutão.



(1), (2) A conservação do momento angular requer que uma nuvem em rotação e em contração deve girar cada vez mais rápido à medida que seu tamanho diminui

(3) Com o passar do tempo, a matéria se distribui em um disco, que pode se tornar o sistema solar primitivo.

Das observações de estrelas em formação sabemos que ao mesmo tempo que a estrela recebe matéria que vem do disco, ocorre um escoamento molecular bipolar, através das duas extremidades do eixo de rotação. Isso contribui para uma diminuição da quantidade de material da nuvem mãe nos pólos da estrela.



(4) A parte central vai se tornar o Sol e os pequenos lóbulos na parte mais externa do disco, os planetas jovianos. Grãos de poeira agem como núcleos de condensação formando a matéria que irá colidir e formar os planetesimais.

(5) Fortes ventos da estrela em formação expõem o gás da nebulosa primordial. Os planetesimais continuam a colidir e a crescer.

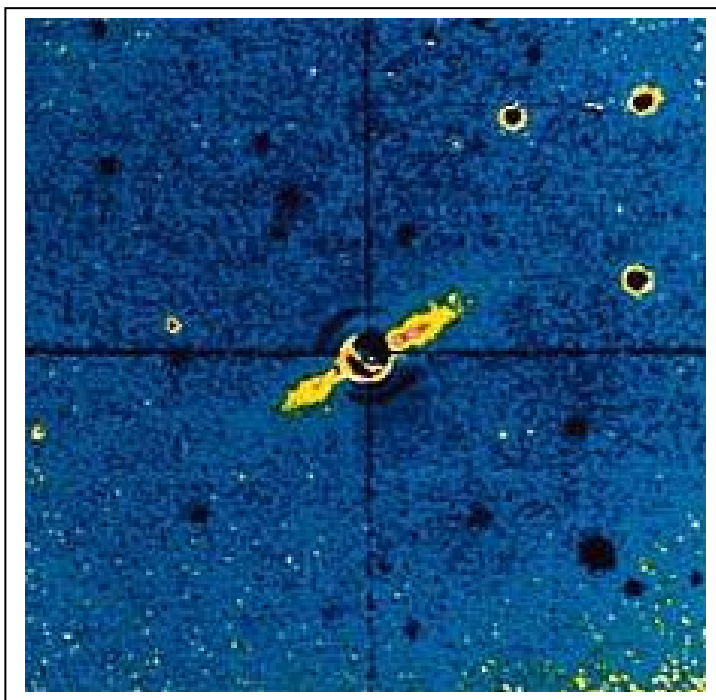
(6) Passados ~ 100 milhões de anos, os planetesimais formam planetas em órbita do Sol.

A menos da metade da distância de Mercúrio o disco se aquece a ponto de ocorrer o chamado “congelamento” do campo magnético do proto-Sol. Assim, essa parte do disco é compelida a girar com a mesma velocidade angular do proto-Sol. Como a velocidade orbital é maior que a kepleriana, a matéria acaba se afastando do Sol. O proto-Sol ejetou parte da matéria da NSP e perdeu grande parte de seu momento angular original.

Perto do proto-Sol as temperaturas no disco foram sempre mais elevadas em virtude da radiação estelar. Quase todos os grãos que vieram do meio interestelar sobreviveram, com exceção daqueles que ficaram no interior da órbita de Mercúrio, que se vaporizaram. Devido à agitação térmica, o gás demorou mais que os grãos para se concentrar no plano equatorial. Mas sob pressões entre 10^{-3} e 10^{-6} atm, ele acabou se condensando em grãos, que também se sedimentaram.

No disco, a cada distância heliocêntrica, somente se condensaram materiais cujos pontos de fusão eram mais altos que a temperatura local. Foi por esse mecanismo que na região dos planetas telúricos, apenas os materiais refratários (silicatos, óxidos) se condensaram em grãos, passando a coexistir com os de origem interestelar que sobreviveram.

As substâncias mais voláteis foram perdidas nas proximidades do proto-Sol, mas puderam se condensar a distâncias maiores. Nas regiões onde se encontram Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e a formação dos cometas, condensaram-se compostos de carbono, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio, tais como: água, dióxido de carbono, metano e amônia. **Isso determinou a diferenciação entre os planetas telúricos e jovianos.**



Com a sedimentação da matéria no disco, a densidade numérica dos grãos cresceu. Desta forma, a colisão e as forças de van der Waals propiciaram o crescimento dos grãos em até alguns centímetros, durante cerca de 10^3 anos. Os grãos centimétricos não formaram diretamente um único planeta sólido, mas inúmeros objetos com centenas de metros, descrevendo órbitas fechadas. Colisões lentas propiciaram a coalescência de corpos com dimensões de alguns quilômetros, os **planetesimais**.

Figura 9 . Fotografia de um disco ao redor da estrela Beta Pictoris (a luz da estrela foi bloqueada para que apenas o disco aparecesse). A extensão do disco ~ 1000 UA.

Acredita-se que Beta Pictoris seja uma estrela muito jovem, com a idade de apenas 100 milhões de anos e que esteja passando por um estágio evolutivo semelhante ao que ocorreu no Sol há 4,6 bilhões de anos atrás.

As baixas velocidades relativas e a atração gravitacional deram origem mais tarde aos corpos **asteroidais** e planetas **telúricos**. O disco se transforma num conjunto de anéis concêntricos com planetesimais viajando em órbitas independentes. Desta forma, os planetas se formaram através de colisões (acumulação). Estas etapas duraram até 10^8 anos.

Longe do Sol, as temperaturas mais baixas permitiram a formação de gelos, cuja aderência natural promoveu um mais rápido crescimento de planetesimais. A formação dos planetas gigantes (jovianos) foi concluída antes que a dos telúricos. No início os planetas jovianos cresceram por acumulação semelhante aos telúricos. Mas quando a massa atingiu $\sim 15 M_{\odot}$, começou o colapso hidrodinâmico do gás circundante.

Cerca de 100 milhões de anos após o surgimento da NSP, o proto-Sol começou a produzir um intenso vento que dissipou os últimos restos de gás e poeira, desobstruindo a passagem para luz visível. O proto-Sol estava na fase conhecida com **T-Tauri** (estrelas jovens de massa $\sim 1 M_{\odot}$). O atual vento solar é uma perda de massa muito menos intensa.

EXERCÍCIOS

1. Mencione as características dinâmicas que são regulares (semelhanças) entre os componentes do sistema solar, que levaram à atual proposta de teoria de formação.
2. Qual é a previsão da regra de Titius-Bode?
3. Considerando a teoria de formação de estrelas como o Sol, é comum encontrar-se estrelas recém-formadas isoladas? Por quê?
4. Qual seria a explicação para o fato de não se ter formado um planeta na região interior à órbita de Mercúrio?
5. Qual o fator determinante para a diferenciação entre planetas telúricos e planetas jovianos?
6. Por quais processos a matéria da nebulosa solar primitiva se concentrou principalmente no centro e no plano equatorial?
7. Quais as limitações observacionais em se detectar um sistema planetário em outras estrelas?