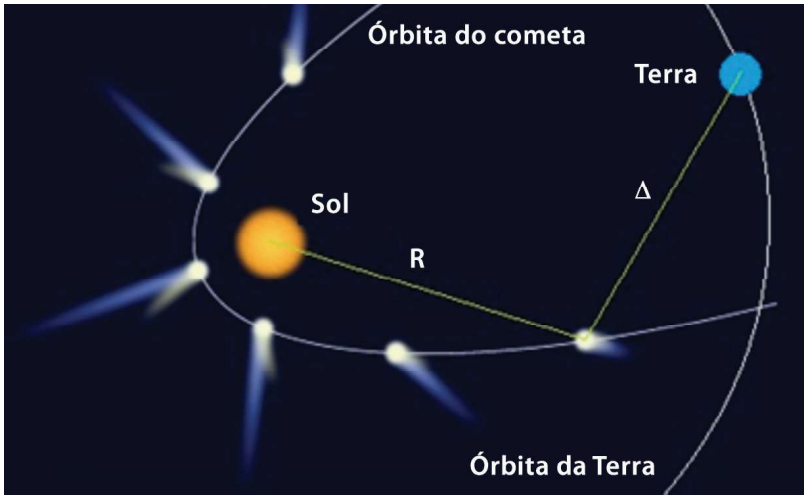


22- O brilho aparente de um cometa depende simultaneamente da sua distância ao Sol (R) e da distância dele à Terra (D).

Normalmente os cometas novos têm órbitas muito alongadas (elipses de elevada excentricidade), que os levam a distâncias enormes do Sol. Por esta razão, esses cometas passam a maior parte de suas vidas em regiões muito frias. Estudando as características orbitais dos cometas de períodos muito longos, o astrônomo holandês Jan Hendrik Oort concluiu que esses objetos formavam uma nuvem esférica centrada no Sol, que ficou conhecida por Nuvem de Oort. Sua dimensão ainda não é bem conhecida, mas estima-se que ela ocuparia o espaço entre 5.000 e 100.000 UA, e poderia conter até um trilhão de cometas. Como os cometas são pequenos, a massa total deles deve ser menor que a de um planeta gasoso.

Perturbações gravitacionais (marés) causadas pela aproximação do Sol com estrelas, durante seu trajeto pela Via Láctea, lançam cometas na direção do Sol e eles surgem como cometas novos. Estes, quando visitam as partes internas do Sistema Solar, se aproximam de todas as direções, ao contrário dos cometas de curto período que o fazem através de órbitas quase coplanares à eclíptica.

5.8 Anéis planetários e meteoroides

· *Anéis*

Anéis são enxames de partículas girando em torno de planetas, em órbitas circulares. As órbitas elípticas provocam colisões entre as partículas, que destroem o anel. Os anéis são finos, planos e estão no plano equatorial do planeta. Órbitas inclinadas resultam em colisões e destruição dos anéis.

Dois fenômenos gravitacionais explicam a existência dos anéis: ressonância e maré.

A ressonância orbital surge quando dois corpos em órbita exercem mutuamente influência gravitacional regular e periódica. Isto ocorre quando os períodos orbitais dos corpos estão relacionados por uma razão de dois números inteiros. Algumas ressonâncias são estáveis. Por exemplo, Plutão e Netuno estão em ressonância 3:2. A cada três revoluções de Netuno em torno do Sol ocorrem duas revoluções de Plutão, e os dois voltam na mesma posição relativa. Isto impede variações orbitas que possam aproximar muito os planetas.

Outras ressonâncias, no entanto, geram instabilidades nas órbitas dos corpos e criam lacunas. A Divisão de Cassini (tabela 9) é uma região que separa os anéis A e B de Saturno, em que predomina a

ressonância 2:1 com o satélite Mimas. O lado externo do anel A está sob ressonância desestabilizadora 7:6 com o satélite Janus. Pan, outro satélite, tem sua órbita dentro de uma região praticamente desprovida de material, conhecida como Lacuna de Enke. Ele é o responsável por essa lacuna.

O segundo fenômeno gravitacional é a força diferencial, conhecido como maré. Imagine um satélite orbitando um planeta. Como a força gravitacional que o planeta exerce sobre o satélite é inversamente proporcional à distância que os separa (Fg µ 1/d2), a face do satélite voltada diretamente para o planeta é mais fortemente atraída que a face oposta. A diferença entre essas forças (definida como força diferencial) provoca dilatação no satélite na direção da linha que une os centros dos dois corpos. Quanto maior for a força diferencial, maior será a dilatação. Se a força diferencial superar a força de autogravitação do satélite, ele se rompe. Esse limite de instabilidade, estudado por Edouard Roche, é conhecido como Limite de Roche. A expressão genérica é:

$$d = 2{,}44\, R \sqrt[3]{\frac{\rho_M}{\rho_m}} \qquad (5)$$

sendo R o raio do planeta, ρ_M e ρ_m as densidades do planeta e do satélite, respectivamente. Se os dois corpos tiverem a mesma composição química o Limite de Roche equivale a 2,44 raios do planeta. Para corpos esferoidais rochosos ou congelados maiores que 40 km em diâmetro, o coeficiente numérico é 1,38. Para corpos em queda direta no planeta, o coeficiente é 1,19.

Todos os planetas gasosos têm anéis, dentro dos respectivos limites de Roche. Saturno apresenta o sistema de anéis mais exuberante. Eles foram descobertos em 1610, quando Galileu Galilei usou sua luneta para observar o planeta. Como todo aparato óptico da época, a luneta de Galileu, que ampliava as imagens em cerca de dez a vinte vezes, era de má qualidade óptica. A lente objetiva era esverdeada, devido ao alto teor de ferro no substrato de vidro, tinha bolhas no seu interior, o polimento das superfícies era ruim, e a imagem produzida pelos bordos da lente era distorcida. Assim, os anéis de Saturno lhe pareciam como um par de saliências difusas da cada lado do planeta.

Utilizando um telescópio de melhor qualidade, Christian Huygens anunciou em 1659 que as saliências eram na realidade um disco chato e fino que contornava Saturno. Dezesseis anos mais

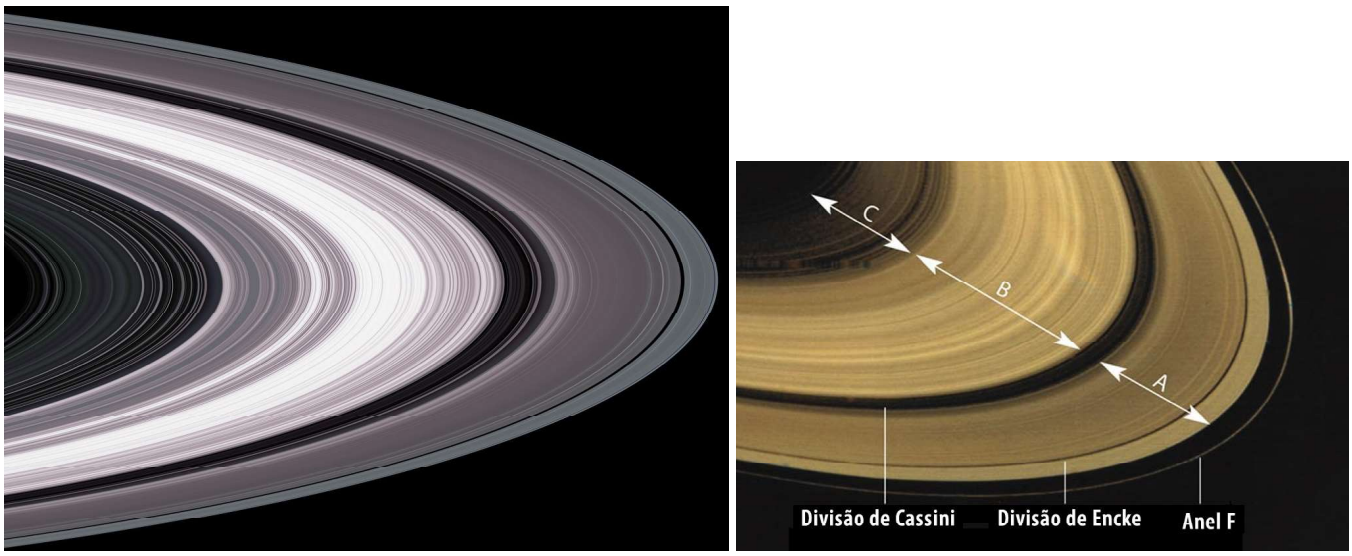
	Bordo interno	Bordo externo	Largura
Anel D	66.970 km	74.490 km	7.500 km
Anel C	74.490 km	91.980 km	17.500 km
Lacuna Colombo	77.800 km		100 km
Lacuna Maxwell	87.500 km		270 km
Lacuna Bond	88.690 km	88.720 km	30 km
Lacuna Dawes	90.200 km	90.220 km	20 km
Anel B	91.980 km	117.580 km	25.500 km
Divisão Cassini	117.500 km	122.050 km	4.700 km
Lacuna Huygens	117.680 km		285-440 km
Lacuna Herschel	118.183 km	118.285 km	102 km
Lacuna Russell	118.597 km	118.630 km	33 km
LacunaJeffreys	118.931 km	118.969 km	38 km
Lacuna Kuiper	119.403 km	119.406 km	3 km
Lacuna Laplace	119.848 km	120.086 km	238 km
Lacuna Bessel	120.305 km	120.246 km	10 km
Lacuna Barnard	120.305 km	120.318 km	13 km
Anel A	122.050 km	136.770 km	14.600 km
Lacuna Encke	133.570 km		325 km
Lacuna Keeler	136.530 km		35 km
Divisão Roche	136.770 km	139.380 km	2600 km
Anel F	140.224 km		30-500 km
Anel G	166.000 km	174.000 km	8.000 km
Anel E	180.000 km	480.000 km	300.000 km

Tabela 9- Sistema de anéis de Saturno (http://planetarynames.wr.usgs.gov/append8.html). Lacuna é falha menor que Divisão.

tarde, em 1675, Giovanni D. Cassini conseguiu distinguir dois anéis separados por uma lacuna escura, que ficou conhecida como Divisão de Cassini. Hoje sabemos que ela separa o anel mais interno B do anel A.

A realidade começou a ser esclarecida somente em 1857, quando James Clerk Maxwel demonstrou que os anéis saturninos deveriam ser constituídos por miríade de pequenas partículas, orbitando o planeta como se fossem satélites. Essa afirmação só foi confirmada em 1895 por análise espectroscópica. As partes mais internas giravam mais rápido que as mais externas, tal como se espera de um movimento circular regido pelas leis de Newton. Um disco rígido giraria com velocidade única.

Na década de 1970, as sondas espaciais americanas Pioneer (pioneira) e Voyager (viajante) mostraram que os anéis são compostos de partículas de gelo e rocha, com tamanhos que variam entre fração de milímetro e algumas dezenas metros. Atualmente a sonda americana Cassini, revela detalhes até então desconhecidos. Por exemplo: (a) os anéis principais são formados por inúmeros anéis menores; (b) as lacunas não são vazias, mas preenchidas por anéis rarefeitos; (c) o anel E, o mais externo, é formado por partículas de gelo ejetadas do satélite Encélado, através de geisers localizados nas proximidades do seu polo sul; (d) pequeninos satélites orbitam Saturno dentro de determinados anéis.



23- Sistema de anéis de Saturno (NASA/JPL).

Os anéis de Saturno são muito finos, se comparados aos seus diâmetros. Se a espessura fosse representada pela espessura de uma folha de papel, cerca de um décimo de milímetro, o diâmetro do anel mais externo teria 40 metros. Trata-se na realidade de um sistema bastante complexo envolvendo satélites próximos. Resumidamente, o sistema é composto de 7 anéis, 9 estruturas aneladas, 2 divisões, 14 lacunas e 18 pequenos satélites.

Os três anéis principais são, em ordem decrescente de largura, B, C e A. Eles são compostos por uma miríade de anéis finos, constituídos de partículas com dimensões que variam de fração de milímetro a dezenas de metros. Partículas rochosas predominam na região mais próxima de Saturno, enquanto partículas de gelo são mais abundantes na região mais externa do disco.

O anel mais largo, e também o mais externo, é o E. Ele preenche a região entre as órbitas dos satélites Mimas e Reia. Esse anel difuso é constituído de partículas microscópicas compostas de silicatos e água, dióxido de carbono e amônia congelados. Essas partículas são geradas por jatos criogênicos da região polar sul do satélite Encélado.

O anel mais estreito é o F. Ele é rarefeito, sinuoso, com concentrações locais, arcos e possivelmente figuras transientes que aparecem e desaparecem.

Júpiter, Urano e Netuno também têm anéis de gelo e rocha, só não tão extensos e complexos como os de Saturno. Além disso, eles são muito difíceis de ser ver da Terra, mesmo com telescópios potentes.

Os anéis de Júpiter foram descobertos em 1979 pela sonda Voyager 1, mas sua origem era um mistério. Observações posteriores da sonda Galileu, projetada para observar Júpiter e seus satélites principais entre 1995 e 2003, confirmaram que os anéis foram criados por impactos de meteoroides nos satélites menores e próximos do planeta.

De fato, o sistema de anéis joviano é bem mais simples que o de Saturno, os anéis são mais finos e compostos de poeira meteorítica. Basicamente, são três anéis. O mais interno tem aparência de um toroide nebular, por isso é chamado de Anel Halo. Ele se estende de 92.000 km até cerca de 122.500 km do centro de Júpiter. Como o raio do planeta é cerca de 71.400 km, este anel situa-se a apenas 20.000 km acima das nuvens elevadas de Júpiter. O intermediário, Anel Principal, é estreito, fino e concentrado na região entre 122.500 km e 128.940 km do centro de Júpiter. Ele tem 6.440 km de largura e 30 km de espessura. O anel seguinte é espesso e uniforme, mas muito tênue, e estende-se

Nome	Raio (km)	Raio relativo	Largura (km)
Equador de Urano	25.559	1,000	
6	41.837	1,637	1,5
5	42.235	1,652	2
4	42.571	1,66	2,5
Alfa	44.718	1,750	4 – 10
Beta	45.661	1,786	4 – 11
Eta	47.176	1,834	1,6
Gamma	47.626	1,863	1 – 4
Delta	48.303	1,900	3 – 7
Lambda	50.024	1,957	2
Epsilon	51.149	2,006	20 – 96
Equador de Netuno	24.766	1,000	
Galle (1989N3R)	41.900	1,692	2.000
LeVerrier (1989N2R)	53.200	2,148	110
Lassell (1989N4R)*	53.200	2,148	4.000
Arago (1989N4R)*	57.200	2,310	< 100
Sem nome	61.950	2,501	
Adams (1989N1R)	62.933	2,541	50
Coragem	62.933	2,541	15
Liberdade	62.933	2,541	15
Igualdade 1	62.933	2,541	15
Igualdade 2	62.933	2,541	15
Fraternidade	62.933	2,541	15

**originalmente identificados com anel único*

Tabela 10- Anéis de Urano e Netuno (Adaptado de Jouney through the Galaxy; http://filer.case.edu/~sjr16/advanced/index.html).

pelo anel principal e halo. Ele é dividido em duas partes: Anel Tênue Andrasteia, associada ao satélite Andrasteia, e Anel Tênue Tebe, associada ao satélite Tebe. O limite externo deste anel está a 222.000 km do centro de Júpiter.

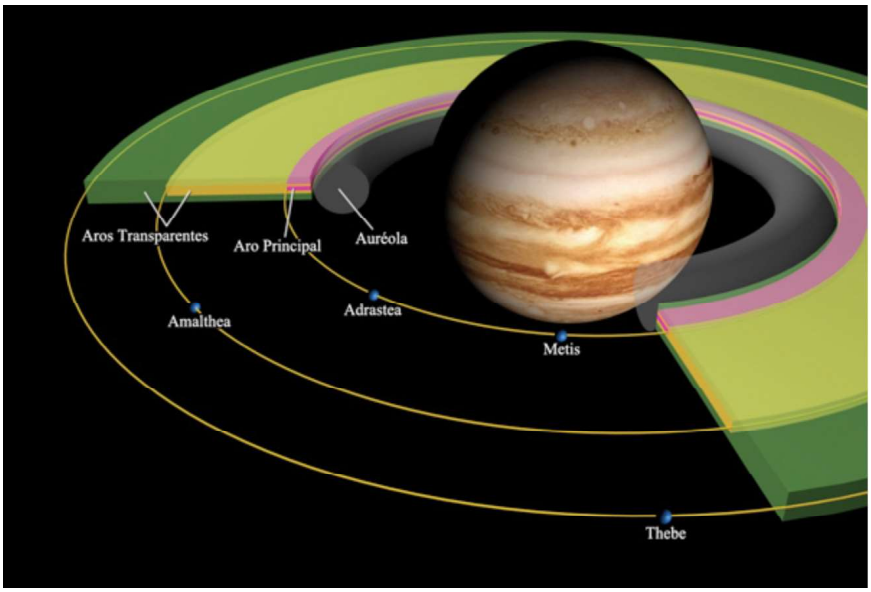
Embora haja suspeitas de que Sir William Herschel, que descobriu Urano em 1781, tenha suspeitado da existência de um anel em 1789, os anéis foram descobertos em 1977, com a observação da ocultação de uma estrela pelo planeta. O brilho dessa estrela variou rapidamente pouco antes e pouco depois da ocultação. Isto era um indicativo de que algo estava bloqueando parte da luz dessa estrela. Eram os anéis. Posteriormente foram encontrados mais quatro anéis, dois pela sonda Voyager 2 e dois pelo telescópio espacial Hubble.

Até o momento são treze anéis. Em ordem crescente de distância de Urano, eles são designados 1986U2R/ζ (38.000 km de raio), 6, 5, 4, α, β, η, γ, δ, λ, ε, μ (98.000 km de raio) e ν. Eles são tão escuros como carvão (refletem apenas 2% da luz incidente), provavelmente compostos de gelo contaminado com material orgânico.

Soubemos da existência de anéis em Netuno em 1989, quando a sonda Voyager 2 passou pelo planeta. Eles são tênues e constituídos de poeira, como os de Júpiter. São cinco anéis: Galle, Le Verrier, Lassell, Arago e Adams. Há outro anel bem mais tênue posicionado na órbita do satélite Galateia.

Os anéis netunianos também são muito escuros e contaminados por material orgânico. O anel Adams é dividido por cinco arcos discretos (Fraternidade, Igualdade 1 e 2, Liberdade 1 e 2, e Coragem).

Provavelmente, anéis planetários são criados quando satélites pequenos colidem entre si ou são desintegrados ao se aproximarem demais do planeta. Os fragmentos desses satélites passam a orbitar os planetas, cada qual com sua órbita. Colisões posteriores repetidas acabam pulverizando ainda mais os fragmentos, eventualmente formando um conjunto de anéis. Impactos de meteoroides nas



24- Representação gráfica dos anéis de Júpiter. As órbitas dos satélites mais internos estão representadas por linha contínua.

Nome	Cometa	Ocorrência
Eta Aquáridas	1P/Halley	início de maio
Perseidas	109P/Swift-Tuttle	meados de agosto
Dracônidas	21P/Giacobini-Zinner	início de outubro
Leônidas	55P/Tempel-Tuttle	meados de novembro

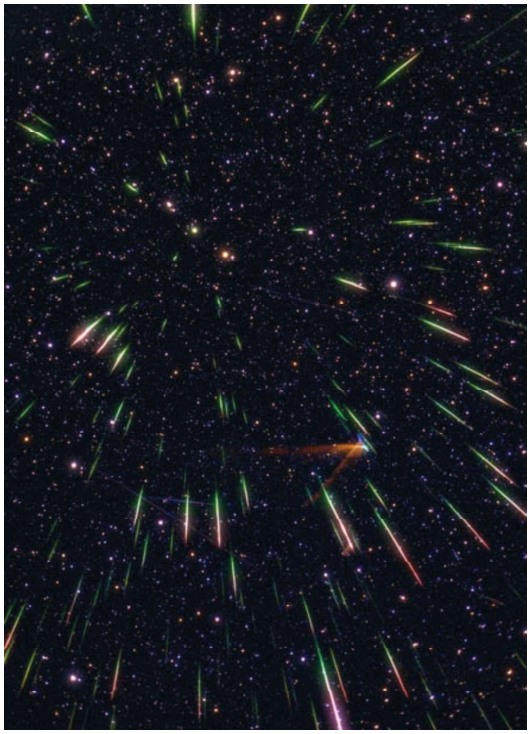
Tabela 11- Chuvas de meteoros mais conhecidas.

superfícies dos satélites mais próximos dos planetas também produzem poeira que acaba alimentando o sistema de anéis. Acredita-se que sistemas de anéis sejam fenômenos transientes, que duram algumas centenas de milhões de anos. Casos como o de Saturno devem ser raros.

• *Meteoroides (Fragmentos Rochosos)*

Pelo espaço interplanetário vagam fragmentos rochosos, com tamanhos entre 0,1 mm e 10 m, genericamente denominados meteoroides. Um objeto maior que 10 m é considerado asteroide, e menor que 0,1 mm é considerado grão de poeira (ou micrometeoroide).

Ao cair na Terra o meteoroide sofre atrito com os gases atmosféricos, é parcialmente vaporizado e produz um rastro luminoso denominado meteoro (a popular estrela cadente). Um fenômeno muito comum é o chuveiro (ou chuva) de meteoros, que pode apresentar até milhares de meteoros por hora. Os traços luminosos parecem provir de uma direção específica do céu, chamada radiante. Na realidade é um fenômeno de perspectiva, semelhante ao que ocorre quando vemos os trilhos de uma linha de trem encontrar-se no infinito. O chuveiro de meteoros recebe o nome da constelação onde estiver seu radiante, por exemplo: Aquáridas (Aquário), Perseidas (Perseu), Dracônidas (Dragão) e Leônidas (Leão). Geralmente, essas chuvas estão associadas a cometas. Particularmente, as mencionadas acima estão, respectivamente, associadas aos cometas Halley, Swift-Tuttle, Giacobini-Zinner e Tempel. A razão dessa associação é a seguinte: parte da poeira ejetada pelos cometas permanece em movimento orbital ao redor do Sol, na órbita do cometa. Quando a Terra cruza a órbita de um desses cometas, ou passa muito próximo dela,



25- Chuva de meteoros Leônidas, vista em 2001 (Tago, Shusaku. http://tagoshu.cool.ne.jp/astro_photos/phenomena/leonids2001-e.html).

essa poeira cai na Terra produzindo uma chuva de meteoros. Portanto, este é um fenômeno periódico.

Corpos grandes produzem meteoros muito mais intensos, com enormes rastros de fumaça e ruído sonoro intenso, denominados bolas de fogos ou bólidos. Um destes fenômenos ocorreu às 10h30 do dia 12/02/1947, na Sibéria, perto da cadeia montanhosa Sikhote-Alin. No local da queda foram encontradas várias crateras, com diâmetros entre 1 m e 30 m, e fragmentos constituídos basicamente de ferro.

Os meteoroides que sobrevivem à passagem pela atmosfera, atingem o solo e passam a ser chamados meteoritos. Geralmente, a queda de um meteoroide grande produz uma cratera imensa, mas podem ocorrer casos de desintegração explosiva antes de o meteoroide atingir o solo. Este foi o caso de Tunguska, região inóspita da Sibéria, onde toda uma região florestal foi devastada na manhã de 30/06/1908. Este fenômeno foi mais violento que o de Sikhote-Alin. A poeira produzida pela queda se dispersou pela atmosfera onde permaneceu por várias semanas. A luz solar refletida pela poeira clareava as noites, numa extensão vasta que ia das montanhas do Cáucaso até as ilhas Britânicas. Nenhum fragmento foi encontrado no solo.

A extinção dos dinossauros, ocorrida há 65 milhões de anos, entre o Cretáceo e o Terciário, pode ter relação com a queda de um asteroide de 10 km na península de Yucatán (México), que produziu uma cratera de 180 km de diâmetro. A maior extinção em massa conhecida, que fez desaparecer 96% das espécies marinhas, 50% das famílias existentes em terra e desaparecimento total das trilobites (artrópodes marinhos que viveram exclusivamente nos mares do Paleozoico, entre 542-251 Ma), ocorreu no final do período Permiano, há 250 milhões de anos. Uma cratera de impacto com cerca de 480 km de diâmetro na Terra de Wilkes, na Antártida, pode estar associada a essa extinção.

De acordo com a composição química, os meteoritos podem ser classificados em três grupos básicos: metálicos, ferropétreos e rochosos (ver tabela 12). Os meteoritos metálicos, também denominados ferrosos ou sideritos, são constituídos de uma liga de ferro (90 a 95%) e níquel (5 a 10%). A aparência externa destes meteoritos lembra restos de ferro siderúrgico, com superfície arredondada (moldada pela fusão atmosférica), e às vezes com depressões que se parecem com marcas de dedo em barro. Internamente, a aparência é de ferro com traços de níquel (figura 26). Eles são fortemente atraídos por imã. Após um tratamento adequado, eles apresentam estruturas retilíneas (figuras de

Tipo	Classe	Subclasse	Abundâncias (%)
Metálicos (sideritos)			4
Férropétreos (siderólitos)			1
Rochosos (pétreos)	Acondritos		9
	Condritos	Carbonáceos	5
		Ordinários	81

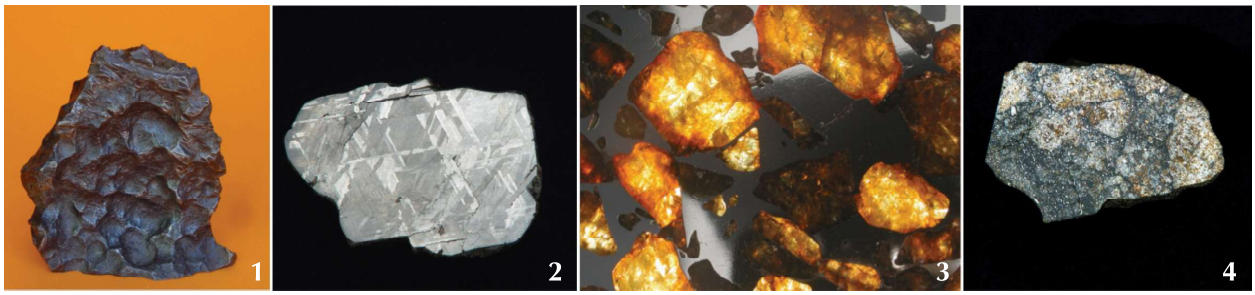
Tabela 12- Classificação básica dos meteoritos em grupos e subgrupos.

Widmanstätten) que se formam em ambientes de alta pressão e resfriamento muito lento, típicos de núcleo de grandes corpos diferenciados, como os planetas.

Os meteoritos ferropétreos, ou siderólitos, formam o grupo minoritário. Eles são formados de silicatos e da mistura de ferro e níquel, em proporções comparáveis. Externamente se parecem com rocha ordinária, mas internamente apresentam cristais escuros e arredondados de olivina (grupo de minerais silicáticos do tipo Mg_2SiO_4, Fe_2SiO_4, e outros) incrustados em uma matriz clara de ferro-níquel (figura 26).

Os meteoritos rochosos, ou pétreos, aparentam as rochas terrestres. Os acondritos lembram as rochas ígneas (basalto vulcânico) que sofreram fracionamento, ou seja, constituídas de diferentes fragmentos rochosos cimentados por uma matriz de composição homogênea (figura?). Os condritos se diferenciam das rochas terrestres pela presença de côndrulos, pequenas esferas de rochas fundidas a altas temperaturas e solidificadas (figura 26). Em idade, estes meteoritos são contemporâneos ao Sol (4,6 bilhões de anos). Os condritos carbonáceos apresentam inclusões ricas em cálcio e alumínio, também solidificadas a altas temperaturas, ambas incrustadas numa matriz formada de silicatos hidratados, condensados a baixas temperaturas. A cor escura dessa matriz se deve à presença de compostos orgânicos, inclusive aminoácidos. Isto significa que essa matriz jamais sofreu aquecimento superior a 200K. Portanto, fica evidente que os materiais que formam este tipo de meteorito tiveram origens diferentes e foram agregados num corpo único. Os condritos ordinários não apresentam minerais hidratados, nem compostos orgânicos. A matriz é formada por minerais de alta temperatura de fusão, mais clara, não apresenta inclusões de cálcio e alumínio, e assemelha-se aos côndrulos. Na amostragem de meteoritos, eles representam a maioria.

A análise comparativa da composição química nos permite associar os meteoritos corpos parentais. Os meteoritos sideritos estão associados aos asteroides tipo M; os ferropétreos associam-se aos asteroides tipo S; os condritos ordinários têm composição química semelhante a dos mantos e crostas dos planetas telúricos; os condritos carbonáceos assemelham-se aos asteroides tipo C; e os acondritos se parecem muito com material encontrado na Lua e em Marte.



26- Meteoritos: [1] Pirapora (MG) – siderito; [2] Itutinga (MG) – figuras de Widmanstatten; [3] Imilac (Chile) – siderólito; [4] Paranaiba (MS) – pétreo / condrito. Créditos: [1], [2] e [4] – Maria Elizabeth Zucolotto – Museu Nacional – UFRJ; [3] Fotografia de Geoffrey Notkin, Aerolite Meteorites, www.aerolite.org. Imagens fora de escala.

5.9 Estrutura e formação do sistema solar

5.9.1 A Estrutura

O Sistema Solar é composto de uma estrela, oito planetas, cinco planetas-anões (número que deve crescer), centenas de satélites, milhares de asteroides e centenas de milhões de cometas, além de rocha e poeira interplanetária. Toda essa matéria mantém-se unida pela força gravitacional do Sol, o componente maior.

Podemos dizer que a massa do Sistema Solar está concentrada no Sol. Ele retém 99,8% da massa total, sendo 70,9% de hidrogênio, 27% de hélio e 2,1% de outros elementos químicos. Ou seja, o Sistema Solar é predominantemente gasoso. Essa proporção de massa entre estrela e sistema planetário é regra. Um megaplaneta tem cerca de treze vezes a massa de Júpiter, ou 1,2% da massa do Sol. Para gerar energia por fusão nuclear uma estrela deve ter no mínimo cerca 8% da massa solar.

O Sol não é apenas o objeto mais maciço do Sistema Solar, ele é também o maior e o mais quente. Considerando a fotosfera como o limite aparente do Sol, ele tem 1.400.000 km de diâmetro e 5.600 K de temperatura. A massa do Sol (2×10^{33} kg) é grande, assim como seu volume, por isso a densidade solar é baixa, 1,4 g/cm^3, apenas 40% maior que a da água.

A região do plano da eclíptica contida no raio de até cerca de 4 UA do centro do Sol é dominada por objetos rochosos. Nela há quatro planetas, um planeta anão (Ceres) e milhares de asteroides. O planeta mais próximo do Sol, Mercúrio, é também o menor do Sistema Solar. Vênus e Terra são muito parecidas em tamanho, massa e composição química, mas bem diferentes em condições ambientais. Vênus é muito mais quente e sua atmosfera é bem mais densa. Marte tem tamanho intermediário entre Mercúrio e Terra (ou Vênus). Sua distância média do Sol é uma vez e meia a da Terra, a gravidade em sua superfície é um terço da terrestre, ele é bem mais frio e a pressão atmosférica na superfície é 90 vezes menor que a terrestre. Destes quatro planetas, só a Terra tem água em abundância e nos três estados físicos (sólido, líquido e gasoso).

Entre Marte e Júpiter, há um cinturão de corpos rochosos de tamanhos e formas variadas, os asteroides. As densidades variam entre 2,3 g/cm^3 (tipo argila) até 7,7 g/cm^3 (liga ferro-níquel). A

análise comparativa entre as densidades determinadas pela composição química e pela dinâmica (gravitação) permite dividi-los em três grupos gerais: (1) essencialmente sólidos, (2) com cerca de 20% de porosidade, e (3) com mais de 30% de porosidade. Os mais hidratados, isto é, ricos em água, podem conter até 1% da massa em água. Grandes asteroides como Pallas e Vesta, podem conter grande quantidade de água.

A região entre 5 UA e 31 UA do Sol é povoada pelos planetas gasosos e seus satélites, e por famílias de cometas de curto período. Por similaridades de tamanho e composição química, podemos separá-los em duas duplas: Júpiter e Saturno, os maiores, e Urano e Netuno. A massa de Júpiter é maior que a soma das massas dose todos os planetas do Sistema Solar.

Júpiter e Saturno são constituídos essencialmente de hidrogênio e hélio, o que lhes dá um caráter de gigantes gasosos. Proporcionalmente, Urano e Netuno têm gases mais densos, por isso são chamados, por vezes, de gigantes congelados. Os topos das nuvens desses planetas são sob temperaturas extremamente baixas: -145 °C em Júpiter (5,2 UA), -175 °C em Saturno (9,5 UA), -210 °C em Urano (19,3 UA) e -220 °C em Netuno (30,2 UA).

Devidos às massas elevadas, Júpiter e Saturno apresentam maior abundância de satélites; cerca de seis dezenas cada um. Ganimedes (Júpiter) e Titã (Saturno) são maiores que Mercúrio. Io (Júpiter) é o corpo de maior atividade vulcânica do Sistema Solar e Titã tem atmosfera mais densa que a terrestre. Os demais satélites têm superfícies congeladas e são ricos em água.

Urano e Netuno, menos massivos, têm menos satélites. Urano tem quatro satélites pouco superiores a 1.000 km de diâmetro: Ariel, Umbriel, Titânia e Oberão. Netuno tem apenas um satélite grande, Tritão, que é do tamanho de Plutão.

A região transnetuniana é vasta e pouco conhecida. O objeto mais famoso dessa região é Plutão, até pouco tempo classificado como planeta. Ele e seus vários pequenos corpos orbitam o Sol praticamente na mesma trajetória, formando a família dos plutinos. Há várias outras famílias de pequenos corpos que povoam aquela região. Estes objetos todos estão dentro do Cinturão de Edgeworth-Kuiper, entre 30 UA e 50 UA, que é bem mais extenso e massivo que o cinturão principal dos asteroides. Os objetos desse cinturão são compostos de rocha, gelo e gases congelados, sobretudo hidrocarbonetos e amônia, e têm períodos orbitais da ordem de duas centenas de anos. São muito ricos em água.

Os tamanhos são diversificados, assim como as órbitas. Até o momento há quatro planetas-anões nessa região, mas a quantidade exata é desconhecida. Eris tem órbita bastante alongada, seu afélio atinge 100 UA. Sedna, um objeto com praticamente a metade do tamanho de Eris, tem afélio bem mais distante, cerca de 970 UA. Os corpos mais numerosos desta região são os menores que 100 km de diâmetro. Não sabemos exatamente quantos são, mas devem ultrapassar milhões. Os cometas de períodos curtos e médios fazem parte desta população.

A massa total encerrada no Cinturão de Edgeworth-Kuiper pode ser menor que a da Terra. A temperatura local é da ordem de 50 K (-223 °C). Até as imediações desta região, a distribuição dos corpos ocorre praticamente no plano da eclíptica, as inclinações em relação a este são pequenas. Para distâncias heliocêntricas bem maiores, acima de alguns milhares de UA, a distribuição dos corpos começa a se tornar gradativamente esférica e espessa.

Entre cerca de 30.000 UA e 100.000 UA, cometas orbitam o Sol na Nuvem de Oort. Portanto, podemos admitir o limite externo da Nuvem de Oort como região limítrofe do Sistema Solar. Mesmo sendo grande, essa distância equivale a um terço da distância da estrela Próxima Centauro, a mais próxima do Sol.

5.9.2 A Formação

Todo o Sistema Solar nasceu de uma mesma nuvem primitiva de gás e poeira, há cerca de 4,6 bilhões de anos. O processo físico pelo qual se formou deve ser o mesmo que predomina no nascimento de uma estrela.

Uma teoria satisfatória deve explicar as propriedades dinâmicas e físicas do Sistema Solar. As principais são as seguintes: (1) os sentidos de revolução e de rotação dos planetas (exceto Vênus) e da maioria dos satélites coincidem com o sentido de rotação do Sol; (2) as órbitas dos planetas (exceto Mercúrio) são quase circulares e praticamente coplanares à eclíptica; (3) as órbitas da maioria dos satélites também são quase circulares e coplanares ao equador dos seus planetas; (4) as distâncias heliocêntricas dos planetas, assim como as distâncias orbitais dos satélites, seguem uma lei de espaçamento regular; (5) juntos, os planetas apresentam momento

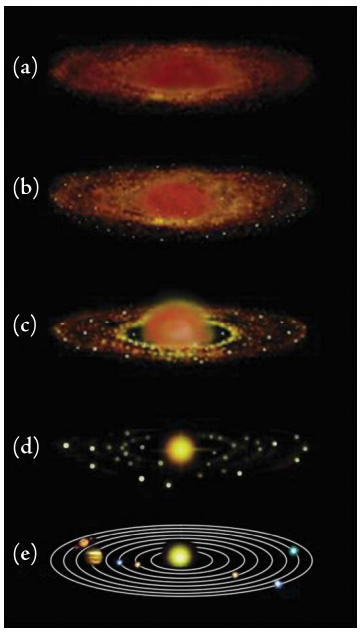
angular[1] bem maior que o do Sol; (6) os cometas de períodos longos apresentam órbitas com excentricidades e inclinações diversas, ao contrário dos cometas de períodos curtos e dos demais corpos do Sistema Solar; (7) os planetas gigantes apresentam anéis; (8) adiante de Netuno há uma população de corpos pequenos com características diversificadas; (9) os planetas apresentam composição química diferenciada, relacionada com a distância heliocêntrica.

Longe de serem fortuitas, estas características decorrem do processo de formação. A primeira tentativa de explicação foi apresentada por René Descartes em 1644, antes de Isaac Newton formular a teoria da gravitação. Essa teoria foi aperfeiçoada por Immanuel Kant (1775) e Pierre-Simon de Laplace (1796). Entretanto, os avanços mais significativos surgiram apenas no século passado, graças ao aprimoramento da instrumentação astronômica, incluindo a espacial, e ao desenvolvimento teórico dos modelos de estrutura e evolução estelar.

Como todas as estrelas, o Sol surgiu da contração de uma nuvem fria de gás e poeira, referenciada como Nebulosa Solar Primitiva (NSP) (figura 26). Durante a contração, um embrião do Sol, o proto-Sol, formava-se no centro da NSP. Sua temperatura era bem menor que a atual e ele emitia radiação infravermelha. Quanto mais a nuvem se contraía, mais rapidamente ela girava. Essa rotação provocava a formação de um disco de matéria na região equatorial do proto-Sol[2]. Esse sentido de rotação da nuvem é o que predominou no Sistema Solar.

Os corpos rochosos cresceram gradativamente, acumulando matéria através de colisões. Este processo, conhecido por acreção. No princípio as colisões ocorriam entre grãos, que, aos poucos, iam se tornando aglomerados maiores até formarem planetésimos, corpos maiores que 1 km de diâmetro. À medida que a massa aumentava, a gravidade do corpo atuava com mais intensidade. Isto acelerava ainda mais o acúmulo de matéria. Nesta fase, as colisões se tornavam cada vez mais violentas. Parte das crateras formadas nas colisões ainda permanece exposta nas superfícies de planetas e satélites. Estes corpos se for-

1. Quantidade de movimento angular = mvr, onde m é massa, v é velocidade orbital e r é raio.
2. A relação entre contração e rotação decorre do princípio de conservação do momento angular. De acordo com as leis de movimento de Newton o momento angular de qualquer objeto deve permanecer constante antes, durante e depois de uma mudança física. Em outras palavras, se a distância r diminui então a velocidade v deve aumentar pois o produto mvr é contante, ou seja, ele se conserva.



26- Na contração da Nebulosa Solar Primitva, o Sol formou-se no centro da nuvem. Os planetas e seus satélites foram formados a partir da matéria do disco circunsolar (J.K.Beathy, 1981).

maram perto do Sol, uma região quente em que predominava a composição química típica dos rochosos.

Os planetas gasosos podem ter se formado por processo diferente, denominado instabilidade de disco. Ele se parece mais com o processo de formação das estrelas. Essa instabilidade gravitacional no disco de matéria provoca o surgimento de grandes bolhas de gás, que acumulam matéria com muita rapidez. Este processo pode ser mil vezes mais rápido que o de acreção. A região onde se formaram os planetas gigantes era mais fria e composta predominantemente por gases. Júpiter e Saturno são compostos essencialmente de hidrogênio e hélio, como o Sol. Como grandes massas implicam em campos gravitacionais intensos, estes planetas acumularam muitos satélites.

A matéria que não foi acrescentada aos planetas e satélites ficou concentrada nos asteroides e cometas. A maior parte dos asteroides permaneceu no cinturão principal de asteroides.

A região diante de Netuno concentra a maior parte da sobra de material. Os planetésimos que não se agregaram aos planetas permaneceram nessa região como objetos transnetunianos, alguns concentrados no Cinturão de Edgeworth-Kuiper, outros espalhados pela região em órbitas muito alongadas (alta excentricidade) e outros, ainda, na Nuvem de Oort. Os cometas de curto e médio período foram formados nessa região e lá permaneceram em órbitas quase coplanares com a eclíptica. Já os cometas de longo período teriam se formado nas imediações dos planetas gigantes, mais próximos do Sol, e lançados para os confins do Sistema Solar por consequência de interações gravitacionais. Assim teria se formado a Nuvem de Oort, com sua configuração esférica.

5.10 Sistemas planetários externos (exoplanetas ou planetas extrassolares)

5.10.1 Introdução

A possibilidade de existência de outros locais que pudessem abrigar vida, planetas girando em torno de outros "sóis", tem sido questionado há séculos. No século V a.C. os gregos Leucipo de Mileto e, posteriormente, seu discípulo Demócrito de Abdera desenvolveram uma teoria sobre a constituição da natureza, chamada "atomismo". Segundo ela, o todo, isto é, a realidade, se compõe de partículas indivisíveis de natureza idêntica, os "átomos", e de vácuo. Leucipo dizia: "Assim surgem os mundos.