

# SISTEMAS PLANETÁRIOS III: 9 TÓPICO

## SATÉLITES, ASTERÓIDES, METEORITOS E COMETAS

Enos Picazzio

### 9.1 Os Satélites

#### 9.1.2 Lua

##### 9.1.2.1 Interior

##### 9.1.2.2 Superfície

##### 9.1.2.3 Crateras

##### 9.1.2.4 Idade

##### 9.1.2.5 Atmosfera

##### 9.1.2.6 Origem

#### 9.1.3 Satélites de Marte

#### 9.1.4 Satélites de Júpiter

#### 9.1.5 Satélites de Saturno

#### 9.1.6 Satélites de Urano

#### 9.1.4 Satélites de Netuno

### 9.2 Asteroides e Fragmentos Rochosos (Meteoroides)

#### 9.2.1 Cinturão Asteroidal (ou Principal)

#### 9.2.2 Grupos e Famílias de asteroides

#### 9.2.3 Composição química e origem

### 9.3 Corpos Transnetunianos

#### 9.3.1 Cinturão de Edgeworth-Kuiper

#### 9.3.2 Cometas

### 9.4 Anéis Planetários e Meteoroides

#### 9.4.1 Anéis

#### 9.4.2 Meteoroides (Fragmentos Rochosos)

## 9.1 Os Satélites

Satélites são corpos que orbitam planetas, planetas-anões e asteroides, sendo que estes orbitam o Sol. Todos os satélites são sólidos. Alguns são rochosos como a Lua, outros são recobertos por gelo, porém apenas alguns têm atmosfera. Os satélites Ganimedes e Titã são maiores que Mercúrio, mas Calisto é quase do mesmo tamanho. Io é um pouco maior que a Lua, e Europa é um pouco menor. Oito satélites têm entre 1.000 e 1.500 km de diâmetro, mas a grande maioria é de objetos pequenos. Io, satélite de Júpiter, é o corpo que apresenta a maior atividade vulcânica do Sistema Solar. Pela diversidade das características que apresentam, os satélites nos ajudam a desvendar detalhes da formação deles e de seus planetas.

### 9.1.2 Lua

É o satélite que conhecemos melhor. A **Tabela 9.1** apresenta suas propriedades mais importantes.

<b>Diâmetro equatorial</b>	3.476,2 km	<b>Distância Média</b>	378.000 km
<b>Diâmetro polar</b>	3.472 km	<b>Apogeu</b>	406.000 km
<b>Massa</b>	$7,35 \times 10^{22}$ kg	<b>Perigeu</b>	363.000 km
<b>Variação de Temperatura</b>	De 100 K a 400 K	<b>Período de revolução</b>	27,322 dias

**Tabela 9.1:** Parâmetros orbitais e físicos da Lua

#### 9.1.2.1 Interior

A Lua é um corpo diferenciado, isto é, seu material está distribuído de acordo com a densidade: os materiais mais densos estão em profundidades maiores. A densidade média das rochas trazidas pelos astronautas da missão *Apollo* ( $3 \text{ g/cm}^3$ ) é muito próxima da densidade média da própria Lua ( $3,3 \text{ g/cm}^3$ ). Isto nos permite concluir que nosso satélite não deve possuir um núcleo metálico maciço. A deficiência de ferro na Lua corrobora esta conclusão.

Estruturalmente, a Lua pode ser dividida em três camadas básicas:

- a.** uma crosta assimétrica com espessura de 60 km no hemisfério voltado para a Terra, e de 100 km no hemisfério oposto;
- b.** um manto com 935 km de espessura;
- c.** um núcleo, possivelmente sólido, com 738 km de raio.

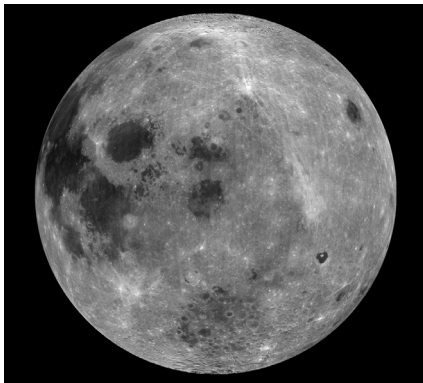
Sismômetros deixados na Lua durante as missões americanas Apollo revelaram dois tipos de eventos. O mais frequente acontece quando a Lua está no apogeu (mais afastada da Terra) ou no perigeu (mais próxima da Terra), portanto, decorrente de efeito de maré. O outro provém de camadas mais profundas e pode estar relacionado com o impacto de meteoroides.

### 9.1.2.2 Superfície

A Lua apresenta, basicamente, dois tipos de terreno:

- a. **mares:** regiões planas, baixas, escuras e de composição basáltica. Eles se formaram de um processo duplo, onde impactos violentos, provocados pela queda de corpos com diâmetros acima de 30 km, geraram atividade vulcânica.
- b. **continentes:** terras altas, acidentadas, de alta refletividade (brilhantes) e marcadas por crateras de impacto (**Figura 9.1**).

Toda a superfície lunar é recoberta por uma camada relativamente espessa de poeira, chamada **regolito**, originada da pulverização das rochas pelo bombardeamento de corpos cadentes durante sua história. A variação rápida de temperatura, decorrente da inexistência de atmosfera, ajuda a trincar e pulverizar as rochas.



**Figura 9.1:** Visão rara da Lua, mostrada pela sonda americana *Lunar Reconnaissance Orbiter*. A metade esquerda é parte da face voltada para a Terra, a metade direita é parte do hemisfério invisível da Terra / Fonte: NASA, GSFC e *Arizona State University*

A análise laboratorial do material lunar comprovou que nos continentes predominam os **anortositos** (rochas ígneas formadas por **feldspatos** do tipo **plagioclásico**). Essas rochas têm no mínimo 4 bilhões de anos. Já a região dos mares é dominada por material de origem vulcânica muito comum na Terra e nos outros planetas rochosos. Suas idades oscilam entre 3,8 e 4,0 bilhões de anos.

A comparação das abundâncias do oxigênio e seus isótopos nas rochas terrestres e lunares revelam uma semelhança entre os dois corpos. Os mares são quimicamente homogêneos e diferem dos continentes porque possuem menor abundância de alumínio.

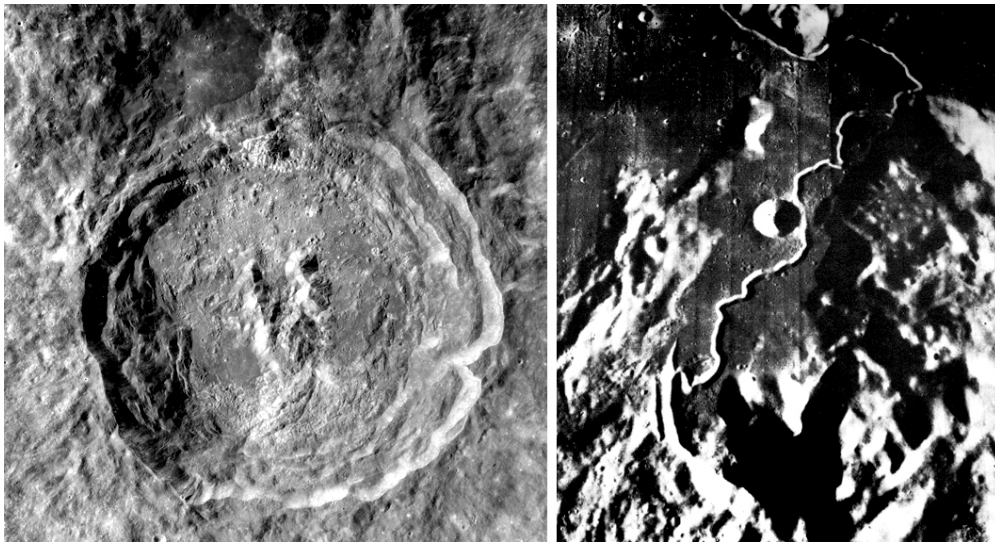
### 9.1.2.3 Crateras

A maioria das crateras lunares tem origem colisional, por isso, suas paredes são baixas e pouco inclinadas. As maiores possuem diâmetros superiores a 1.000 km, picos centrais (formados por ondas sísmicas deflagradas durante o impacto) e raios brilhantes (figuras retilíneas que emanam dos bordos na direção radial e se estendem a grandes distâncias, formadas pela ejeção de material da colisão). Um exemplo típico é a cratera Copérnico (**Figura 9.2**).

A superfície lunar apresenta ainda inúmeras caldeiras vulcânicas com escoamento de lavas, parecidas com aquelas encontradas na Terra, mas em menor escala.

#### 9.1.2.4 Idade

A idade do terreno lunar pôde ser determinada com precisão através da análise do material trazido para a Terra. Amostras colhidas nos mares revelam idade entre 3,2 e 4,0 bilhões de anos, semelhante às rochas terrestres mais antigas. Isto significa que se passaram cerca de 800 milhões de anos entre a fusão e a solidificação desse material. Já amostras de material característico dos continentes têm idades entre 3,8 e 4,0 bilhões de anos, ou seja, os continentes são mais antigos.



**Figura 9.2:** Como a maioria das crateras lunares, Copérnico (esquerda) é uma cratera originada de colisão violenta, como denunciam seus picos centrais. *Hadley Rima* (direita) é um vale sinuoso, provavelmente produzido pelo colapso de um túnel de lava. Foi nessa região que pousou a sonda Apollo 15, nos anos de 1970 / Fonte: NASA - Apollo 17, Apollo 15

### 9.1.2.5 Atmosfera

Atmosfera lunar é praticamente desprezível, sua massa não ultrapassa 10 toneladas de matéria. Os elementos mais abundantes são Na, K,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ , CO e  $\text{CO}_2$ . Esses gases provêm de degasamento interno ou de bombardeamento das rochas superficiais por micro-meteoritos, íons e elétrons oriundos do Sol. Na ausência de atmosfera, a mudança da luminosidade entre dia e noite é repentina, não há crepúsculos, e a temperatura oscila entre  $-233^\circ\text{C}$  e  $123^\circ\text{C}$ .

### 9.1.2.6 Origem

A Lua formou-se a partir de um impacto violentíssimo entre um corpo com as dimensões de Marte e a Terra, há 4 bilhões de anos. Nessa época, a Terra já estava diferenciada em núcleo metálico (essencialmente ferro (Fe) e níquel (Ni)) e manto silicático. O material que formou a Lua teria sido arrancado da crosta dos dois corpos, formando um anel em torno do nosso planeta, que, aos poucos, agregou-se para formar a Lua. Este processo colisional explica detalhes importantes, como, a crosta ser rica em silicatos e deficiente em ferro, o baixo teor de água nas rochas, a semelhança da composição isotópica do oxigênio e a abundância de ouro e platina na superfície terrestre.

## 9.1.3 Satélites de Marte

Marte tem dois satélites rochosos, pequenos e assimétricos: Fobos e Deimos<sup>1</sup>. A **Tabela 9.2** apresenta suas principais propriedades, e a **Figura 9.3** mostra partes de suas superfícies.

Vistos da superfície marciana, Deimos nasce a leste e põe-se a oeste, e Fobos transita em sentido oposto. A razão está nos períodos orbitais: Fobos dá uma volta em torno de Marte em apenas 7,7 horas, enquanto Deimos demora 30,2 horas. Como o dia marciano tem aproximadamente 24 horas, Fobos cruza o céu de Marte de oeste para leste em 11 horas, e Deimos de leste para oeste em 2,7 dias locais.

A superfície de Fobos é marcada por crateras pequenas e apenas uma cratera grande. A superfície de Deimos é mais lisa, sem grandes crateras, porém com numerosas figuras brilhantes, cuja natureza ainda não é bem conhecida.

<sup>1</sup> Na mitologia grega Fobos e Deimos, que significam respectivamente Terror e Pânico, são os dois filhos do “deus da guerra” (Ares, para os gregos; Marte, para os romanos). Eles o acompanhavam nas batalhas. Outra versão diz que eles representam os dois cavalos que puxam a carruagem guerreira do deus Marte.

Quimicamente, esses satélites são feitos de rocha menos densa que Marte, são mais escuros do que a Lua e mais parecidos com Ceres (planeta-anão). É possível que ambos sejam dois asteroides capturados por Marte. A órbita de Fobos está encolhendo e, em futuro distante, ele poderá chocar-se com a superfície marciana.

Satélite (descoberta)	Distância (1.000 km)	Período Orbital (dia)	Tamanho (km)	Massa ( $M_{\text{lua}} = 1$ )	Densidade ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
Fobos (1877)	9,4	0,32	14 × 11 × 9	$1,3 \times 10^{-7}$	1,9
Deimos (1877)	23,5	1,26	8 × 6 × 6	$2,7 \times 10^{-8}$	2,1

Tabela 9.2: Características físicas dos satélites marcianos

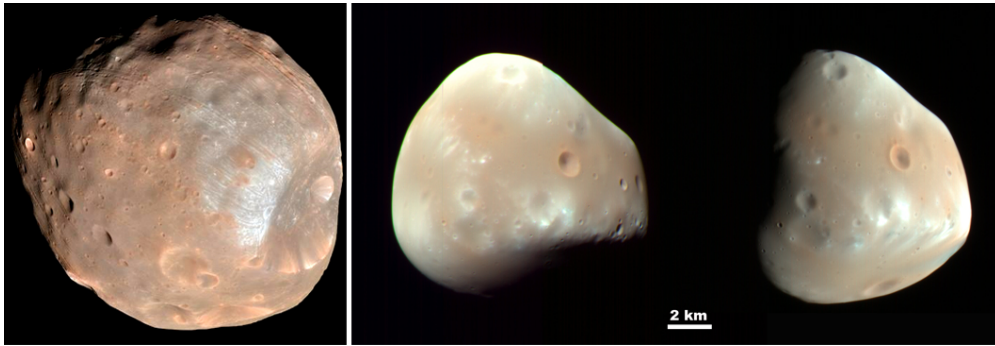


Figura 9.3: Fobos (esquerda) e Deimos (direita). Imagens fora de escala / Fonte: NASA

## 9.1.4 Satélites de Júpiter

Até o momento são conhecidos 63 satélites jovianos. Os maiores são Io, Europa, Ganimedes e Calisto, também conhecidos como satélites galileanos, pois foram descobertos por Galileu Galilei.

Io é o satélite mais próximo de Júpiter, por isso, sofre maré intensa que o deforma e dissipa energia suficiente para provocar vulcanismo. É um corpo pouco maior que a Lua, de temperatura elevada, que apresenta continuamente violentas e gigantescas erupções vulcânicas, com jatos de matéria que podem atingir 200 km de altura acima de sua superfície. Sua cor amarelada é decorrente das erupções contínuas, que incluem enxofre líquido e compostos sulfurosos.

Europa, o segundo satélite a partir de Júpiter, tem superfície recoberta de gelo e com poucas crateras. Trata-se, portanto, de superfície geologicamente jovem. Figuras como rachaduras,

enrugamentos, trincas e desalinhamento de blocos lembram aquelas encontradas nas regiões polares terrestres, típicas de oceanos com superfícies congeladas.

Ganimesdes, o terceiro satélite, é o maior satélite do Sistema Solar e maior do que Mercúrio. O relevo de sua superfície lembra o da Lua, com a diferença de que ela é de gelo não de rochas. As regiões escuras, como a conhecida por *Galileo Regio*, são fortemente marcadas por crateras de impacto, portanto, são muito antigas. As regiões claras são geologicamente mais jovens, têm poucas crateras e devem ter sido formadas por impactos violentos que provocaram afloramento de água do interior do satélite e se congelaram como planícies. Há indícios de que Ganimesdes tenha sido fundido (derretido) por colisões violentas no passado remoto. As rochas mais densas afundaram em direção ao centro.

Calisto se parece muito com Ganimesdes, porém tem maior quantidade de crateras. Sua superfície é mais antiga, provavelmente formada há cerca de 4 bilhões de anos, e a estrutura interior não é similar à de Ganimesdes.

Os demais satélites jovianos são bem menores que os galileanos, alguns com diâmetros de apenas algumas dezenas de quilômetros ou menos.

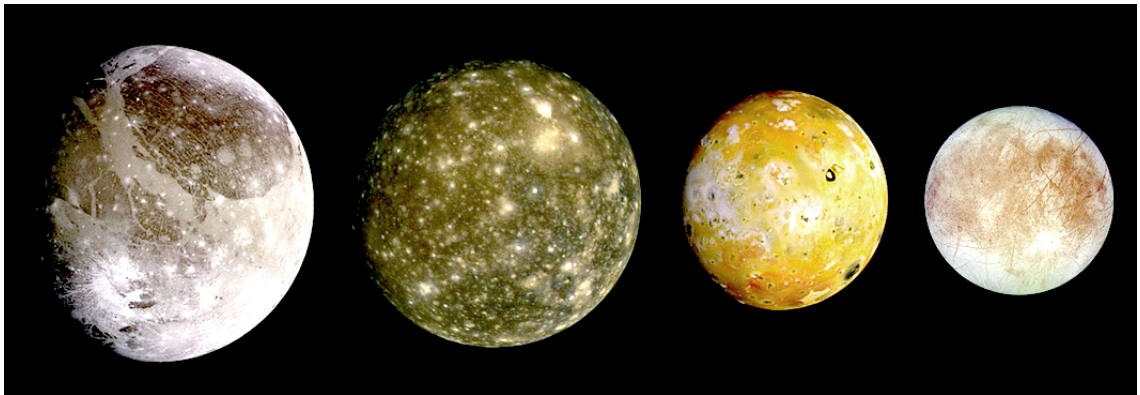


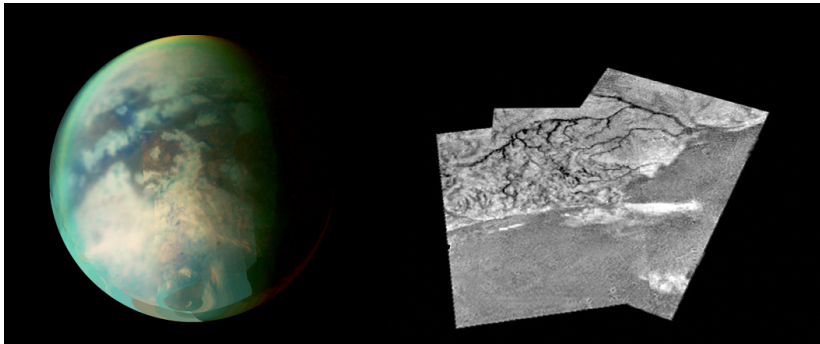
Figura 9.4: Da esquerda para a direita, o quatro satélites galileanos: Ganimele, Calisto, Io e Europa / Fonte: NASA

## 9.1.5 Satélites de Saturno

Titã, o maior satélite de Saturno, desperta grande interesse científico. Ele é um pouco maior que Mercúrio e ligeiramente menor que Ganimesdes, possui extensa atmosfera, rica em metano e etano, e superfície com relevo acidentado e lagos de metano. Durante o inverno, o metano atmosférico é parcialmente congelado nas partes elevadas, por isso, os lagos se congelam. No

verão, o metano congelado se liquefaz e escorre para as partes mais baixas na forma de riachos e rios que desembocam nos lagos, em um ciclo parecido com o da água na Terra. A atmosfera primitiva da Terra pode ter sido parecida com a de Titã.

Além de Titã, há quatro satélites que ultrapassam 1.000 km de diâmetro: Reia, Iapetus, Dione e Tétis. Os demais satélites são bem menores, alguns com apenas algumas dezenas de quilômetros.

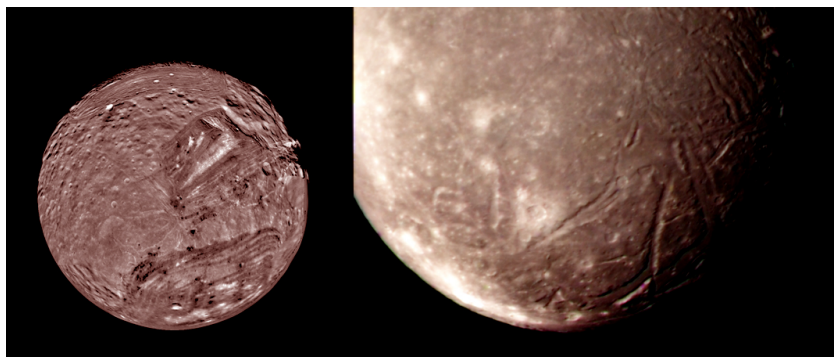


**Figura 9.5:** (esquerda) Titã visto pela sonda americana Cassini. Sua espessa atmosfera dificulta a visão da superfície. (direita) Mosaico com imagens de radar da sonda Huygens, que pousou nesse satélite, mostra uma região montanhosa com canais, afluentes e lago congelado / Fonte: NASA, JPL, ESA e University of Arizona

### 9.1.6 Satélites de Urano

Urano tem apenas quatro satélites grandes: Titânia, Oberão, Umbriel e Ariel, em ordem decrescente de tamanho. Aparência, estrutura e história de Titânia e Oberão lembram as de Reia, satélite de Saturno. Umbriel é o corpo mais escuro do Sistema Solar, mas apresenta uma atípica região esbranquiçada na face mais voltada para o Sol. Ariel, que tem quase o mesmo tamanho, apresenta superfície bem mais clara, com sinais de atividade geológica antiga.

Os demais satélites são muito menores.

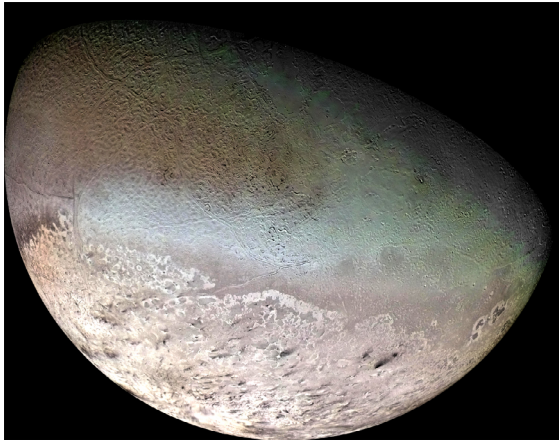


**Figura 9.6:** Miranda (esquerda) é o menor e o mais interno dos cinco grandes satélites de Urano. Sua superfície congelada é marcada por figuras complexas originadas por atividade geológica. Ariel (direita), quarto maior satélite, apresenta terreno marcado por crateras, falhas e escarpas, também produto de atividade geológica / Fonte: Sondas *Voyagers*, NASA/JPL



## 9.1.4 Satélites de Netuno

O planeta mais distante tem apenas um satélite de grandes proporções: Tritão, pouco maior que Plutão. Os demais satélites netunianos são bem menores. Tritão tem variedade de terrenos, de penhascos profundos a planícies em lagos congelados, provavelmente de água. A temperatura em sua superfície é muito baixa,  $-236^{\circ}\text{C}$ , e ele possui uma atmosfera muito tênue de nitrogênio.



**Figura 9.7:** Região polar sul de Tritão. A superfície é coberta por gás nitrogênio congelado misturado com metano, dióxido de carbono e monóxido de carbono. Manchas claras e escuras são materiais ainda desconhecidos, depositados por ventos. A temperatura na superfície atinge  $-275^{\circ}\text{C}$  /  
Fonte: *Voyager 2*, NASA/JPL/USGS

Nessa temperatura, o gelo adquire resistência equivalente a de materiais metálicos. Na região polar sul há regiões cobertas por neve de nitrogênio. A sonda *Voyager 2* mostrou jatos de nitrogênio líquido, semelhantes aos gêiseres terrestres. Provavelmente, eles são as fontes que mantêm a atmosfera de Tritão.

Com cerca de 470 km de diâmetro, o satélite Miranda tem, provavelmente, a superfície mais bizarra do Sistema Solar. Ela apresenta terrenos distintos, com ranhuras, fissuras, sulcos etc. que demonstram um passado violento, possivelmente de colisões com outros corpos.

## 9.2 Asteroides e Fragmentos Rochosos (Meteoroides)

Asteroide é palavra de origem grega que significa “semelhante à estrela”. Visto de longe, um asteroide se parece com um ponto luminoso. Qualquer objeto pequeno ou muito distante terá tal aparência. Neste livro, o termo asteroide será aplicado aos corpos menores de composição química rochosa (ver **Tabela 9.3**).

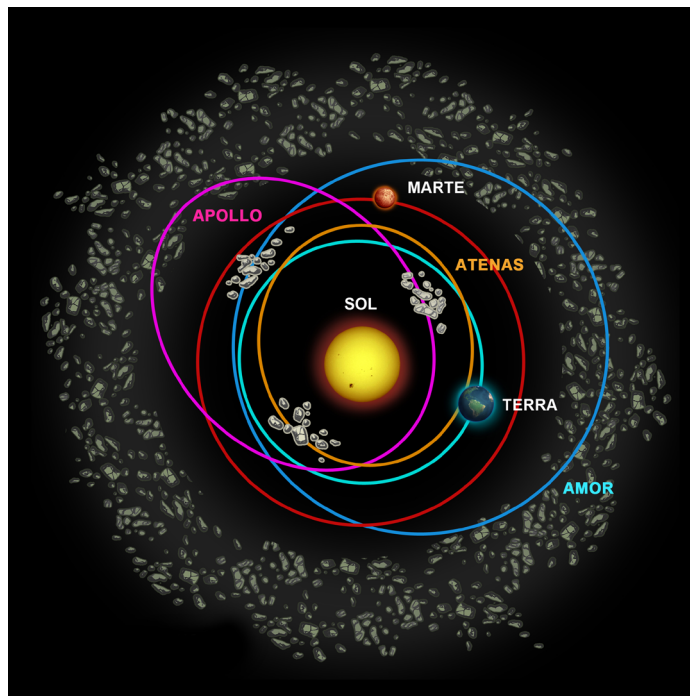
Os asteroides são objetos rochosos, relativamente pequenos, com formas e tamanhos diversos. Os maiores são aproximadamente esféricos. A maior parte deles está concentrada entre Marte e Júpiter, no **cinturão asteroidal**, ou **cinturão principal**, orbitando o Sol em trajetórias quase circulares. Mas há asteroides com órbitas bem elípticas, alguns cruzando a órbita da Terra.

Os asteroides foram descobertos apenas no século XIX. No primeiro dia do ano de 1801, o astrônomo italiano Giuseppe Piazzi descobriu um objeto novo que se movimentava com maior rapidez que os planetas. Ele foi batizado como Ceres, hoje classificado como planeta-anão. Sua órbita estava entre as órbitas de Marte e Júpiter. Nos anos seguintes, foram descobertos Pallas, Juno e Vesta, todos nessa região. Os asteroides maiores receberam nomes próprios, mas a grande maioria é identificada por sigla.

### 9.2.1 Cinturão Asteroidal (ou Principal)

A **Tabela 9.3** apresenta algumas características físicas e orbitais dos principais asteroides do cinturão. A **Figura 9.8** ilustra a região principal dos asteroides, entre 2 e 4 UA.

O cinturão não é preenchido uniformemente, existem regiões praticamente desprovidas de asteroides. Isto ocorre por conta da influência gravitacional de Júpiter, que altera as órbitas dos asteroides que estejam nessas regiões. A massa total dos asteroides do cinturão é da ordem de um milésimo da massa da Terra.



**Figura 9.8:** Órbitas típicas dos asteroides do Cinturão Principal e dos grupos Apollo, Amor e Atenas (ESA) / Fonte: Cepa

## 9.2.2 Grupos e Famílias de asteroides

Os asteroides podem ser agrupados em função das características de suas órbitas, sem que mantenham necessariamente relação entre si. Outros, no entanto, apresentam órbitas tão similares que podem ter uma origem comum, por exemplo, a fragmentação de corpos maiores decorrentes de colisão. Neste caso, podemos reuni-los em famílias.

Existem asteroides que circulam o Sol na região interna da órbita da Terra, ou seja, seus afélios jamais ultrapassam 1 UA. Alguns deles cruzam as órbitas de Mercúrio e/ou de Vênus. Outro grupo de asteroides tem periélios menores que 1 UA., ou sejam, eles cruzam a órbita da Terra. Os grupos **Atenas** e **Apollo** são exemplos. Os do grupo Atenas têm afélios da ordem de 1,2 UA, já as distâncias afélicas do grupo Apollo são quase o dobro. Os asteroides que se aproximam da Terra são também conhecidos como Asteroides Próximos da Terra (ou pela sigla NEA - *Near Earth Asteroids*). Os asteroides do grupo **Amor** possuem distâncias periélicas entre 1,1 e 1,3 UA, ou seja, entre Terra e Marte.

Alguns destes asteroides formam famílias. As maiores contêm centenas de asteroides, enquanto as famílias menores têm apenas alguns membros. Conhecemos cerca de duas a três dezenas de famílias, a maioria no cinturão asteroidal. As famílias *Pallas* (associada ao asteroide *2 Pallas*), *Hungaria* (associada ao asteroide *434 Hungaria*) e *Phocaea* (associada ao asteroide *25 Phocaea*) são alguns exemplos.

Os **Troianos** são asteroides que giram em torno do Sol na mesma órbita de Júpiter, portanto com o mesmo período do planeta. Na realidade eles não se espalham pela órbita de Júpiter. Eles se concentram em duas regiões específicas e equidistantes do planeta,  $60^\circ$  à frente e  $60^\circ$  atrás. Esses locais são conhecidos como **pontos de Lagrange  $L_4$  e  $L_5$** , em homenagem ao matemático Joseph-Louis de Lagrange que estudou a interação gravitacional entre três corpos, no caso asteroide, Júpiter e Sol. Esses pontos formam o ápice de dois triângulos equiláteros que têm os três astros como vértices.

Asteroide (descoberta)	Diâmetro <sup>1</sup> (km)	Torção (horas)	Excentricidade	Albedo	Tipo <sup>2</sup>
Pallas (1802)	583	7,9	0,23	0,09	M
Juno (1804)	249	7,2	0,26	0,16	S
Vesta (1807)	555	5,3	0,09	0,26	S
Astraea (1845)	116	16,8	0,19	0,13	S
Hebe (1847)	206	7,3	0,20	0,16	S
Iris (1847)	222	7,1	0,23	0,2	S
Elora (1847)	160	13,6	0,16	0,13	S
Metis (1848)	168	5,1	0,12	0,05	S
Higiea (1849)	443	18	0,12	0,12	C
Eros (1898)	20	5,3	0,22	0,18	S
Aquiles (1906)	70		0,15		
Hektor (1907)	230	6,9	0,03	0,03	C
Hidalgo (1920)	30	10,1	0,66		M
Amor (1932)	57		0,43		
Icarus (1949)	2	2,3	0,83		
Apollo (1932)	2,5		0,56		
Chiron (1977)	320		0,38		

(1) Por serem pequenos, nem sempre os asteroides são esféricos; estes valores são os que representam melhor seus volumes. (2) Ver Tabela 9.4.

Tabela 9.3: Características físicas e orbitais dos principais asteroides (H.Karttunen et al., p. 490, 1995)

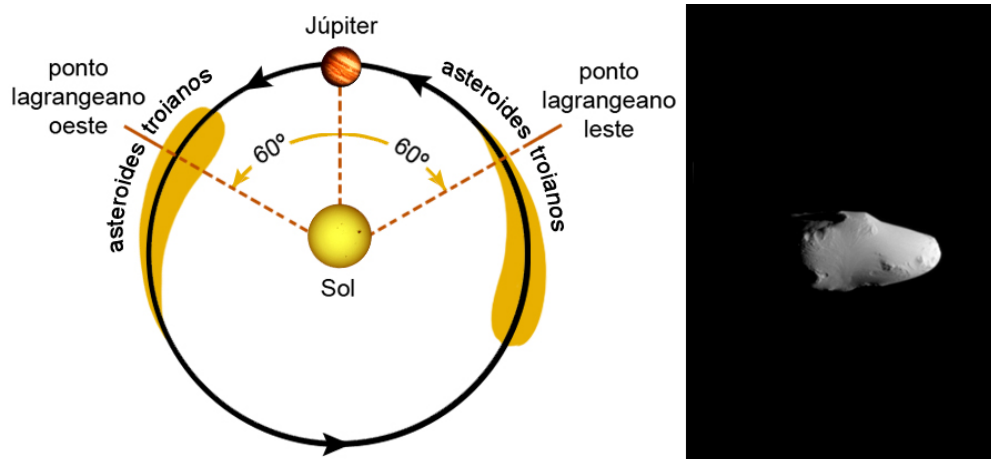


Figura 9.9: (esquerda) os asteroides troianos de Júpiter circulam na mesma órbita de Júpiter e se agrupam nas proximidades dos dois pontos lagrangeanos, 60° à frente e atrás do planeta. Calipso (direita) é um dos dois satélites que circulam na mesma órbita de Tétis (satélite de Saturno) / Fonte: Cepa ; NASA, JPL e Space Science Institute

### 9.2.3 Composição química e origem

Os asteroides do cinturão principal apresentam diferenças de composição química, que guardam certa relação com a posição orbital. Os mais próximos de Marte (30% do total), conhecidos por **tipo S**, são mais claros e formados basicamente de uma mistura de rocha (silicatos) e ferro, muito parecidos com os meteoritos **ferropétreos**. Já os asteroides mais próximos de Júpiter (60% do total), conhecidos por **tipo C**, são mais escuros e têm composição química semelhante à dos meteoritos **condritos carbonáceos**. Os demais asteroides, conhecidos por **tipo M**, são constituídos basicamente de uma liga metálica de ferro e níquel, semelhantes aos meteoritos **sideritos**.

A origem dos asteroides é um assunto ainda em discussão. A hipótese mais aceita é que eles sejam fragmentos (planetésimos) que, na época de formação do Sistema Solar, não se agregaram aos planetas por influência gravitacional de Júpiter. Colisões mútuas posteriores fragmentaram os objetos maiores dessa região, aumentando a população dos asteroides. Asteroides do tipo metálico (liga de ferro e níquel) só podem ter origem no núcleo de corpos grandes e diferenciados que se fragmentou por colisão.

Tipo	C	M	S
Abundância	60%	≤ 10%	≈ 30%
Composição predominante	C + Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Metais	Silicatos
Albedo	< 5%	≈ 10%	≈ 15%
Cor	Escuros	Intermediário	Claros
Posição	Cinturão externo (próximo a Júpiter)	Cinturão intermediário	Cinturão interno (próximo de Marte)

Tabela 9.4: Características (valores médios) dos tipos básicos de asteroides do cinturão.



Figura 9.10: Asteroide Ida (54 × 24 × 15 km) e seu satélite Dáctilo (1,5 km), fotografados pela sonda americana Galileu, em 1993. Características (valores médios) dos asteroides do cinturão. O asteroide Itokawa (direita), com cerca de 500 m em seu lado maior, assemelha-se a um aglomerado de rochas espaciais / Fonte: NASA, JPL e USGS ; JAXA

## 9.3 Corpos Transnetunianos

O limite do Sistema Solar está bem mais adiante de Netuno, no mínimo a 0,5 a.l. (cerca de 31.620 U.A.), no máximo a 1,6 a.l.. A estrela mais próxima do Sol está a 4,3 a.l.. Ainda não sabemos com exatidão o que contém essa região imensa, mas é muito provável que ela seja preenchida por corpos de dimensões subplanetárias, de composição química mista (gases e rochas) e órbitas muito alongadas (elipses de alta excentricidade).

A importância dos objetos dessa região transnetuniana repousa nas suas características. Por estarem em região muito fria, distante do Sol, preservam a composição química primitiva que deu origem ao Sistema Solar. Eles formam um estofó de matéria que não foi agregada aos corpos maiores, por isso, podem fornecer informações inéditas sobre a história e a evolução do Sistema Solar. Suas órbitas, por exemplo, podem nos ajudar a compreender como as órbitas dos planetas gigantes evoluíram desde a formação.

### 9.3.1 Cinturão de Edgeworth-Kuiper

A primeira pessoa a postular a existência de uma população de corpos pequenos adiante de Netuno foi Frederick Leonard, em 1930. Treze anos mais tarde, Kenneth Edgeworth sugeriu a concentração desses objetos em um cinturão, semelhante ao dos asteroides entre Marte e Júpiter. Estudando os cometas de curto período, Gerard Kuiper concluiu em 1951 que eles provinham dessa região transnetuniana, mais especificamente entre 30 e 50 UA. Essa região ficou conhecida como Cinturão de Edgeworth-Kuiper (**Figura 9.14**).

A constatação visual desse cinturão ocorreu em 1992, com a descoberta de um objeto de 160 km de diâmetro, distante 43,7 UA do Sol e identificado como 1992 QB1. Desde então, outros corpos foram descobertos naquela região, e classificados de acordo com as características orbitais. Plutão é o mais famoso deles. Tritão pode ter pertencido a esta região antes de se tornar satélite de Netuno. Os objetos mais conhecidos dessa região são os três planetas anões Eris (maior que Plutão), Makemake, Haumea, além dos outros candidatos como Quaoar, Ixion e Varuna.

Atualmente, há evidências de que o cinturão de Edgeworth-Kuiper estenda-se até 100 UA. Estima-se que nessa região haja cerca de 100.000 corpos com diâmetros maiores que 100 km e algo como 1 bilhão de objetos com diâmetros entre 100 e 10 km.

Uma definição mais moderna e abrangente para os possíveis e diferentes objetos que ocupam essa região distante são Objetos Transnetunianos (sigla TNO, em inglês). Quimicamente, esses corpos são compostos (gases congelados e rocha), diferentemente dos asteroides (rochosos). Mesmo assim, eles têm diferenças aparentes: alguns são mais brilhantes que outros, e as cores variam entre azul-acinzentado e vermelho bem escuro. Isto é consequência das diferenças em composição química de suas superfícies. As evidências indicam a presença de água congelada, carbono amorfo (estrutura que não têm ordenação espacial, ao contrário do carbono cristalino), silicatos, nitrogênio, metano, etano, metanol, dióxido de carbono, macromoléculas orgânicas e outras espécies.

### 9.3.2 Cometas

Os cometas são os astros que, certamente, mais fascinaram o ser humano. Sêneca (4 a.C. – 65 d.C.), em seu **Livro VII de Naturales Quaestiones**, exemplifica muito bem este aspecto quando diz:

Não há mortal tão apático, tão obtuso, tão voltado para a terra, que não se aprime e se oriente, com todas as forças do pensamento, para as coisas divinas, sobretudo quando algum fenômeno insólito aparece nos céus...

Quando aparecem esses corpos (os cometas) de chama, com forma rara e insólita, todos querem ver como eles são, esquecem-se de tudo para se indagar sobre a novidade. Não se sabe se deve admirar ou temer, pois, nunca falta quem se aproveite para semear o medo prognosticando coisas terríveis. (*Apud* MATSUURA, 1985, p.9)

Talvez o papel mais marcante dos cometas na vida do ser humano seja a possibilidade de eles serem as principais fontes de compostos orgânicos e água. Há evidências de que os cometas tiveram papel preponderante na formação da atmosfera atual e dos oceanos, bombardeando a Terra há cerca de 4 bilhões de anos.

Fisicamente, cometas são corpos de massa pequena, composta essencialmente, de gases congelados, como água (80%), monóxido de carbono (10%), dióxido de carbono (3,5%), compostos orgânicos ricos em carbono (alguns %), CHONs (grãos ricos em C, H, O, e N, diferentes da poeira terrestre rica em Si, O, Fe, e outros metais) e grãos de silicatos. Esta estrutura forma o **núcleo** do cometa, com tamanho inferior a dezenas de quilômetros e massa típica entre 100 e 1.000 bilhões de toneladas (**Figura 9.12**).

Ao se aproximar do Sol, a temperatura superficial desse núcleo aumenta e o material volátil é sublimado, isto é, passa da fase sólida diretamente para a fase gasosa. O gás expelido na forma

de jato arrasta os grãos impregnados nessa massa congelada formando a **coma**, um invólucro aproximadamente esférico de 100.000 km de diâmetro, que envolve o núcleo e as **caudas**. O núcleo e a coma formam a cabeça do cometa.

O gás eletricamente neutro pode tornar-se carregado através da ionização provocada por fótons ultravioleta de origem solar. Como os íons são suscetíveis ao campo magnético carregado pelo vento solar, são acelerados e arrastados na direção de expansão do vento solar, formando uma cauda estreita e linear de gás ionizado, chamada cauda **Tipo I**. A cauda ionizada é predominantemente azulada.



**Figura 9.11:** As caudas dos cometas tornam-se mais evidentes à medida que o cometa se aproxima do Sol. Elas sempre apontam para a direção oposta à do Sol / Fonte:Cepa





**Figura 9.12:** (esquerda) Cometa Hale-Bopp (C/1995 O1). (direita) Núcleo do cometa Tempel 1 (9P), visto pela sonda americana *Deep Impact* / Fonte: Cepa, baseado em A. Dimai & D. Ghirardo, Col Druscie Obs., *Associazione Astronomica Cortina*; NASA

O material restante, composto de gás neutro e poeira, forma a cauda **Tipo II**, mais larga e mais curvada que a cauda ionizada. Os grãos de poeira são arrastados pela luz solar, porém com menos violência que no caso da cauda Tipo I, mantendo o formato curvo. As caudas Tipos I e II podem atingir comprimentos de até 1 UA e nem sempre estão presentes simultaneamente.

Normalmente o cometa fica envolto em um envelope imenso de hidrogênio, produzido pela quebra da molécula de água pela luz solar ultravioleta (UV). Este processo é denominado fotodissociação:



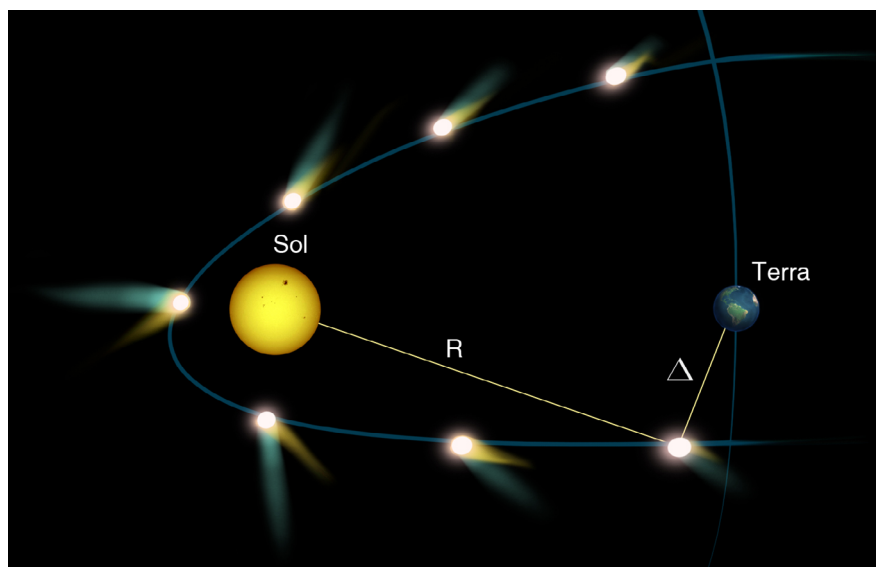
A água é o componente majoritário de gelo cometário, também formado por hidratos de várias substâncias, tais como,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e outros. Quando está distante do Sol, o brilho de um cometa provém da reflexão da luz solar pela matéria da coma e da cauda. Ao se aproximar do Sol, a cerca de 1 UA, as moléculas de gás passam a emitir luz por fluorescência (o gás é excitado por luz ultravioleta e, ao voltar a seu estado natural, libera o excesso de energia na forma de luz). Isto ocorre principalmente com carbono ( $\text{C}_2$ ), cianogênio (CN), oxigênio ( $\text{O}_2$ ), hidroxila (OH) e hidretos de nitrogênio (NH e  $\text{NH}_2$ ). Nas distâncias heliocêntricas ainda menores surgem linhas de emissão do silício (Si), cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K) e níquel (Ni).

Tamanho e brilho aparentes dependem essencialmente das distâncias. Quanto mais próximo do Sol estiver o cometa, maiores serão o brilho e o tamanho. Quanto mais próximos nós estivermos do cometa, mais brilhante e maior ele nos parecerá. Portanto, brilho e tamanho

aparentes dependerão dessas duas condições. Esta dependência de brilho e tamanho com a distância pode ser expressa por uma relação simples:

$$B = \frac{C}{R^n \Delta^2}$$

onde,  $C$  é uma constante;  $R$  e  $\Delta$ , respectivamente, as distâncias heliocêntrica e geocêntrica do cometa; e  $n$ , o índice fotométrico. O parâmetro mais crítico nesta expressão é  $n$ . Ele varia com a distância heliocêntrica (geralmente  $n$  aumenta quando a distância heliocêntrica diminui), não é necessariamente igual nas sucessivas aparições do cometa e difere entre cometas. Valores razoáveis para  $n$  podem estar entre 1 e 6.



**Figura 9.13:** O brilho de um cometa depende simultaneamente da distância dele ao Sol ( $R$ ) e da distância dele à Terra ( $\Delta$ ) / Fonte: Cepa

A longevidade de um cometa depende essencialmente de quão perto ele passar do Sol e da frequência com que faz isso. Quanto menor a órbita do cometa, mais tempo ele estará exposto ao aquecimento solar e mais rapidamente perderá sua componente volátil. O que restar dele será um bloco rochoso sem coma e cauda, parecido com um asteroide. Portanto, a longevidade de um cometa depende da sua órbita.

Considerando a diversidade de órbitas, podemos ordenar os cometas segundo seus períodos. Os períodos podem ser curtos (até algumas dezenas de anos), médios (de dezenas a algumas centenas de anos) ou longos (de várias centenas a milhões de anos). Cometas de períodos muito

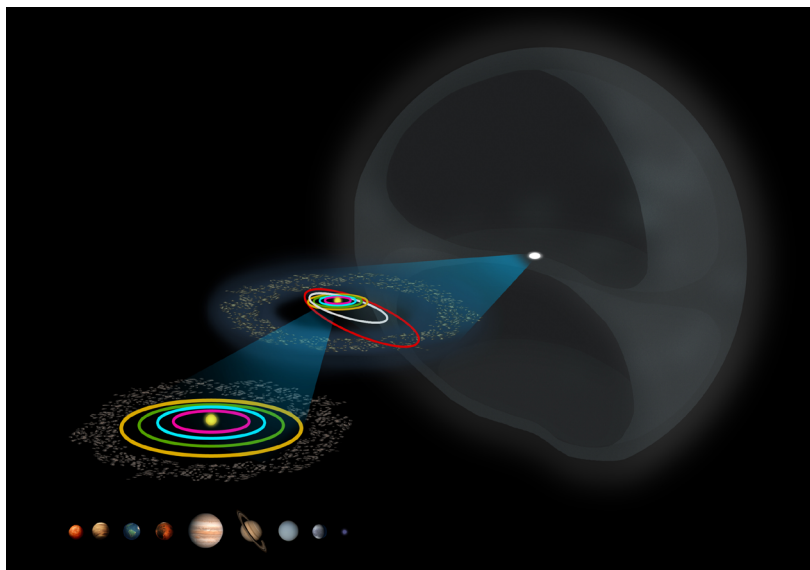
longos podem ser classificados como novos porque não há registros de passagens anteriores. Na realidade, esses cometas estão circulando o Sol desde que o Sistema Solar foi formado.

Os cometas periódicos têm o prefixo “P/” antes do nome. O cometa 1P/Halley tem esta designação formal porque foi o primeiro a ser reconhecido como periódico. Sua órbita foi calculada pelo astrônomo inglês Edmund Halley em 1705, através da teoria de gravitação de Isaac Newton. Este cometa havia sido observado em 1472, pelo astrônomo alemão Johann Müller Regiomontano, mas o primeiro registro parece datar o ano 239 a.C.

Boa parte dos cometas periódicos pertence a famílias associadas aos planetas gigantes (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). Cometas da família de Júpiter, por exemplo, têm períodos menores que 20 anos. O cometa 1P/Halley pertence a uma família que leva seu nome Halley, cujos períodos vão de 20 a 200 anos. A depender da aproximação com os planetas gigantes, os cometas podem ter suas órbitas alteradas, adquirindo períodos menores ou maiores.

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 1 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.



**Figura 9.14:** O Sistema Solar. No primeiro plano estão as órbitas dos planetas rochosos e o Cinturão Principal de asteroides (além de Marte). No segundo plano, os planetas gasosos e o Cinturão de Edgeworth-Kuiper (CEK). Plutão tem órbita inclinada (em vermelho) e localizada entre os limites interno e externo do cinturão CEK / Fonte: Cepa, baseado em Don Foley, *Discover*, Novembro de 2004

## 9.4 Anéis Planetários e Meteoroides

### 9.4.1 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 à mesma posição relativa. Isto impede variações orbitais que possam aproximar muito os planetas.

Outras ressonâncias, no entanto, geram instabilidades nas órbitas dos corpos e criam lacunas. A Divisão de Cassini (**Tabela 9.15**) 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 ( $Fg \propto 1/d^2$ ), a face do satélite voltada diretamente para o planeta é mais fortemente atraída que a face oposta. A diferença entre essas forças (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:

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

sendo  $R$  o raio do planeta,  $\rho_M$  e  $\rho_m$  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 10 a 20 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 de 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 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 Maxwell 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 gêiseres localizados nas proximidades do seu polo sul;
- d. pequeninos satélites orbitam Saturno dentro de determinados anéis.

	Bordo interno	Bordo externo	Largura
<b>Anel D</b>	<b>66.970 km</b>	<b>74.490 km</b>	<b>7.500 km</b>
<b>Anel C</b>	<b>74.490 km</b>	<b>91.980 km</b>	<b>17.500 km</b>
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
<b>Anel B</b>	<b>91.980 km</b>	<b>117.580 km</b>	<b>25.500 km</b>
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
Lacuna Jeffreys	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

	Bordo interno	Bordo externo	Largura
<b>Anel A</b>	<b>122.050 km</b>	<b>136.770 km</b>	<b>14.600 km</b>
Lacuna Encke	133.570 km		325 km
Lacuna Keeler	136.530 km		35 km
Divisão Roche	136.770 km	139.380 km	2600 km
<b>Anel F</b>	<b>140.224 km</b>		<b>30-500 km</b>
<b>Anel G</b>	<b>166.000 km</b>	<b>174.000 km</b>	<b>8.000 km</b>
<b>Anel E</b>	<b>180.000 km</b>	<b>480.000 km</b>	<b>300.000 km</b>

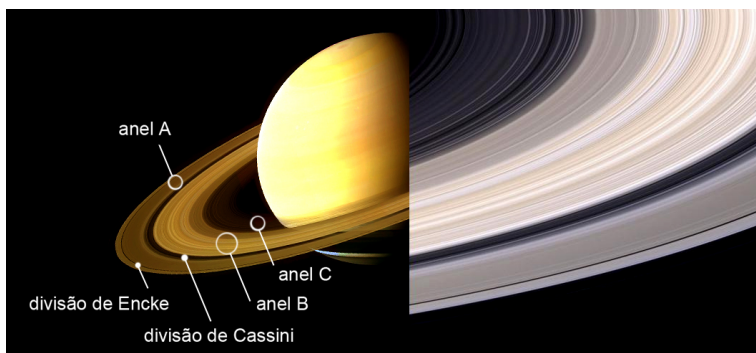
**Tabela 9.5:** Sistema de anéis de Saturno (<http://planetarynames.wr.usgs.gov/append8.html>). Lacuna é falha menor que Divisão.

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.



**Figura 9.15:** Sistema de anéis de Saturno. Vistos de perto (sonda Cassini) os anéis são compostos por infinitos anéis finos e as lacunas não são completamente vazias / Fonte: NASA e JPL

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

Embora se suponha 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/δ (38.000 km de raio), 6, 5, 4, α, β, ε, γ, δ, λ, ε, μ (98.000 km de raio) e ν. Eles são tão escuros como carvão (refletem apenas 2% da luz incidente) e, 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, LeVerrier, 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).



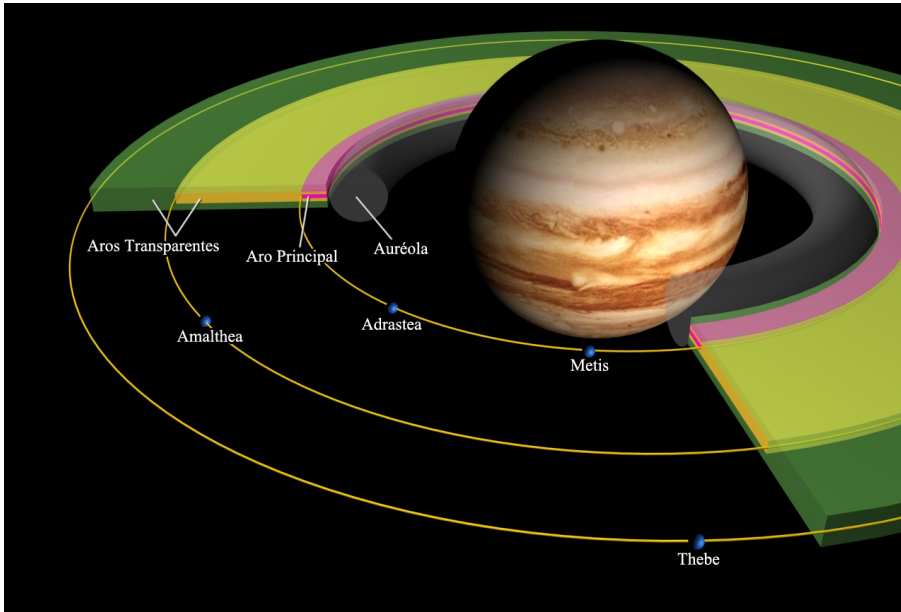
Provavelmente, anéis planetários são criados quando satélites pequenos colidem entre si ou são desintegrados ao se aproximarem demais do planeta. Os fragmentos desses satélites passam a orbitar os planetas, cada qual com sua órbita. Colisões posteriores repetidas acabam pulverizando ainda mais os fragmentos,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

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

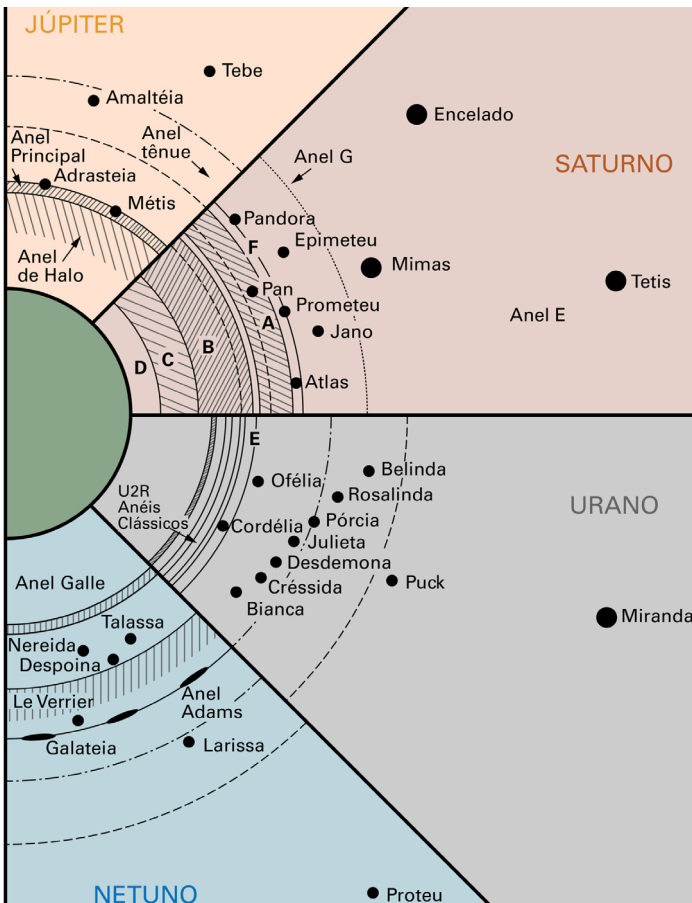
\*Originalmente identificados com anel único.

**Tabela 9.6:** Anéis de Urano e Netuno (*Journey through the Galaxy*) /

Fonte: adaptado de <http://filer.case.edu/~sjr16/advanced/index.html>



**Figura 9.16:** Representação gráfica dos anéis de Júpiter. As órbitas dos satélites mais internos estão representadas por linha contínua / Fonte: Cepa



**Figura 9.17:** Esquema comparativo dos sistemas de anéis dos planetas gasosos. Linhas sólidas indicam anéis e linhas semitracejadas os limites de Roche de cada caso, considerando uma densidade única de  $1 \text{ g/cm}^3$ . Os satélites dessas regiões estão indicados pelos nomes. A linha tracejada indica posição de rotação sincronizada / Fonte: Cepa, baseado em: *National Academy of Sciences, An Integrated Strategy for the Planetary sciences, 1995–2010, Figura 4.5*

## 9.4.2 Meteoroides (Fragmentos Rochosos)

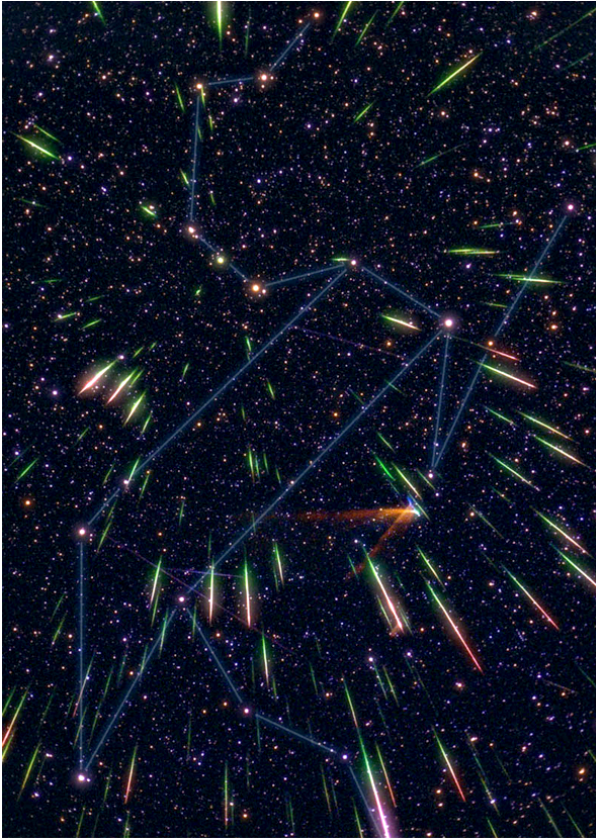
Pelo espaço interplanetário vagam fragmentos rochosos, com tamanhos entre 0,1 mm e 10 m, genericamente denominados **meteoroides**. Um objeto maior que 10 m é considerado asteroide, e menor que 0,1 mm é considerado grão de poeira (ou micrometeoróide).

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

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 9.7:** Chuvas de meteoros mais conhecidas

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 10 h 30 min do dia 12/02/1947, na Sibéria, perto da cadeia montanhosa Sikhote-Alin (**Figura 9.20**). No local da queda foram encontradas várias crateras, com diâmetros entre 1 m e 30 m, e fragmentos constituídos basicamente de ferro.



**Figura 9.18:** Chuva de meteoros Leônidas. A imagem foi obtida em 2001, durante o máximo de incidência. O radiante (ponto do céu de onde parece surgir a chuva) está na constelação do Leão/Tago, Shusaku / Fonte: [http://tagoshu.cool.ne.jp/astro\\_photos/phenomena/leonids2001-e.html](http://tagoshu.cool.ne.jp/astro_photos/phenomena/leonids2001-e.html)

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 9.8). Os meteoritos **metálicos**, também denominados **ferrosos** ou **sideritos**, são constituídos de uma liga de ferro (de 90 a 95%) e níquel (de 5 a 10%). A aparência externa destes meteoritos lembra restos de ferro siderúrgico,

Os meteoroides que sobrevivem à passagem pela atmosfera, atingem o solo e passam a ser chamados **meteoritos**. Geralmente, a queda de um meteoróide grande produz uma cratera imensa (**Figura 9.19**(centro)), mas podem ocorrer casos de desintegração explosiva antes de o meteoróide atingir o solo. Este foi o caso de Tunguska, região inóspita da Sibéria, onde toda uma região florestal foi devastada na manhã de 30/6/1908. 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

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. Eles são fortemente atraídos por imã. Após um tratamento adequado, eles apresentam estruturas retilíneas (figuras de *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 9.19**).

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 9.19**). Os **condritos** se diferenciam das rochas terrestres pela presença de **côndrulos**, pequenas esferas de rochas fundidas a altas temperaturas e solidificadas (**Figura 9.20**). 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 200 K. 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 aos 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.

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

Tabela 9.8: Classificação básica dos meteoritos em grupos e subgrupos



Figura 9.19: Os sideritos se parecem com ferro (esquerda). Meteorito Gibeon, siderito, mostrando figuras de *Widmanstätten* (centro). Meteorito rochoso (direita) / Fonte:

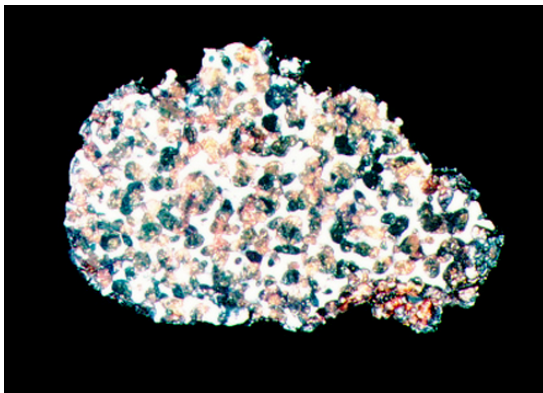


Figura 9.20: (esquerda) Siderólito, formado entre o núcleo metálico e o manto rochoso de um corpo grande. (direita) Meteorito Pétreo Condritico, originado das partes mais externas do corpo que se fragmentou / Fonte: James Holder, NASA JSC photo S94-44546 ; Cecilia Satterwhite, NASA JSC photo S94-44343.