

UNIVERSIDADE DO PORTO

FACULDADE DE ENGENHARIA

Notas orientadoras da disciplina de:
GEOLOGIA I

(Disciplina obrigatória do 1º Ano / 1º Semestre)
Licenciatura em Engenharia de Minas e Geoambiente

Eurico Pereira / Alexandre Leite / Aurora Futuro

FEUP

Engenharia de Minas e Geoambiente

Notas orientadoras da disciplina de

GEOLOGIA I

(1º Ano)

I - ASTROGEOLOGIA

1.1 - Introdução

1.2 - Sistema Solar

1.3 - Exploração Planetária

i) - Exploração Lunar

ii) - Constituição da Lua

1.4 - Acreção dos Planetas

1.5 - Crateras de Impacto

1.6 - Meteoritos

i) - Idade dos Meteoritos

ii) - Composição Química dos Meteoritos

iii) - Classificação dos Meteoritos

iv) - Origem dos Meteoritos

v) - Idade de Irradiação dos Meteoritos

1.7 - Viagens Interplanetárias

1.8 - História Comparada dos Planetas

1.9 - Estruturas Comparadas dos Planetas

1.10 - A Nebulosa Quente

Acreção homogénea e acreção heterogénea

I - ASTROGEOLOGIA

1.1 - Introdução

O alvorecer desta nova ciência é assinalado pela data de *19 de Julho de 1969*, no momento em que o astronauta *Neil Armstrong* dos U.S.A. pisa solo lunar e ensaia o primeiro e titubeante movimento. Ao pronunciar as célebres palavras:- "*é um pequeno passo para o homem, mas, um passo gigantesco para a humanidade*", não previa estar a dar o tal passo gigantesco a caminho da exploração espacial. A partir daqui, tem início um período de exploração planetária, em que a recolha científica, daí resultante, vai renovar totalmente o conhecimento do Sistema Solar.

A exploração espacial já havia sido iniciada por *Galileu* no ano de 1609. Com um telescópio rudimentar, comparável a um brinquedo actual de criança, iniciou a investigação dos mares e montanhas da Lua. O ciclo de exploração óptica dos astros fecha-se em 1957 com a colocação em órbita, à volta da Terra, do primeiro satélite artificial - o *Sputnik* - construído na então U.R.S.S.. Cria-se, a partir desta data, uma especialidade científica que passa a designar-se *Planetologia*, isto é, o estudo comparativo da Lua e outros Planetas, relativamente, à Terra.

Quando, porém, *J. F. Kennedy*, respondendo ao desafio soviético, aponta à NASA o objectivo prioritário do desembarque na Lua, inicia, simultaneamente, a reformulação da especialidade científica recém-criada. Com efeito, após as missões *Apollo*, seguidas das missões soviéticas *Luna*, a Lua tornou-se fascinante para a comunidade científica internacional, aceleradamente mobilizada em torno do estudo das primeiras amostras ali recolhidas por ambas as missões. Assim, a Lua tornou-se para esta comunidade um pequeno "planeta" de que se passa a conhecer a:

- *topografia,*
- *estrutura interna,*
- *natureza das rochas da superfície,*
- *história a partir da sua origem.*

Verifica-se que tudo é semelhante à *História Geológica da Terra*.

Deixa, assim, de ter sentido designar esta gama de conhecimentos, por *Selenologia*, tal como acontecia anteriormente à era espacial e passa a adoptar-se a designação desajustada de "*Geologia da Lua*".

Numa extrapolação infinitamente grande, a nova ciência, despontada em 1957 com o lançamento do 1º satélite Soviético, o *Sputnik*, inicia-se no âmbito restrito da investigação comparada entre a Terra e os Planetas do Sistema Solar. Rapidamente, numa apropriação de que ainda não atingimos a verdadeira dimensão, adquire âmbito universal e a pretensão de que os astros se podem reportar à dimensão e natureza física da Terra.

Astrogeologia é, pois, a ciência que estuda a natureza física externa e interna dos astros, a sua estrutura, rochas e história, comparando-as com a natureza física, estrutura, rochas e história geológica do planeta Terra.

1.2 - Sistema Solar

O Sistema Solar consta do Sol, nove Planetas, 52 Luas conhecidas, um vastíssimo número de asteróides, milhões de cometas e inumeráveis fragmentos de rochas designados meteoritos.

A interrogação imediata que se nos coloca é como se formou este harmónico conjunto. Tendência fortemente motivadora dos cientistas dedicados às Ciências Astronómicas é a elaboração de uma Teoria unificada sobre a origem de todos os sóis e planetas do Universo. Se tal tendência for bem sucedida, será possível um dia afirmar que os biliões de Sóis do Universo têm planetas idênticos à Terra e, quiçá, alguns deles possuam a sua própria biosfera.

Resumindo os conhecimentos *tradicionais*, acumulados em vários séculos de observações astronómicas e baseados em cálculos, pode fazer-se a síntese desses conhecimentos, (*Allègre, 1987*):

i) - Os planetas giram à volta do Sol em órbitas que são, é certo, elipses, mas, na prática se reduzem a círculos.

ii) - Longe de estarem orientadas em todas as direcções do espaço, estas órbitas situam-se todas num plano, definindo um verdadeiro disco. Este disco é perpendicular ao eixo de rotação do Sol.

iii) - Os movimentos dos planetas nas suas órbitas seguem ritmos imutáveis. Quando se aproximam do Sol, há uma aceleração. Quando se afastam, verifica-se o abrandamento desta aceleração.

iv) - Os períodos de revolução dos planetas dependem do seu afastamento do Sol: - quanto mais afastados estiverem, mais lentamente giram.

v) - Os movimentos dos planetas nas suas órbitas, a que chamamos *revoluções*, fazem-se todos no mesmo sentido, que é o sentido da rotação do próprio Sol. É também o mesmo sentido da *rotação* dos planetas sobre si mesmos (excepção aberta a Vénus e Urano). O eixo de rotação dos planetas é, praticamente, perpendicular ao plano da superfície elíptica coincidente com a órbita.

Estas são as *Leis da Mecânica Celeste*, definidas por *Johannes Kepler (1571-1630)*, desenvolvidas e quantificadas por *Isaac Newton (1642-1727)*. Pode adicionar-se-lhes a *Lei de Titius-Bode*, o nome dos dois astrónomos que a formularam: - "cada planeta está duas vezes mais afastado Sol que o seu vizinho mais próximo". Quanto a *Galileu (1564-1642)* contribuiu para o conhecimento do Sistema Solar através da exploração óptica dos planetas e satélites.

O Sistema Solar ocupa, assim, uma região no Universo com cerca de 12×10^9 km de diâmetro. A distância entre planetas, expressa em Unidades Astronómicas (1 A.U. equivale à distância do Sol à Terra), revela ser, a *Lei de Titius-Bode*, uma lei relativamente precisa. Conta, somente com uma excepção: - entre Marte e Júpiter, não existe um planeta único, mas, uma quantidade enorme (no mínimo 100.000) de pequenos objectos sólidos, designados *asteróides*, com órbitas situadas entre Marte e Júpiter.

SABIA?

É no Séc XVII que as primeiras sociedades científicas começam a organizar-se em moldes modernos. A Academia das Ciências de Paris é fundada em 1666; a sua equivalente Inglesa, "Royal Society", entra em actividade em Londres, em 1645. (A Academia das Ciências de Lisboa data de 1778). O Observatório de Paris é inaugurado em 1672 e o de Greenwich em 1676. Em Inglaterra o movimento científico está preparado para a eclosão da física de Newton. Em França, uma fidelidade cega a Descartes entrava o progresso. Apenas, com Voltaire, escritor e não cientista, a obra de Newton é aceite.

- Breves considerações sobre os Planetas

Debruçando-nos sobre o quadro da Fig.1.1, verificamos que os planetas formam dois grupos: -*Planetas Terrestres* (idênticos à Terra), como *Mercúrio*, *Vénus*, *Terra*, *Marte*, formados na região interna do Sistema Solar; e *Planetas Jovianos* (idênticos a *Júpiter* = *Jove*, designação Romana) como *Júpiter*, *Saturno*, *Urano* e *Neptuno*, formados na região externa do Sistema Solar. *Plutão* não é incluído nestas categorias, porquanto, o seu posicionamento no sector mais distante do Sistema Solar e o reduzido tamanho, tornam misteriosa a natureza deste planeta.

Como se verifica no quadro anexo, os *Planetas Terrestres* têm pequena dimensão, idêntica composição e são rochosos e compactos com densidade média de 5 g/cm^3 ; os *Planetas Jovianos* têm grandes dimensões, diferentes composições, densidade média de 1.5 g/cm^3 (excepto Saturno com densidade de 0.7 g/cm^3). *Asteróides e meteoritos* são também objectos densos e rochosos que se presume tenham sido formados na região interna do Sistema Solar, de igual forma e ao mesmo tempo que os *Planetas Terrestres*. A diversidade de composição dos planetas é largamente responsável pelas diferenças entre eles.

Podemos dividir em três grupos as substâncias componentes dos planetas de acordo com os respectivos pontos de fusão: - *gases*, *rochas* e *gelo*:

- *Gases* são os materiais cujo ponto de fusão se situa próximo do zero absoluto (-273°C , a mais baixa temperatura passível de ser atingida). São comuns hidrogénio e hélio.

- *Rochas* são os materiais essencialmente compostos por minerais silicatados e ferro metálico, com pontos de fusão que excedem 700°C .

- *Gelos* têm ponto de fusão intermédio e incluem amónia (NH₃), metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O).

Planet	Symbol	AU	Mean Distance from Sun		Period of Revolution	Inclination to Ecliptic	Orbital Velocity	
			Millions of miles	Millions of kilometers			mi/s	km/s
Mercury	☿	0.387	36	58	88 ^d	7° 00'	29.5	47.9
Venus	♀	0.723	67	108	225 ^d	3° 24'	21.8	35.0
Earth	♁	1.000	93	150	365.25 ^d	0° 00'	18.5	29.8
Mars	♂	1.524	142	228	687 ^d	1° 51'	14.9	24.1
Jupiter	♃	5.203	483	778	12 ^{yr}	1° 19'	8.1	13.1
Saturn	♄	9.539	886	1427	29.5 ^{yr}	2° 30'	6.0	9.6
Uranus	♅	19.180	1780	2869	84 ^{yr}	0° 46'	4.2	6.8
Neptune	♆	30.060	2790	4498	165 ^{yr}	1° 46'	3.3	5.4
Pluto	♇	39.440	3670	5900	248 ^{yr}	17° 12'	2.9	4.7

Planet	Period of Rotation	Diameter		Relative Mass (Earth = 1)	Average Density (g/cm ³)	Polar Flattening (%)	Eccentricity	Number of Known Satellites
		miles	kilometers					
Mercury	59 ^d	3015	4878	0.056	5.1	0.0	0.206	0
Venus	243 ^d	7526	12,112	0.82	5.3	0.0	0.007	0
Earth	23 ^h 56 ^m 04 ^s	7920	12,742	1.00	5.52	0.3	0.017	1
Mars	24 ^h 37 ^m 23 ^s	4216	6800	0.108	3.94	0.5	0.093	2
Jupiter	~9 ^h 50 ^m	88,700	143,000	318.000	1.34	6.5	0.048	16
Saturn	~10 ^h 25 ^m	75,000	121,000	95.200	0.70	10.5	0.056	18
Uranus	~17 ^h 20 ^m	29,000	47,000	14.600	1.55	7.0	0.047	15
Neptune	~16 ^h	28,900	45,000	17.300	1.64	2.5	0.008	8
Pluto	6.4 ^d	~1500	~2400	~0.01(?)	~1.5(?)	?	0.250	1

Fig.1.1 - Alguns dados sobre os Planetas

Os *Planetas Terrestres* são essencialmente compostos por rochas densas e materiais metálicos com menor quantidade de gases. Possuem atmosferas reduzidas, dado os planetas perderem gases da atmosfera por evaporação. A evaporação ocorre mais rapidamente nos planetas com altas temperaturas atmosféricas e baixa gravidade e, mais lentamente, para os que possuem baixas temperaturas atmosféricas e alta gravidade. Assim, uma molécula de gás pode evaporar-se de um planeta desde que atinja a designada *velocidade de escape*. Para a Terra, esta velocidade é de 11 km/s. Qualquer material, inclusive um *rocket*, carece atingir esta velocidade antes de abandonar a Terra a caminho do espaço. Por outro lado, um corpo relativamente aquecido, com baixo campo de gravidade, tal como a Lua terrestre, é incapaz de reter um gás, mesmo sendo pesado e, assim, gerar uma atmosfera. Os *Planetas Terrestres* de maiores dimensões, tais como *Terra*, *Vénus* e *Marte*, têm capacidade de reter alguns gases pesados (relativamente ao hidrogénio), mas, as suas atmosferas representam uma porção infinitamente pequena das respectivas massas.

Os *Planetas Jovianos* contêm grande percentagem de hidrogénio e hélio, com quantidades variáveis de gelos, principalmente, água, amónia e metano, que contribuem para a sua baixa densidade. Pensa-se que estes planetas possuam igualmente rochas e materiais metálicos. Estariam, porém, concentrados no núcleo. Com efeito, as luas dos planetas gasosos

mostram-se densas tal como os Planetas Terrestres. Duas luas de *Júpiter*, *Io* e *Europa*, têm densidades entre 3.2 e 3.5 g/cm³, próximas da densidade da Lua terrestre. As explorações espaciais revelaram, também, que as duas luas de baixa densidade de *Júpiter*, *Calisto* e *Ganymede*, mostram espessas calotes de gelo envolvendo pequenos núcleos rochosos, sólidos. Veremos, adiante, que esta disposição dos planetas partindo do Sol, de pequenos, rochosos e densos a menos densos, grandes e gasosos, com luas recobertas de gelo, é coerente com a presumível origem e evolução do Sistema Solar.

- Origem e evolução dos planetas

A revolução extremamente ordenada dos planetas em torno do plano equatorial do Sol, conduziu os astrónomos à conclusão de que os planetas se formaram praticamente ao mesmo tempo que o *Sol* e a partir do mesmo material primitivo. A chamada *hipótese da nebulosa* sugere que todos os corpos do Sistema solar se formaram a partir de uma nebulosa de poeiras e gases composta por cerca de 80% de hidrogénio, 15% de hélio e uma percentagem menor ($\cong$ 5 %) de todos os outros elementos pesados conhecidos. Estes elementos pesados, existentes na nebulosa mais ou menos fria, constariam principalmente de *silica*, *alumina*, *ferro* e *cálcio* - fundamentalmente, os elementos comuns constituintes das rochas, além de outros elementos familiares, onde se inclui *oxigénio*, *carbono* e *azoto*. Estudos astronómicos mostraram que estes últimos elementos estão presentes numa variedade de compostos orgânicos. Desta forma, a essência da vida existia antes do Sistema Solar.

Há cerca de 5.000 M.a. e por razões não inteiramente esclarecidas, a nebulosa, composta de fragmentos mínimos de rocha e gases, começou a contrair-se sob a sua própria influência gravítica. A contracção de massa dos materiais implica uma certa componente de movimento rotacional. À medida que a nebulosa em rotação se contrai por acção gravítica, ela gira cada vez com maior velocidade levando-a a assumir forma discóide. Dentro deste disco em rotação formam-se pequenos aglomerados de material, os *planetesimais*, ou núcleos a partir dos quais os planetas iniciam o seu desenvolvimento. Todavia, a maior concentração de material foi graviticamente arrastada para o centro do disco, originando o *Protosol*.

Quanto maior é a convergência de materiais para o núcleo do disco, mais elevada se vai tornando a temperatura da massa central. O material da nebulosa situado junto do protosol, atinge temperaturas de várias centenas de graus centígrados e encontra-se na forma de vapor. Todavia, à distância da órbita de Marte, as temperaturas prevalecem baixas. Aqui, a -200 ° C, os fragmentos de poeiras podem recobrir-se de uma película de gelo, de água ou dióxido de carbono, amónia e metano. O disco da nebulosa pode, ainda, conter quantidades apreciáveis de gases mais leves, tais como hidrogénio e hélio que não foram retidos no protosol.

Entretanto, num relativamente curto espaço de tempo, após a formação do protosol, a temperatura do núcleo da nebulosa começa a decair, propiciando a condensação dos materiais

de mais alto ponto de fusão. Ferro e níquel solidificam precocemente e, em seguida, formam-se os minerais constituintes das rochas, começando pelos de mais alto ponto de fusão (*óxidos metálicos, olivina, piroxenas, etc.*). A colisão destes fragmentos faz com que tomem forma e tamanho de objectos asteróides e, em algumas dezenas de milhões de anos, se acrecionem para formar os *Planetas Internos* que designamos por *Mercúrio, Vénus, Terra e Marte*. Devido às elevadas temperaturas e baixo campo gravítico, estes planetas não têm capacidade de acumular quantidades apreciáveis dos componentes leves da nebulosa. Estes materiais, designadamente, hidrogénio, amónia, metano e água foram expulsos da zona interna do Sistema Solar pelos ventos de partículas, muito violentos, também designados *T-Tauri* (do nome das jovens estrelas com a mesma designação e que são característicos das estrelas em formação, no caso vertente, o *Sol*).

Imediatamente após a formação dos *Planetas Terrestres*, o decaimento radioactivo de isótopos no seu interior, mais o aquecimento resultante da colisão de partículas, produziu fusão parcial do interior destes planetas. Por outro lado, a fusão deu origem à diferenciação dos materiais, em que os pesados, principalmente, ferro e níquel, decantam e os mais leves, minerais silicatados, flutuam. Durante este período de diferenciação química, os materiais gasosos foram expulsos do interior dos planetas, como acontece nos processos vulcânicos registados na *Terra*. O mais quente e segundo menor planeta, *Mercúrio*, foi incapaz de reter mesmo os gases mais pesados. *Marte*, maior e mais frio que *Mercúrio*, reteve uma fina camada de dióxido de carbono e água sob a forma de gelo. Os maiores dos *Planetas Terrestres*, *Vénus* e *Terra*, com campos gravíticos elevados, retiveram quantidades apreciáveis de gases mais pesados. Todavia, a atmosfera destes planetas é escassa, comparada com a dos quatro *Planetas Jovianos*.

Enquanto se constituíam os *Planetas Terrestres*, os *Planetas Jovianos* e o seu cortejo de satélites encontravam-se igualmente em formação. Em virtude, porém, das temperaturas muito baixas verificadas nas regiões distantes do *Sol*, o exterior dos fragmentos acretados para formar os planetas, continham elevadas percentagens de gelo - água, dióxido de carbono, amónia e metano. Por causas desconhecidas, dois destes planetas, *Júpiter* e *Saturno*, atingiram massas muito maiores que *Urano* e *Neptuno*. Comparativamente, *Júpiter* tem 318 vezes e *Saturno* 95 vezes a massa da *Terra*, enquanto *Urano* e *Neptuno* têm, respectivamente, cerca de 14 e 17 vezes a massa da *Terra*. Quando *Júpiter* e *Saturno* atingiram um certo tamanho, estimado em cerca de 10 vezes a massa da terra, o campo gravítico era suficientemente elevado para atrair e reter os materiais mais leves como hidrogénio e hélio, dispersos na nebulosa em condensação. Assim, o grande tamanho destes dois planetas é atribuído ao grande invólucro de elementos leves que forma uma camada de líquido denso sob a espessa atmosfera rica de hidrogénio. *Júpiter* e *Saturno* possuem um núcleo constituído por material rochoso e gelo e uma espessa zona envolvente composta, essencialmente, por hidrogénio e hélio, *Fig. 1.2*.

Os pequenos *Planetas Jovianos* cresceram mais lentamente e contêm, proporcionalmente, muito menor quantidade de hidrogénio e hélio. No entanto, hidrogénio, metano e amónia, ainda são os constituintes maiores da sua densa atmosfera e, possivelmente, à superfície, existe um oceano pouco espesso de hidrogénio. Supõe-se, desta forma, que *Urano* e *Neptuno* têm um núcleo reduzido de ferro rochoso e um manto espesso de água, amónia e metano, rodeado por um fino oceano de hidrogénio líquido. Estes planetas são, pois, semelhantes a *Júpiter* e *Saturno*, excepto no concernente ao grande invólucro de hidrogénio-hélio.

Em muitos aspectos a génese dos *Planetas Externos* com o seu cortejo de satélites, assemelha-se à formação do Sistema Solar, no conjunto. Tal como os seus progenitores, os satélites dos *Planetas Externos* são constituídos por gelo de diferentes materiais e menor quantidade de materiais rochosos. Devido, no entanto, ao seu reduzido tamanho, podem não conter hidrogénio e hélio, em quantidades apreciáveis.

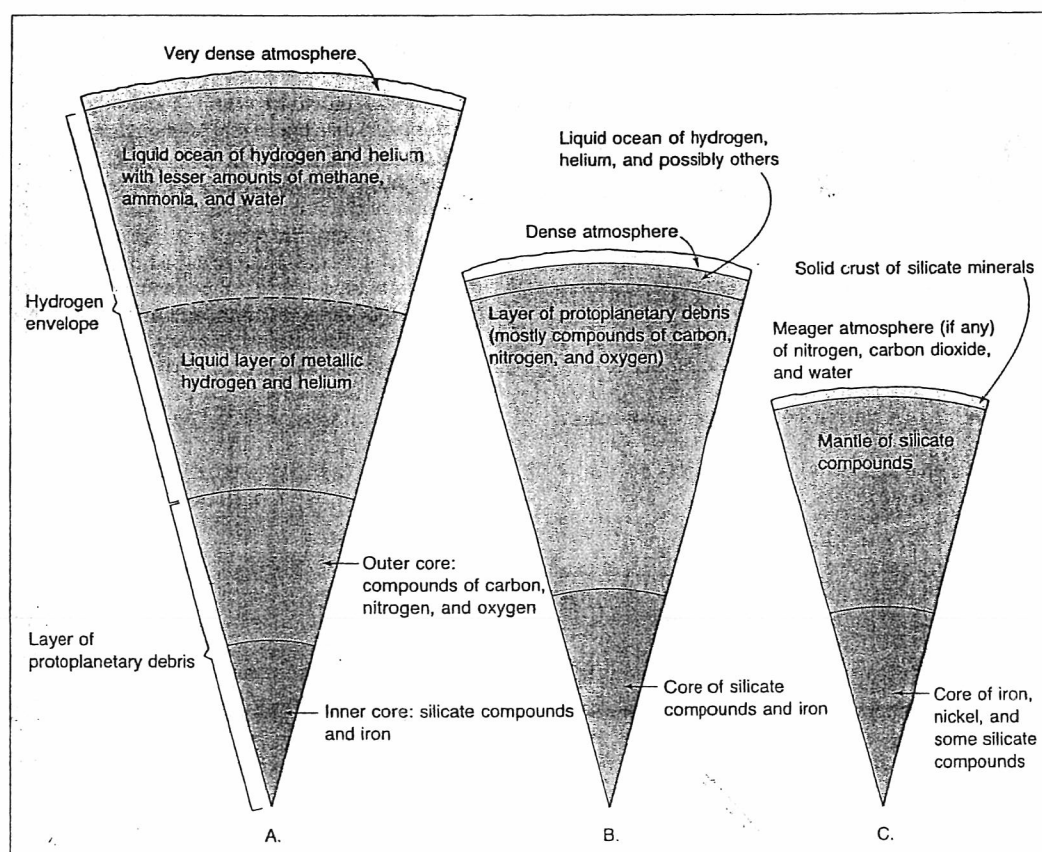


Fig.1.2 - Estrutura interna dos Planetas Jovianos e Terrestres: A) *Júpiter* e *Saturno*; B) *Urano* e *Neptuno*; C) *Planetas Terrestres*.

Após esta introdução geral à Planetologia, retomaremos o estudo dos Planetas começando pelo conhecimento da Lua.

DATAS

Em 1781, o Inglês William Herschel descobre um planeta para além de Saturno, que recebe o nome de Urano.

Em 1846, o Francês Urbain Le Verrier prevê a posição de um planeta para além de Urano; o Alemão Johann Galle encontra-o na posição prevista e dá-lhe o nome de Neptuno.

Em 1930, o Americano Clyde Tombaug descobre Plutão.

Em 1992, os Americanos David Jewitt e Jana Luu descobrem QB1, o primeiro objecto transneptuniano (situado para além de Plutão)

1.3 - Exploração Planetária

- *Exploração da Lua - Constituição da Lua, (Allègre, 1987)*

Desde sempre a Lua fascinou os homens inspirando poetas e românticos. No entanto, durante muito tempo, não passou de um disco prateado, sempre igual, dado que, mercê de um fenómeno de ressonância, a Lua apresenta sempre a mesma face voltada para a Terra.

Após as missões americanas *Apollo*, seguidas das missões soviéticas *Luna*, a Lua deixou de ser enigmática e tornou-se, para nós, um *pequeno planeta* de que conhecemos a topografia, a estrutura interna, a natureza das rochas da superfície e, sobretudo, a história geológica.

Topografia - A Lua é formada por duas unidades distintas:

i) - *Os mares*, de fundo plano, sombrios, que ocupam as depressões; têm formas subcirculares e parecem ser formados por coalescência e sobreposição de grandes círculos. Apesar de toda a superfície da Lua estar crivada de crateras de impacto, somente, a face visível da Lua possui mares.

Sob os mares existe uma concentração de matéria densa (rochas máficas-ultramáficas) que se manifestam por anomalias positivas do campo gravítico, designadas *mascons*, “mass concentration”.

ii) - *As montanhas*, de tonalidade clara, muito rugosas, recortadas de profundos vales, rodeiam os mares; a face oculta é, exclusivamente, montanhosa, não tendo este facto, até agora, merecido explicação plausível.

A concretização da aventura lunar teve lugar com a missão *Apollo 11*, em que *Amstrong* alunou no centro do mar da *Tranquilidade* e recolheu as primeiras amostras numa zona em redor do módulo. Criou-se grande expectativa sobre a natureza destas amostras, chegadas a Huston em Agosto de 1969, que revelaram:

- Tratar-se de rochas basálticas muito semelhantes, mineralógica e quimicamente, aos basaltos das lavas da Terra; revelam, apenas, empobrecimento em ferro, relativamente aos basaltos terrestres.

- Depois de uma permanência em quarentena no *Lunar Receiving Laboratory*, em condições de assepsia total, verificou-se que as rochas eram isentas de qualquer actividade biológica, isto é, não continham micróbios lunares. Apesar desta constatação, a 30 de Julho, chega a Huston uma notícia espectacular:- "Há matéria orgânica na Lua". Os espectrómetros de massa detectaram-na. Gera-se uma grande excitação sobre a existência de vida na Lua! Cedo, porém, cessa o entusiasmo ao verificar-se que esses produtos orgânicos, mais não são do que resíduos de combustível expelidos pelos reactores do módulo lunar que contaminou as rochas das imediações.

- As determinações de idade radiométrica feita por diferentes métodos e diferentes equipas (**Rb / Sr** por *Wasserburg* do Caltech; **U / Pb** por *Tatsumoto* do U.S. Geological Survey de Denver; **K / Ar** por *Greenville Turner* de Sheffield), são todas concordantes. As rochas do *Mar da Tranquilidade* têm idade de 3.800 M.A. Mas, facto curioso, a poeira lunar tem uma idade de 4.500 M.A., ou seja, a idade da Terra e dos Meteoritos.

Assim, o princípio da estratigrafia parece violado, porquanto, a camada que cobre é mais antiga que a camada coberta. Surgiram várias interpretações apressadas, mas, a mais simples é admitir que, se o solo da Lua tem idade de 4.500M.A., é porque é uma mistura e representa a média de todas as rochas das superfícies.

- As análises químicas revelaram algumas particularidades para as rochas lunares. A mais significativa respeita aos elementos da família das Terras Raras:- ao contrário dos basaltos terrestres, os basaltos lunares registam um défice extraordinário de um desses elementos - o *Európio*. Ora acontece que este elemento se associa ao feldspato calco-sódico, a plagioclase, que é o principal componente das rochas das montanhas, de aspecto claro.

- Outra particularidade envolve o défice de ferro, a que já fizemos referência.

A presença de um sismógrafo na Lua registou perturbações designadas por *tremores de lua*. A forma destes sinais é muito diferente dos tremores de terra, o que permitiu inferir, aos sismólogos, que o interior deverá ser menos rígido que a Terra.

Entre as rochas recolhidas pela missão *Apollo 11*, além de basaltos, figuram brechas constituídas por fragmentos de múltipla origem, aglomerados e soldados por cimento. A origem diversificada destes fragmentos evoca os fenómenos de impacte, esmagamento e aglomeração, secundários. Estas deduções, acompanhadas do exame de fotografias da superfície lunar, permite esquematizar as principais unidades da geologia da Lua. As crateras não são de origem vulcânica, mas, sim crateras de impacte provocadas por meteoritos ou asteróides erráticos. A colisão com a Lua, partiu, triturou, e reduziu a poeiras, as rochas da superfície, originando as grandes depressões, os mares, onde se derramaram lavas sob uma

forma bastante fluída. O contraste com as rochas basálticas dos mares é feito pelas rochas claras das montanhas.

Os grandes resultados da primeira exploração do nosso satélite são observações negativas que em ciência são tão importantes como as positivas. Assim, a primeira conferência de Huston, permitiu concluir: -não há vida na Lua, não há grandes aparelhos vulcânicos, não há água, não há grandes falhas e cadeias de montanhas alongadas como na Terra e não existe campo magnético. A geologia do satélite é regida por dois fenómenos fundamentais:- o vulcanismo efusivo e o impacte de asteróides que gera crateras.

As missões americanas *Apollo* sucedem-se até à 16 e 17, intercaladas com as soviéticas, *Luna 20* e, muito mais tarde, a *Luna 24*. Todas estas visaram a investigação das montanhas, sendo a exploração, no caso das missões *Apollo*, efectuada com auxílio de uma pequena viatura. Existem, aqui, muitas mais crateras do que mares o que confere ao terreno aspecto caótico e acidentado, explicando dificuldades de alunagem e a prioridade dada à exploração dos mares. Detectaram-se nas montanhas dois tipos de rochas:

- Uma rocha clara composta, essencialmente, de plagioclase, o *anortosito*, tal como se encontra na Terra.

- E uma rocha escassa, de tipo brechóide, situada sempre em posição inferior aos anortositos, mas, de composição química e mineralógica invulgares que passou a ser designada *KREEP*. O termo significa que é rica em potássio(K), terras raras (REE) e fósforo (P). Nenhuma se encontra intacta, todas resultam de bombardeamento meteorítico e têm idade de 4.400 M.a., muito mais antigas que as rochas basálticas dos mares.

Com esta gama de conhecimentos, estamos em condições de efectuar uma síntese sobre a *origem, constituição e evolução da Lua*. Assim:

- A idade da Lua é de 4.400 - 4.500 M.a., sendo também esta a idade da Terra e de todo o Sistema Solar.

- Nesta fase inicial, a Lua encontrava-se parcialmente fundida, excepto uma crosta muito fina da superfície, dado ter-se iniciado o esfriamento externo. A maior parte do manto era líquida e constituía uma câmara magmática gigantesca. Mas, a crosta ter-se-ia formado, simultaneamente, por um processo de diferenciação. Quando o líquido magmático começa a solidificar, verifica-se uma separação mecânica dos minerais que primeiramente cristalizam. Os mais densos, tais com óxidos metálicos, olivina e piroxenas, precipitam e acumulam-se no fundo da câmara magmática, contribuindo para a formação do núcleo, ao passo que os menos densos que o banho silicatado, flutuam. Estão neste caso as plagioclases cálcicas. Deste modo, a crosta da Lua é formada, em primeiro lugar, por rochas anortosíticas, compostas essencialmente por este mineral claro. Assim, as montanhas de plagioclase, acabaram por constituir a crosta primitiva da Lua. Prosseguindo o processo de diferenciação magmática, os elementos químicos que não entravam na composição das plagioclases, nem dos minerais

pesados, mantiveram-se no banho fundido cujo volume se foi reduzindo, à medida que aumentava a parte sólida cristalina.

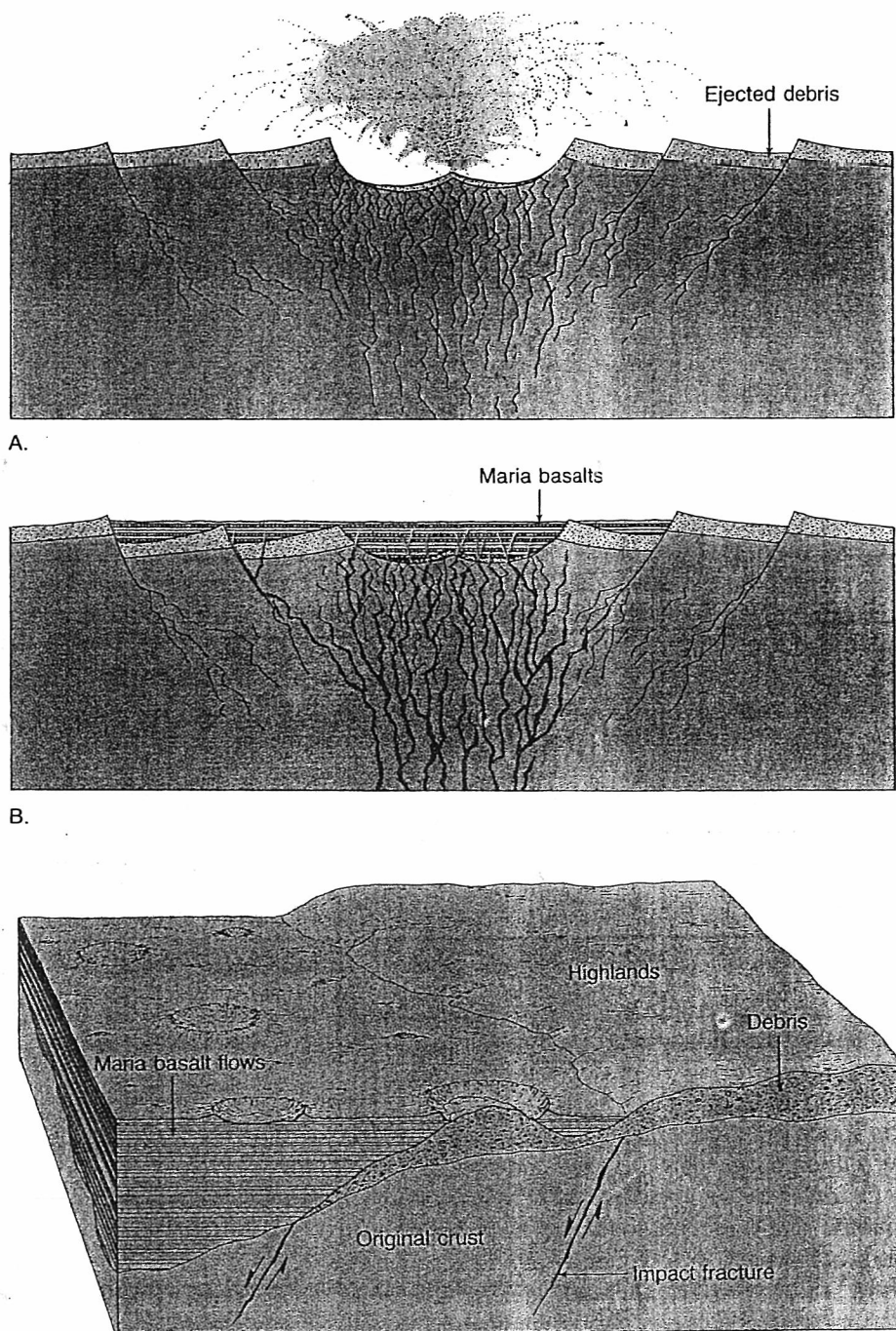


Fig. 1.3 - Origem e estrutura dos mares: A) - Impacte de uma massa asteróide originou uma cratera de centenas de km de diâmetro e fracturou a crosta em torno da cratera; B) - Enchimento da área de impacto com lavas basálticas resultantes da fusão parcial do interior da Lua; C) - Estrutura da crosta da Lua, diferenciada em mares e montanhas.

- A concentração destes elementos aumentou no líquido residual. Estes elementos são precisamente o *potássio*, *fósforo* e *terras raras* que entram na composição das rochas *KREEP*. Este processo de diferenciação e organização interna da Lua em diferentes camadas, estaria concluído há cerca de 4.300 M.a. e a Lua teria uma consistência, essencialmente, pastosa. - A superfície da Lua, no entanto, com uma crosta de *anortosito*, continua a sofrer bombardeamentos intensos de asteróides. Estes impactes geram crateras de várias dimensões que, em muitos casos, se sobrepõem. Quando os impactes são fortes, cavam abismos, deixando observar as rochas *KREEP*, sob os anortositos. Porém, a acção dos meteoritos não é apenas destrutiva. Um impacte, além de originar o solo poeirento e repleto de fragmentos de rochas, aglomera estes fragmentos para formar *brechas* por fusão de parte destes fragmentos.

- Os sucessivos choques modelam a superfície do nosso satélite, em montanhas, crateras e depressões, mas, ao mesmo tempo, libertam uma grande quantidade de calor. Compreende-se, desta forma, que o bombardeamento meteorítico contínuo mantenha uma temperatura elevada no interior da Lua. A esta influência junta-se uma outra não menos significativa - a radioactividade. Há elementos, tais como urânio, tório, chumbo, potássio, árgon, etc. que se desintegram naturalmente. Só ao fim de 1 000 M.a. é que o efeito acumulado deste decaimento radioactivo se fez sentir. A partir de 3 800 M.a., nas depressões, ocorrem fenómenos de vulcanismo. O interior da Lua aquecido, por um lado, pela radioactividade e, por lado, pelo impacte de meteoritos gigantes, começou a fundir. O produto da fusão ou magma atinge facilmente a superfície, dado as rochas da crosta estarem fracturadas pelos impactes, (*Fig 1.3*). Rios de lava encheram as depressões e formaram os *mares lunares*.

- A partir desta fase a frequência e intensidade de impactes passou a ser menor. O calor acumulado foi-se dissipando com o vulcanismo e o interior da Lua foi arrefecendo. Hoje resta apenas uma zona do manto que os sismólogos consideram parcialmente fundida. Há 3 200 M.a. (idade das rochas mais jovens dos mares) que a Lua é um *planeta morto*. Prevalecem, apenas, os choques esporádicos de meteoritos a perturbar a tranquilidade da superfície, onde não existem outras manifestações de dinâmica externa. Os sismógrafos colocados em vários pontos da superfície voltada para Terra permitiram, não só, determinar a constituição interna da Lua (*Fig. 1.4*) por interpretação dos respectivos sismogramas, como ainda, resolver o mistério dos *tremores de lua*. Estes têm lugar na camada parcialmente fundida, a *astenosfera*, e são devidos à atracção que a Terra exerce sobre a Lua.

Todavia, esta estrutura é mais surpreendente se examinada do ponto de vista *químico*.

- A não existência de núcleo deveria implicar que o ferro, em vez de se concentrar nesta zona, como na Terra, deveria estar disseminado nas rochas provenientes das outras zonas, à analogia dos condritos, como adiante veremos. Mas, como já referimos, os basaltos lunares são mais pobres em ferro que os basaltos terrestres, donde se conclui que a Lua é mais pobre em ferro que a Terra. Adiante retomaremos este tema.

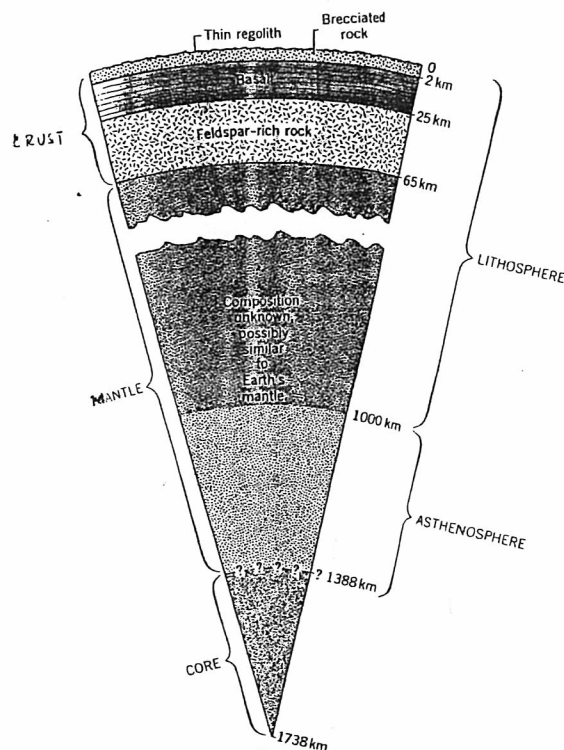


Fig.1.4 - Estrutura interna da Lua. A existência de núcleo é incerta, dado a densidade média de $3,5 \text{ g/cm}^3$ ser idêntica à das rochas que encontramos à superfície.

- A Lua não tem atmosfera nem oceanos com água. Poder-se-ia pensar que os gases e vapor de água estariam retidos no seu interior. Mas, a análise das rochas lunares revelam ausência de azoto CO_2 , O_2 , H_2O , gases que compõem a atmosfera terrestre. Além disso, estas análises, feitas de forma sistemática, mostram que os elementos voláteis tais como Pb, Zn e Hg são menos abundantes do que nas rochas terrestres. Além de pobre em ferro, a Lua é também pobre em compostos voláteis.

Dada a dissemelhança física e química entre a Terra e a Lua, colocamos a questão da origem do nosso satélite. Várias hipóteses têm sido adiantadas:

i) - *Hipótese da captura*. A Lua, errando pelo universo, teria sido atraída pela Terra mercê da atracção gravítica, acabando por ser capturada. Esta hipótese esbarra com problemas difíceis de ultrapassar pelas leis da mecânica.. Os cálculos demonstram que a Lua teria sido de tal modo perturbada pela captura que teria explodido.

ii) - *Hipótese da fissão*. Sendo a densidade da Lua idêntica à do manto terrestre, pensa-se que a Lua se teria separado após a diferenciação da Terra em crosta, manto e núcleo. A Lua seria uma porção de manto arrancado à Terra. A força motora desta operação seria a força centrífuga. Todavia, os cálculos revelam que tal só seria possível com velocidade de rotação

do sistema Terra - Lua, muito mais elevada do que a realidade. Mais ainda, o estudo pormenorizado das composições químicas, mostra que a Lua e manto terrestre têm teores em ferro e voláteis muito diferentes.

iii) - *Hipótese da origem comum.* A Lua e a Terra formar-se-iam a partir da nebulosa primitiva por acreção de poeiras, no meio ambiente terrestre. Nem cativa nem filha da Terra, a Lua seria a irmã mais nova. As diferenças de composição química são explicáveis por diferenciação e evolução separada em regiões do espaço, a diferentes temperaturas, dependentes da distância relativamente ao Sol.

SABIA?

Em 1998, a sonda americana Lunar Prospector descobriu a presença de água perto do polo Sul da Lua. Trata-se de uma modesta bolsada de 300×10^6 Ton de cristais de gelo misturados com rególito, que teriam sido conservados a 50 cm de profundidade. Esta água teria sido trazida pela chuva de cometas ao longo de centenas de milhões de anos

- Mercúrio

Dado encontrar-se muito perto do Sol, não é fácil observar ou fotografar o Planeta *Mercúrio*. O seu reconhecimento foi efectuado com a sonda *Mariner 10*, cujas imagens estão na base do conhecimento concreto do planeta.

- Tem um diâmetro de 4.878 km, idêntico ao da Lua, sendo as superfícies dos dois igualmente muito semelhantes. Rios de lavas e crateras de várias dimensões combinam-se lembrando a paisagem lunar. Exibe abundantes fracturas, formando escarpas que atravessam crateras e depressões, devidas certamente à contracção crostal por esfriamento. A elevada densidade de crateras mostra que mercúrio é um *planeta morto* há vários milhares de milhões de anos, sem actividade geológica, mas, com grande actividade vulcânica no início da sua formação.

- Não tem atmosfera e, consequentemente, não tem dinâmica externa, erosão aquosa ou eólica.

- A exploração do planeta revelou a existência de campo magnético dipolar, sendo 4×10^{-4} vezes menor que o da Terra.

- Com densidade de $5,5 \text{ g/cm}^3$, análoga à da Terra, mas, com tamanho três vezes menor, não sofre efeito de compressão sobre os seus materiais.

- A estrutura interna do planeta consta de um núcleo denso formado, sem dúvida, por ferro, rodeado de um manto fino de silicatos. É neste núcleo de ferro que se situa a origem do campo magnético. Este é mais fraco porque o planeta é mais pequeno ou porque a rotação é mais lenta?

- Mercúrio gira sobre si mesmo em um pouco mais de 59 dias, sendo o período de revolução em torno do Sol de 88 dias. Este facto origina temperaturas nocturnas de -173°C e diurnas de 427°C , suficientemente altas para fundir o estanho e chumbo.

- *Vénus*

O Planeta *Vénus* é parecido com a Terra no que respeita ao tamanho e densidade, mas, muito diferente em outros aspectos. A partir de 1962, uma armada de sondas russas e americanas (radar e várias sondas, *Mariner*, *Pioneer Venus*, *Venera* e *Magalhães*, Fig 1.5). revelaram que, contrariamente às aparências, *Vénus* é muito diferente da Terra

- O sentido de rotação faz-se em sentido inverso ao do movimento de revolução sobre a sua órbita e fá-lo muito lentamente, demorando 240 dias terrestres no movimento de rotação e 225 dias a descrever a órbita segundo um círculo quase perfeito.

- Possui uma atmosfera muito espessa, com uma massa 90 vezes superior à massa da atmosfera terrestre. Por este facto, a pressão na superfície de *Vénus* é também 90 vezes a pressão atmosférica, isto é, equivalente à pressão verificada a 1000 metros de profundidade nos oceanos terrestres. Esta atmosfera é tão densa que cria à superfície um efeito de estufa, concentra os raios solares, elevando a temperatura no solo a 470°C . Pressão e temperatura desta ordem de grandeza inviabiliza qualquer tipo de vida tal como a concebemos e transforma as rochas por reacções no estado sólido, fenómeno designado metamorfismo, que adiante estudaremos.

- A parte melhor visível de *Vénus* é a sua atmosfera que, como já havia notado o astrónomo amador francês *Boyer*, gira muito mais depressa do que o planeta. A sua rotação faz-se em apenas quatro dias, formando um movimento de pião, relativamente, ao planeta. Na Terra, a atmosfera é atraída pelo planeta rodando em simultâneo com ele. A atmosfera de *Vénus* consta de 85% gás carbónico, além de azoto e água em pequena quantidade, que se mantêm em altitude. Serve para fabricar gases extremamente corrosivos como ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H_2SO_4). Estes ácidos formam nuvens densas, dificultando a acção das sondas cujos aparelhos ficam danificados neste meio agreste a que se adicionam as condições reinantes no solo (470°C e 100 atmosferas). A “aterragem” em *Vénus* é, pelo contrário, facilitada porque a densidade alta da atmosfera permite a utilização de pára-quedas. A espessura da atmosfera é de cerca de 25 km, desenvolvendo-se a cerca de 70 km do solo.

- O reconhecimento da superfície de *Vénus* foi, essencialmente, efectuado pela missão americana *Pioneer Vénus*, através de radar, sendo a carta de superfície completada pelo radar gigante do observatório de *Arecibo* em *Porto Rico*. A superfície de *Vénus* é bastante plana. Cerca de 80% do planeta apresenta relevos com desnivelamento inferior a 1000 metros. As montanhas representam 8% da superfície: - destacam-se o monte *Maxwell* que atinge 11000 m e o planalto *Lakshmi* com 3000 m de altitude, mas, completamente liso. Este planalto é

enquadrado a norte e sul por uma cadeia de montanhas mais elevada. O conjunto foi designado por *Ishtar*, nome da deusa suméria a quem era consagrada a prostituição sagrada. Um outro planalto muito mais baixo, situado no hemisfério sul, foi designado por *Afrodite*.

Name	Date	Mission
<i>Mariner 2</i>	1962	Fly-by of Venus (first to any planet)
<i>Mariner 4, 6, 7</i>	1965 1969 1969	Fly-by missions to Mars
<i>Mariner 9</i>	1971	Orbiter of Mars
<i>Apollo 8</i>	1968	Astronauts circled the moon and returned to Earth.
<i>Apollo 11</i>	1969	First astronaut landed on the moon.
<i>Apollo 17</i>	1972	Last of six <i>Apollo</i> missions to carry astronauts to the moon
<i>Mariner 10</i>	1974	Orbited the sun, allowing it to pass Mercury several times; fly-by mission to Venus
<i>Pioneer 10, 11</i>	1973 1974	First close-up views of Jupiter
<i>Venera 8, 9, 10</i>	1972 1975	Soviet landers on Venus (operative about one hour each)
<i>Venera 13, 14</i>	1982	First color images of Venus
<i>Viking 1, 2</i>	1976	Orbiters and landers of Mars
<i>Voyager 1</i>	1979 1980	Fly-by of Jupiter Fly-by of Saturn
<i>Voyager 2</i>	1979 1981 1986 1989	Fly-by of Jupiter Fly-by of Saturn Fly-by of Uranus Fly-by of Neptune
<i>Galileo</i>	1990 1992 1995	Fly-by of Earth and Venus Fly-by of Earth Orbiter of Jupiter
<i>Magellan</i>	1990	Radar-imaging orbiter of Venus

Fig. 1.5 - Sondas espaciais mais significativas

- A verificação do campo de gravidade permitiu aos investigadores constatar que, tal como na Terra, os relevos são compensados, isto é, obedecem ao princípio de *Arquimedes*. Os relevos correspondem a materiais de densidades menores do que os das planícies, como a densidade dos continentes terrestres é menor que a dos fundos oceânicos.

- A partir das explorações recentes feitas pela sonda Magalhães, a superfície do planeta não terá idade superior a 500 M.a.. Identificam-se canais de lavas, em que um destes,

meandriforme, tem extensão de 6800 km e, bem assim, numerosas estruturas vulcânicas, algumas das quais activas. As inferências anteriores sobre continentes e oceanos e a análise cuidada das fotografias-radar, levou alguns astrogeólogos a pronunciarem-se sobre a existência de vales, escarpas, falhas e, até, dorsais de tipo oceânico e continentes, enfim, analogias com a *tectónica de placas*, característica da dinâmica terrestre.

- Apresenta estruturas anelares, interpretadas como crateras de impacte. Estas são mais numerosas que na Terra, mas, de densidade muito menor que as observadas na Lua.

- Apesar das diferenças apontadas, *Vénus* é, pois, estranhamente parecida com a Terra, sendo o nosso planeta-irmão. Todavia, não tem campo magnético

SABIA?

No dia 19 de Outubro de 1967, a sonda americana *Mariner 5* mede, sem pousar, o diâmetro equatorial de *Vénus* e efectua uma primeira análise da composição da atmosfera. No entanto, o módulo russo de *Venera 4* havia sido o primeiro a pousar em solo venusiano e a efectuar medidas *in situ*. Ao todo 15 sondas russas pousaram em solo de *Vénus*, uma das quais *Venera 9*, em 1975, tomou a primeira de duas únicas fotos do solo.

- Marte

Decorria a exploração da Lua quando a *NASA* enviou sondas, *Mariner 4, 9 e 10*, para fotografar *Marte*. Veículos automáticos soviéticos, primeiro, que se esmagaram contra o solo, mais tarde, dois veículos da missão *Viking*, americana e, recentemente, várias sondas e veículos, ora mal ou bem sucedidos, têm-se destinado essencialmente a experiências do domínio que, impropriamente, é designado de *exobiologia*.

- O solo de *Marte*, tal como o da Lua, encontra-se crivado de crateras de impacte. Algumas regiões têm mais crateras do que outras, sendo, por isso, mais velhas. No entanto, todo planeta tem crateras.

- *Marte* tem um relevo mais pronunciado que o nosso satélite. Exibe magníficos vulcões em forma de escudo, como os do *Havai*, mas, muito mais majestosos. Encontra-se aqui o maior vulcão do Sistema Solar - o *Nix Olympus*. Tem 25 km de altura, 600 km de largura e uma cratera de 20 km de diâmetro. Estes vulcões encontram-se isolados ou agrupados em províncias. Na região de *Tharsis*, formam alinhamentos como as cadeias vulcânicas terrestres.

- A continuidade das missões fotográficas permite realizar uma cartografia da superfície de *Marte*:

O *hemisfério Sul*, com densidade de crateras análoga à Lua, contém longos desfiladeiros de aparência fluvial. Nas fotografias, notam-se verdadeiras gargantas de rios, com afluentes ramificados em nervuras, tal como na Terra. A mais extensa destas gargantas,

Coprates, tem 3000 km. Todavia, estes vales são secos, sem sinais de chuva ou de água, nem vestígios de transporte de materiais. Fazem lembrar gigantescos *ueds* dos desertos.

O hemisfério Norte, com menor densidade de crateras, possui imponentes vulcões e grandes planícies, formadas por rios de lava, iguais aos mares lunares.

- Possui, também, calotes polares cobertas de um gelo branco, cuja natureza, as missões fotográficas não determinam de imediato. A superfície é varrida por um vento de areia que, durante dias consecutivos, obscurece a atmosfera e impede a obtenção de fotografias. Quando as tempestades terminam, descobrem-se, perto dos pólos, dunas iguais às dos desertos, como resultado dos temporais de areia. Mas, a observação mais excitante foi a visão da fusão progressiva das calotes, no período mais quente. Fica uma calote residual e uma série de depósitos estratificados idênticos aos dos glaciares. A análise espectroscópica, em órbita, permitiu identificar a natureza da calote como gelo carbónico.

- Mediante continuação do exame, em órbita, verifica-se que os magnetómetros registam a ausência de campo magnético.

- Tem dois satélites de reduzidas dimensões e forma imperfeita, cravejados de crateras - *Phobos e Deimos*.

- A atmosfera de *Marte*, capaz de provocar os ventos de areia a que aludimos, foi analisada com precisão pelos espectrómetros embarcados. É dominada por gás carbónico e a seguir o azoto. Não existe oxigénio e, no final da missão *Mariner*, a questão científica que ficava por resolver, era a da água. As condições de temperatura e pressão reinantes à superfície de *Marte*, mostravam que a água não pode existir ali no estado líquido. O gelo ou vapor eram os estados possíveis. Como se formaram então os grandes desfiladeiros onde parece terem corrido rios? A estas questões juntava-se a prova, da existência ou não, de vida no planeta. Subordinada a esta problemática, a *NASA* decide iniciar a missão *Viking* e colocar no planeta dois veículos automáticos.

- A missão *Viking*, programada para realizar experiências do domínio da *exobiologia*, foi em certa medida um insucesso. Efectuada no solo marciano, poeirento e cheio de destroços de rochas vulcânicas, a análise automática não trouxe nada de nítido, como a análise de um punhado de areia do Sahara não ensinaria grande coisa a extraterrestres interessados na história da Terra. Renovaram-se estudos da atmosfera com espectrómetro de massa que apenas evidenciaram excesso, sobre o existente na Terra, de xénon 129 (isótopo produzido pela radioactividade extinta do iodo 129). Sem que tenham sido feitas medições originais, obteve-se consenso entre os especialistas sobre o facto de *Marte* haver tido, no passado, uma meteorologia com chuvas e cursos de água, o que explicaria a presença de gargantas fluviformes e o facto de a atmosfera, bastante densa para permitir uma meteorologia violenta, se encontrar actualmente armazenada no solo e nas calotes glaciares. *Marte* foi, sem dúvida, submetida a grandes variações climáticas. Tem uma história atmosférica e “geológica” recente.

Em Agosto de 1996, os cientistas da NASA afirmam ter descoberto vestígios de micro-organismos num meteorito proveniente de Marte, encontrado na Antártida.

A 4 de Julho de 1997 a sonda *Mars Pathfinder* pousa com sucesso no *Ares Vallis* do planeta vermelho. Situa-se na confluência de dois canais onde se produziram inundações catastróficas de água e detritos há cerca de 2-3000 anos. Actualmente, continuam as investigações do planeta mediante veículos automáticos. Tem sido anunciada a presença de água no planeta, mas, não se têm sido registado avanços quanto ao conhecimento de vida em Marte.

- *Júpiter*

Júpiter, o maior planeta do nosso Sistema Solar, representa 71% da massa combinada de todos os restantes planetas, satélites e asteróides. Com um diâmetro de 143 000 km (cerca de 11 vezes o diâmetro da Terra) a sua massa é 318 vezes a massa da Terra o que lhe confere densidade de $1,33 \text{ g/cm}^3$. Esta baixa densidade é consequência da composição, essencialmente, gasosa. O planeta e as suas luas foram explorados, a partir de 1979, pelas sondas *Voyager 1 e 2*, e, a partir de 1974, pela *Pioneer 11*, (Fig 1.6), continuando actualmente a exploração fotográfica e espectroscópica.

- A constituição de *Júpiter* é, basicamente, hidrogénio e um pouco de hélio. A sua composição química pouco difere da do Sol. Todavia, a sua densidade, superior à da água, implica: - que estes gases, não retidos pelos pequenos planetas, quando constituíam o essencial da nuvem protossolar, fossem captados pelos grandes planetas, *Júpiter* e *Saturno*, porque a sua massa o permitia; e que os mesmos gases, no interior dos planetas, se encontrem no estado líquido.

- A estrutura interna foi inferida das leis da gravitação de *Newton*. Num corpo em rotação, cada elemento desse corpo é submetido a duas forças antagónicas: - *atração gravítica*, que tende a aproximá-lo do centro do corpo e *força centrífuga*, que tende a expulsá-lo para o exterior. A forma do corpo e distribuição da massa no interior, marcam o equilíbrio entre estas duas forças, característica traduzida pelo parâmetro - *momento de inércia*. Assim, um corpo em rotação é achatado nos pólos e dilatado no equador, sendo esta deformação, tanto mais pronunciada, quanto mais uniformemente estiver distribuída a massa no interior do planeta. Ora, *Júpiter* mostra dilatação equatorial de 6%, o que, combinado com a sua densidade, permite calcular um núcleo denso, formado por gelo e corpos rochosos.

- Outra observação fundamental feita pela *Voyager* foi que *Júpiter* emite duas vezes mais energia do que a recebida do Sol. Será devido a reacções nucleares internas, como nas estrelas? A massa de *Júpiter* é demasiado pequena para que se atinjam temperaturas suficientes para desencadear estas reacções. A fonte de calor reside na atracção gravítica que permitiu, primeiro, que o planeta se aglomerasse e, depois, que a atracção entre partículas

propicie choques e, conseqüente, aquecimento. Este facto ilustra o princípio físico de conversão de energia: -energia potencial, transforma-se em energia térmica. Foi, assim, possível calcular o perfil térmico de *Júpiter*. Aceita-se que as temperaturas no núcleo sejam de 20-30000 ° C, ou seja 5-6 vezes as do núcleo terrestre, mas, 100 vezes inferior às do centro de uma pequena estrela. As condições são de tal ordem que: - nem hidrogénio, nem hélio se podem encontrar no estado sólido; o núcleo, constituído por rochas e gelo, estará rodeado por um manto líquido e, apenas, os 20 km externos, no sentido da superfície, são gasosos; e, finalmente, sendo os fenómenos de acreção muito mais importantes no início, a quantidade de energia libertada também o era. *Júpiter* recém-formado comportava-se como uma pequena estrela não nuclear e daí, o seu Sistema “Solar” próprio.

- Uma das mais importantes descobertas feitas pela *Voyager 1*, foi o sistema anelar de *Júpiter*. Ao anel contínuo, atribui-se uma espessura de 30 km e estende-se para o exterior até uma distância igual a duas vezes o diâmetro do planeta. Este sistema de anéis é semelhante ao de *Saturno*. As partículas que compõe o anel são, pelo menos, temporariamente, fixadas pelo enorme campo magnético que rodeia o planeta. A proveniência destas partículas pode encontrar-se na actividade sulfurosa dos vulcões de *Io* que, depois de ionizadas, são captadas pelo campo magnético do planeta.

Os satélites de Júpiter

Em redor de *Júpiter* formou-se um sistema solar em miniatura. Dezasseis satélites gravitam em torno do planeta, todos situados no plano equatorial. Quatro destes satélites, *Io*, *Europa*, *Ganimedes* e *Calisto*, conhecidos desde *Galileu*, têm densidades que vão diminuindo com o afastamento de *Júpiter*. Os dois primeiros, com dimensão idêntica à da Lua, são essencialmente rochosos, ao passo que os dois últimos, de maior dimensão que *Mercúrio*, são formados por gelo.

Io, a lua mais interna, tem superfície rochosa, coberta por oito centros vulcânicos activos de natureza sulfurosa. A sonda *Voyager* registou uma erupção em grinaldas de projecteis, desenhando uma coroa sob a forma de guarda-chuva, distante da superfície de *Io* mais de 200 km. Esta superfície apresenta-se muito colorida, devido à presença de rochas sulfurosas que mudam de tons vermelhos para amarelos e de escuros para brancos, consoante a temperatura. A fonte de calor necessária à actividade vulcânica reside no efeito de marés exercido por *Júpiter*. Os movimentos internos provocariam a fusão das rochas e desencadeariam a sua expulsão. Tratar-se-á, porém, de um vulcanismo sulfuroso ou de um vulcanismo silicatado com forte componente sulfurosa?

Europa, o mais pequeno dos satélites *Galilaicos*, tem uma superfície de gelo recortada por estruturas lineares. Trata-se, apenas, da camada externa, porque o interior é certamente rochoso, como aponta sua densidade de 3 g/cm³. Não são visíveis crateras de impacto pelo que a superfície actual é posterior ao período de bombardeamento.

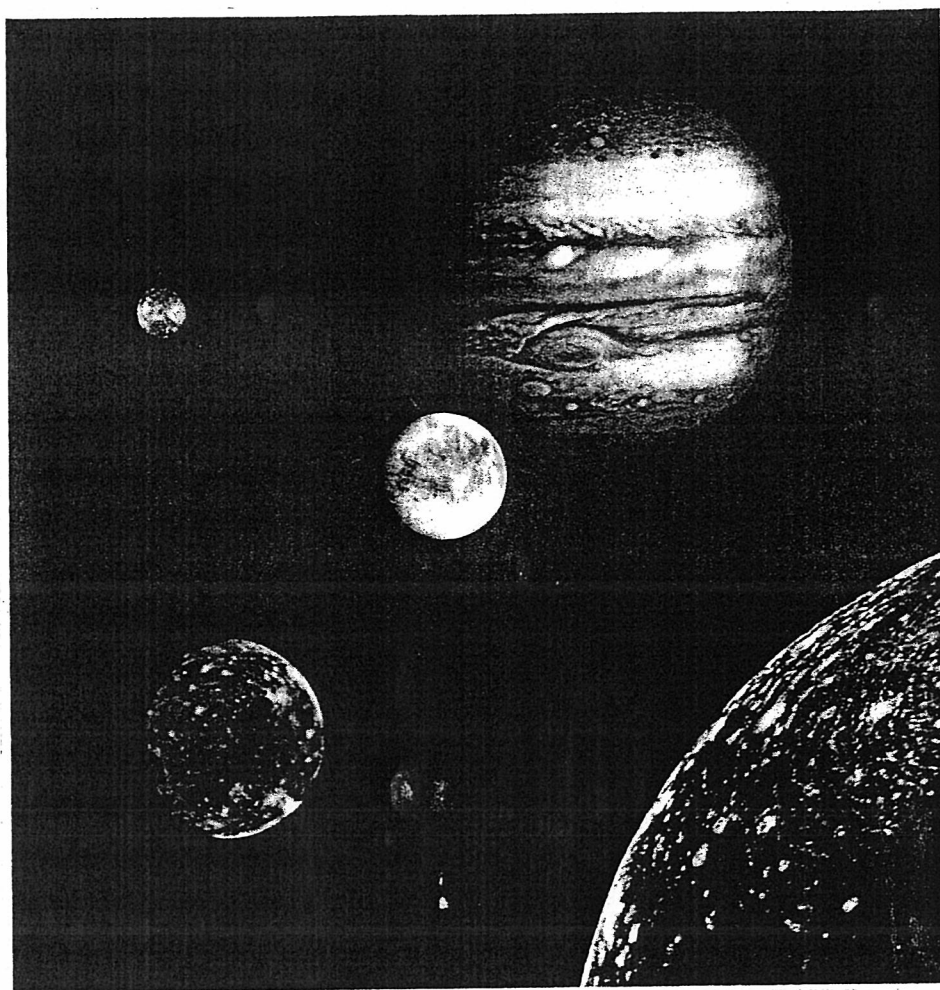


Fig. 1.6 - Vista de Júpiter e satélites Galilaicos a partir da Voyager 1. Ganimedes, em baixo à esquerda; Calisto, em baixo, à direita; Europa, junto de Júpiter; e Io, distanciado, à esquerda.

Ganimedes e Calisto são, no todo ou quase no todo, constituídos por gelo. As suas superfícies estão crivadas de crateras. A estas numerosas estruturas sobrepõem-se faixas entrelaçadas atribuídas a correntes de lama, ou melhor, lava formada por gelo. Haveria, nestes satélites, vulcões expelindo, não lava em fusão, mas, sim água líquida que escorria como a água de uma torrente antes de se transformar em gelo. Os vulcões, em última instância, são fontes.

- Saturno

Apesar deste planeta se encontrar duas vezes mais distante do Sol que *Júpiter*, a estrutura interna e composição atmosférica são semelhantes. Foi explorado pelas *Voyager 1 e 2*, entre 1980-1981. O aspecto mais saliente de Saturno é o seu sistema de anéis, já identificados por *Galileu*, embora, recentemente, também tenham sido reconhecidos em todos os Planetas Externos, à excepção de *Plutão*, dada talvez, a sua grande distância.

- Efectua o movimento de revolução em 29,5 anos.

- O regime térmico, idêntico ao de *Júpiter*, é complicado pelo designado fenómeno da chuva de hélio. Existe, com efeito, em Saturno, uma meteorologia de hélio que transfere massa e energia para o interior, por efeito de uma atmosfera muito dinâmica com ventos deslocando-se a velocidades de 1500 km/ hora.

- As convolutas desta espécie de ciclones criam à superfície várias manchas de que a *mancha vermelha* é a mais intrigante, como enigmática é a cor da atmosfera. Qual o composto químico que lhe confere cor arruivada e dá àquela mancha, cor vermelha?.

- Possui um total de dezasseis luas e um sistema de seis anéis, cada um dividido em anéis menores como as ranhuras de um disco, (*Fig. 1.7*). Os anéis são constituídos por uma infinidade de pequenos fragmentos rochosos, concentrados num disco cuja largura excede 200.000 km e cuja espessura não tem mais que algumas centenas de metros. Este disco gira no plano equatorial do planeta. Para se manter estável, o disco tem que estar em rotação, caso contrário, a atracção gravitacional exercida pelo planeta-mãe capturá-lo-ia. Cada partícula ou rocha que compõe o disco, gira à volta do planeta submetida a duas forças: - a força de atracção exercida pelo planeta e a força centrífuga que tende a repeli-la; a posição de equilíbrio é definida pela trajectória que ela percorre. Assim, os anéis são constituídos por uma infinidade de partículas girando a grande velocidade numa órbita definida. Como a mecânica não é perfeita, às vezes, dão-se colisões que podem conduzir à destruição ou afastamento das partículas. Em uma e outra destas situações, verifica-se que a colisão conduz ao afastamento lateral dos projecteis e, consequentemente, ao alargamento do anel. A partir do esquema presente, compreende-se como se passa de um sistema com alguns objectos situados na mesma órbita, para um sistema de anéis cada vez mais finos e, sucessivamente, alargados por este processo de colisões.

- A nebulosa que rodeou *Júpiter* e *Saturno*, antes da sua condensação, composta de gases densos e abundantes, permitiu a condensação de numerosos corpos rochosos. Na proximidade dos planetas, estes numerosos satélites entraram em colisão, fragmentaram-se e formaram uma cintura de rochas. A elevação da temperatura do planeta central, a seguir à sua contracção, expulsou o gás, permitindo a fragmentação dos projecteis e evolução no sentido da formação de anéis. Esta é uma hipótese plausível.

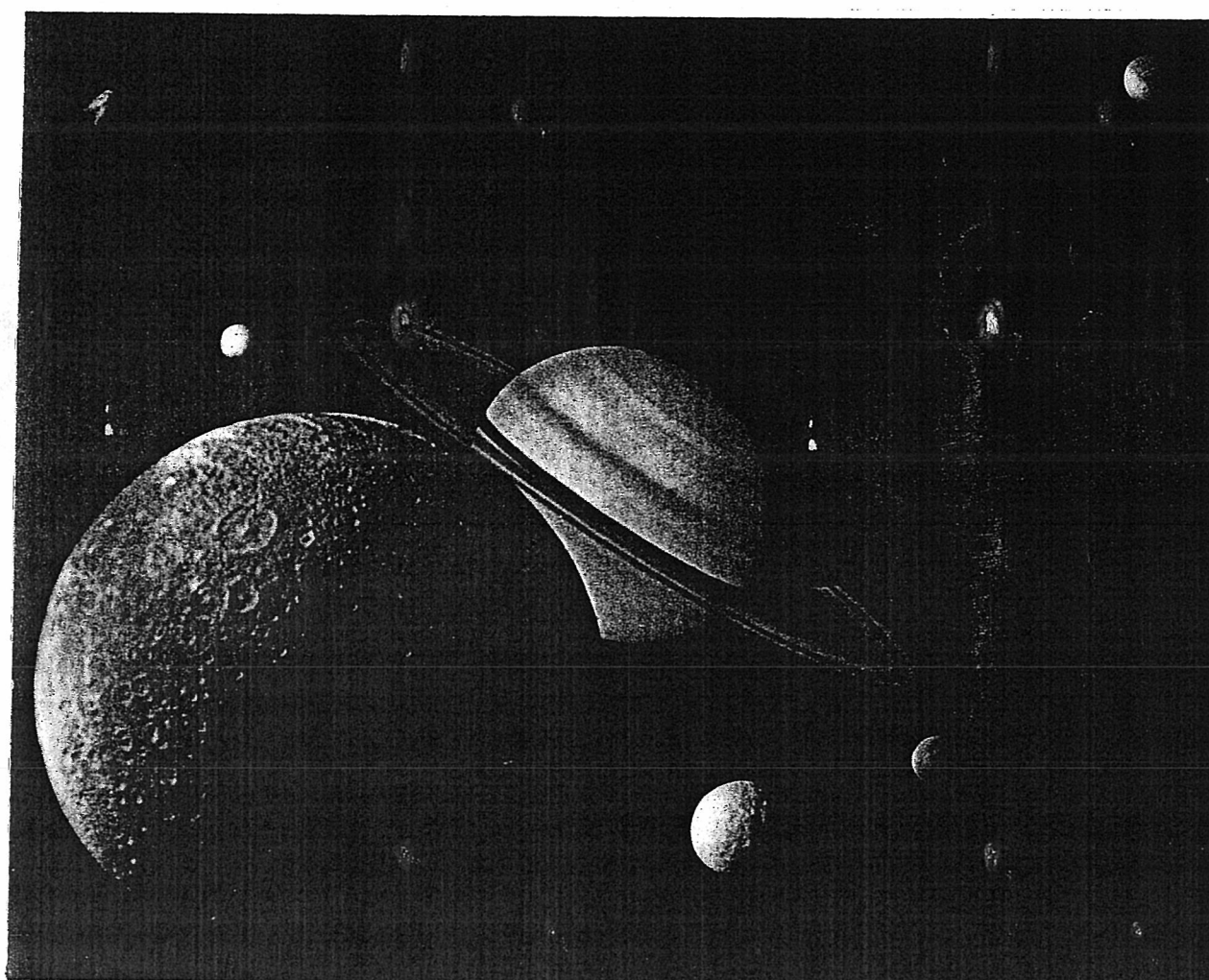
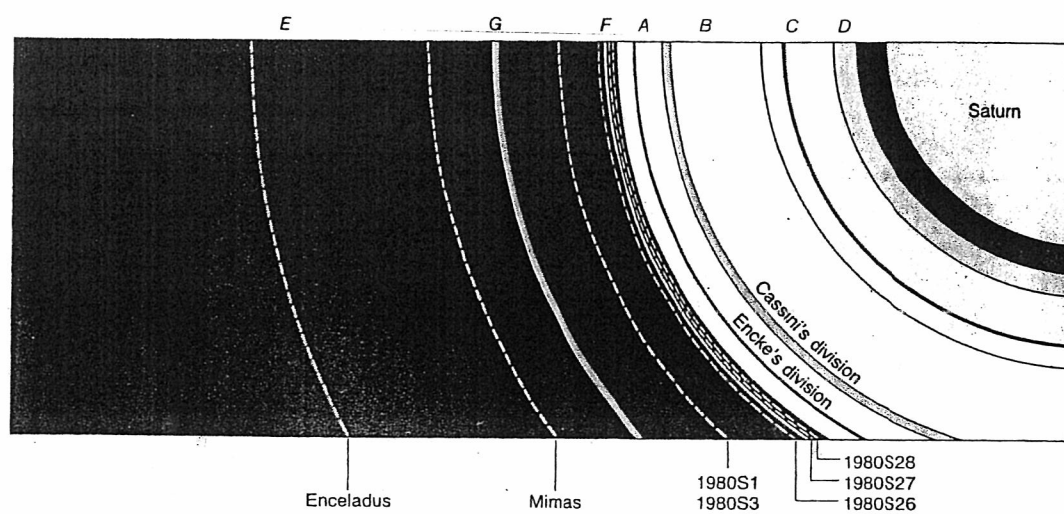


Fig. 1.7 - Imagem polar do Sistema de Anéis, em escala relativa, e uma montagem do sistema de satélites de Saturno. Dione, em primeiro plano; Tethys e Mimas, à direita; Enceladus e Rhea, à esquerda dos anéis; e Titã, no canto direito.

Os satélites de Saturno

São conhecidos dezasseis corpos gravitando na órbita de *Saturno*. Dois deles, têm órbitas quase circulares e movimento contrário ao dos ponteiros do relógio, no plano equatorial do planeta; outros dois, *Iapetus* e *Phoebe*, têm órbitas inclinadas de 15 e 150 graus, respectivamente, em relação ao plano equatorial do sistema, sendo o movimento do último no sentido dos ponteiros do relógio.

Baseados na estimativa das suas densidades, entre 1,1 e 1,5 g/cm³ (excepto *Titã*) e alta reflectividade, infere-se que os satélites de maiores dimensões, tais como *Tétis*, *Encélado* e *Dione*, sejam compostos de água gelada e, bem assim, gelo de amónia e metano, com menor quantidade de material rochoso. Os de menor tamanho têm formas irregulares e diâmetro compreendido entre 200 km e 30 km. Mostram estruturas de gelo com crateras de impacto, grandes fracturas, verdadeiros rios de água gelada provando a existência de vulcões de água, como nos satélites de *Júpiter*. Contudo, *Saturno* tem um satélite peculiar: *Titã*.

Titã é o único satélite do Sistema Solar com atmosfera. Esta forma uma nuvem uniforme que impediu a *Voyager 1* de inspeccionar a superfície. a atmosfera foi identificada indirectamente por rádio e espectrometria de infravermelhos. Consta de azoto e metano, árgon e hidrogénio, a que se juntam inúmeros hidrocarbonetos, tais como, etileno e acetileno. À superfície, com uma temperatura de -175° C, o metano é líquido. *Titã* encontra-se, talvez, coberto por um oceano de metano, onde existe uma verdadeira meteorologia com evaporação, vento e chuva. Só que as nuvens e chuva são de metano! Dada a ausência de oxigénio na superfície de *Titã*, o carbono, que em *Vénus* e *Marte* se encontrava sob a forma de CO₂, encontra-se aqui sob a forma de hidrocarbonetos.

O interior do planeta seria constituído por uma mistura de rochas e gelo e, em consequência das baixas temperaturas, o oxigénio seria aí retido. Cria-se, assim, à superfície de *Titã* um verdadeiro mar de “petróleo”. Uma nave que chegasse a *Titã* com a missão de estudar não teria falta de combustível. Em contrapartida, teria falta de comburentes, dada a ausência de oxigénio. Ficaria, pois, reduzida à navegação à vela num mar de petróleo

Urano e Neptuno

São dois planetas muito semelhantes:- no tamanho, mostram tom cinzento azulado, pálido, atribuído à atmosfera de metano e têm estrutura e composição idênticas.

- Em 1977, uma surpreendente descoberta revelou que *Urano* tem anéis semelhantes aos de *Júpiter*. No entanto, as primeiras imagens do planeta foram obtidas pela *Voyager 2* em Janeiro de 1986. Estas imagens mostraram a presença de mais dois anéis e 10 pequenos satélites, muito menores que os cinco já conhecidos das explorações a partir da Terra.

- Quando em 1989, a *Voyager 2* se aproximou de *Neptuno*, foi possível aos astrónomos ficar a conhecer:- a atmosfera do planeta composta por hidrogénio, hélio e

metano; a presença de arcos ou anéis incompletos; e existência de oito satélites. As imagens mostraram também uma atmosfera dinâmica, como a de *Júpiter* e *Saturno*.

A maior lua de *Neptuno*, *Tritão*, com diâmetro de cerca de 2700 km, revelou tratar-se de um curioso corpo espacial. A superfície, formada por água gelada e revestida por leitos sólidos de azoto e metano possui uma ténue atmosfera, também, de azoto e metano. Apesar de suportar a mais baixa temperatura de todos os corpos do Sistema Solar (-391°F), *Tritão* tem actividade vulcânica com projecções em pluma de mais de 8 km, dispersando-se num raio de mais de 100 km. A superfície tem aparência jovem, dada a falta de crateras. Exibe depressões e ravinas cruzadas por cristas. Em outras zonas, parece existirem lagos gelados contendo terraços, o que sugere alternância de fusão e congelamento de água.

Plutão

Plutão situa-se na periferia do Sistema Solar a uma distância 40 vezes superior à distância do Sol à Terra. Devido esta grande distância e baixa velocidade orbital demora 248 anos a percorrer a sua órbita em torno do Sol. Desde a descoberta, em 1930, completou cerca de 1/5 da revolução na sua órbita muito excêntrica. Estima-se um diâmetro inferior a 3000 km, sendo deste modo, o mais pequeno planeta do Sistema Solar. Em Junho de 1978, descobriu-se uma lua na órbita de *Plutão*.

Com uma temperatura estimada em -210°C , *Plutão* é considerado uma bola de gelo composta de uma mistura de gases gelados e menor quantidade de materiais rochosos, provavelmente, sem atmosfera. Uma proposta recente, sugere que *Plutão* foi no passado um satélite de *Neptuno*, afastado da sua órbita pelo choque com um corpo estranho. A descoberta de um satélite em torno de *Plutão* é tomada como evidência da fractura daquele satélite de *Neptuno* em dois corpos e entrada de ambos numa órbita alongada em torno do Sol.

Os cometas

Os cometas são corpos gelados que se evaporam. Vestígios de uma época em que os planetas ainda não se haviam formado, os cometas são os últimos testemunhos do nascimento do Sistema Solar. Os gelos que os compõem encerram parcelas da nebulosa a partir da qual se formou o Sol e Planetas. A história dos cometas precede, pois, a dos planetas, tendo-se iniciado há mais de 4,5 M.a. a partir da nebulosa de poeiras e gases.

Para lá do espaço ocupado por *Júpiter* e *Saturno*, devido ao afastamento do Sol e das baixas temperaturas, os grãos de poeira da nebulosa primitiva estariam rodeados de uma camada de gelo de água e de gás carbónico. Por agregação de umas e outras, estas partículas originaram blocos maiores, compostos essencialmente de gelo e poeiras. Assim se formaram os cometas. Segundo o astrónomo americano *Fred Whipple* (1950), são bolas de neve suja,

isto é, gelo misturado com poeiras de rocha.. De formato irregular, os cometas têm uma cauda que varia entre a dezena de metros e várias dezenas de km.

Uma grande parte dos cometas foi captada pelos grandes planetas durante a sua formação e, posteriormente, as possantes forças gravíticas de Júpiter e Saturno perturbaram as trajectórias dos cometas restantes, ao ponto de os projectar sobre órbitas longínquas, da ordem de 40×10^3 a 100×10^3 u.a. do Sol (relembrar que Plutão se encontra a 40 u. a.).

Formaram, assim, uma nuvem esférica que envolve actualmente o Sistema Solar. Esta nuvem, descrita pela primeira vez pelo astrónomo holandês *Jan Hendrik Oort*, nos anos 1950, tomou a designação de "*Nuvem de Oort*". Entretanto, um certo número de cometas, situado ligeiramente além de Plutão, escaparam à influência dos planetas gigantes e ali permanecem no plano do Sistema Solar. Constituem o que hoje se designa pela *Cintura de Kuiper*, o nome do seu descobridor.

Um sistema complexo de atracções gravíticas de outras estrelas, perturba regularmente a trajectória de uma pequena parte dos cometas da *nuvem de Oort*. São desviados da sua órbita para caminharem em direcção ao Sol. A força gravítica de Neptuno produz efeito semelhante sobre os cometas da *cintura de Kuiper*. Mas enquanto os cometas de Oort apenas se acercam do Sol em períodos de vários séculos ou milénios, os de Kuiper regressam num intervalo inferior a 200 anos, período entre duas passagens pelo periélio (ponto da órbita mais próximo do Sol).

Mas, quando um cometa se aproxima a umas centenas de milhões de km do Sol, aquece. O gelo vaporiza-se gerando uma gigantesca atmosfera, cujo diâmetro pode atingir 1×10^6 km. Cheia de poeiras, aprisionadas no gelo há mais de 4,5 M a., esta atmosfera forma a cauda do cometa, visível a olho nu.

DATAS:

No Séc. IV antes da nossa era, Aristóteles emite a hipótese de os cometas serem de origem atmosférica.

No Séc. XVI, o sábio veronês Fracastoro nota que a cauda dos cometas está sempre orientada em direcção oposta ao Sol.

Em 1705, Edmund Halley publica a sua teoria sobre a priodicidade dos cometas.

Em 1950, Fred Whipple revela a verdadeira natureza dos cometas.

Em 1950, Gerard Kuiper prevê a existência de uma cintura de cometas para além de Plutão.

Em 1986, a sonda europeia Giotto fotografa pela primeira vez o núcleo de cometa, o Halley.

Em 1992, dois astrónomos americanos, David Jewitt e Jane LUU, descobrem o primeiro objecto da cintura de Kuiper.

1.4 -Acreção dos planetas (Allègre, 1987)

A teoria unanimemente admitida para a *acrecção* planetária era a da queda gravitacional. Todos os astrónomos e físicos concordavam quanto a este ponto. A nebulosa, transformada em poeira por esfriamento, teria sido concentrada em determinados locais. Aqui,

a força de atracção entre as partículas teria ultrapassado a agitação térmica, com tendência dispersiva, e a nebulosa ter-se-ia brutalmente contraído, num fenómeno de implosão. A formação de um planeta corresponderia a uma catástrofe, uma avalanche fortíssima de matéria que se concentraria num intervalo de tempo curto. A formação de um planeta seria, pois, idêntica à de uma estrela.

Todavia, a partir de 1940, a escola soviética, encabeçada por *O. Schmidt*, desenvolveu uma teoria diferente, segundo a qual:

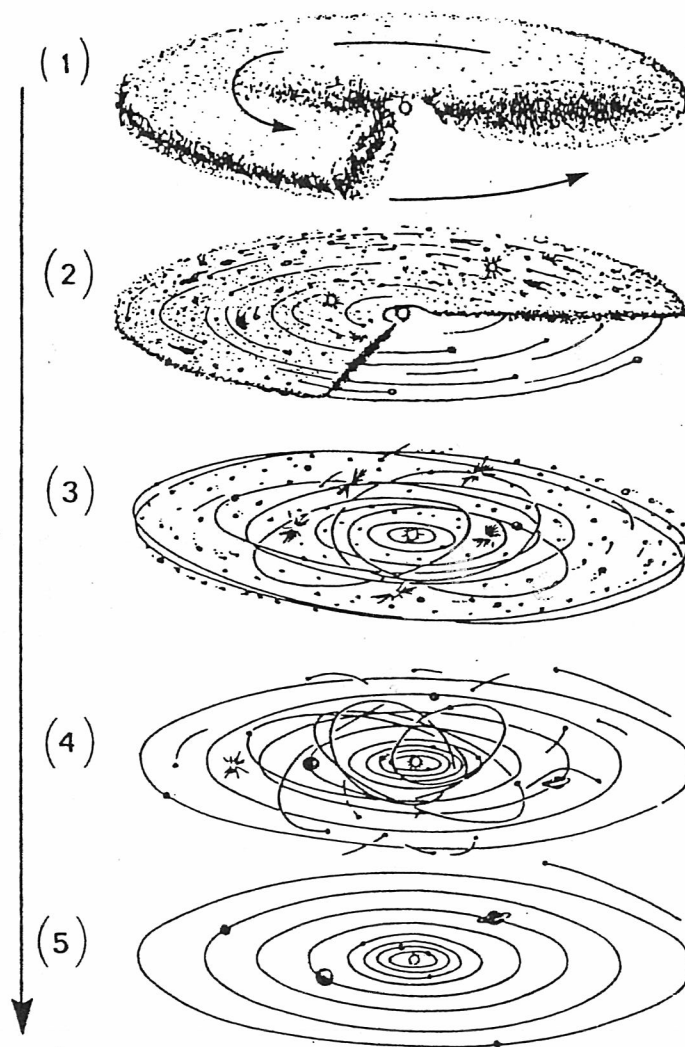


Fig.1.8 - Esquema da formação dos Planetas, em cinco etapas, segundo Schmidt

O fundamento da dinâmica do Sistema Solar (*S.S.*) é a existência de *órbitas quase circulares para os diversos planetas*. Se os planetas se tivessem formado por queda gravitacional deslocar-se-iam segundo trajectórias elípticas aleatórias. Teríamos, portanto, planetas circulando segundo elipses variadas, de obliquidade diferente e alongamento irregular. Não teríamos a regularidade que caracteriza o *S.S.*. A forma de obter órbitas circulares, segundo *Schmidt*, consiste em fazer, progressivamente, a *média* de uma infinidade

de órbitas elípticas. A partir deste raciocínio, *Schmidt* e os seus discípulos *Levin* e *Safronov*, desenvolveram a *teoria matemática da acreção progressiva*, (Fig 1.8):

- Os grãos sólidos aglomeram-se para dar origem a pequenas esferas, estas acretam-se para formar bolas que por sua vez se aglomeram em bolas maiores e, assim por diante, até à formação de um corpo de grandes dimensões. Assim, à medida que o processo se desenrola, o número de objectos diminui e a proporção de grandes corpos aumenta. Como se processa a acreção?

- No *S.S.* todos os corpos são móveis e giram em torno do Sol, em órbitas elípticas. Cada elemento sólido, cada *planetesimal*, tem a sua trajectória e velocidade, próprias. Quando dois planetesimais se encontram, se são do mesmo tamanho, podem colidir e saltar para novas direcções, pode a colisão ser tão forte que se pulverizem numa miríade de fragmentos que, por sua vez, continuem a viajar no espaço e podem, ainda, soldar-se para formarem um corpo maior (esta é a hipótese mais favorável à formação dos planetas). Se os planetesimais têm tamanhos diferentes, em regra, o mais pequeno é atraído pelo maior que vê assim a sua massa aumentar. É o caso de um meteorito que cai na Terra. A formação dos planetas é uma gigantesca batalha de bolas. Estas podem saltar, partir-se ou soldar-se, mas, o resultado final é uma bola-planeta que terá reunido em si todos os corpos menores das proximidades.

- Para que tal seja possível é necessário que essa bola-planeta atinja tamanho superior a 1 000 km de raio de molde a ser suficientemente plástica e assumir forma redonda sob o efeito combinado da rotação e da gravitação. *Phobos*, satélite de Marte, tem um raio de 15 km e a forma de uma gigantesca batata. A *Lua* com 1700 km de raio é esférica, bem como outros satélites e planetas. Todavia, *Mimas* e *Encélado*, com apenas 200 km de raio, são também esféricos. Só que são formados por gelo, material muito mais maleável do que as rochas.

1.5 -Crateras de impacto

Praticamente todos os planetas e correspondentes luas, onde a geodinâmica externa se encontre atenuada, por falta de erosão ou inacção da atmosfera, apresentam cicatrizes em número e dimensões variadas. Tais cicatrizes ou crateras são devidas ao impacto de corpos oriundos do espaço, também designados “bóides”.

A formação de *crateras de impacto* é, pois, o processo pelo qual uma superfície planetária é deformada como resultado da transferência de energia do bóide para aquela superfície. *Bóide* é definido como corpo de impacto, podendo tratar-se de um meteorito, um asteróide ou um cometa.

A dimensão das crateras varia de centenas de quilómetros a poucos metros. Os impactos esmagam, estilhaçam, arrancam fragmentos de rochas e poeiras, às vezes, de natureza vulcânica. O estudo das crateras foi realizado na Lua e tornado extensivo aos restantes planetas.

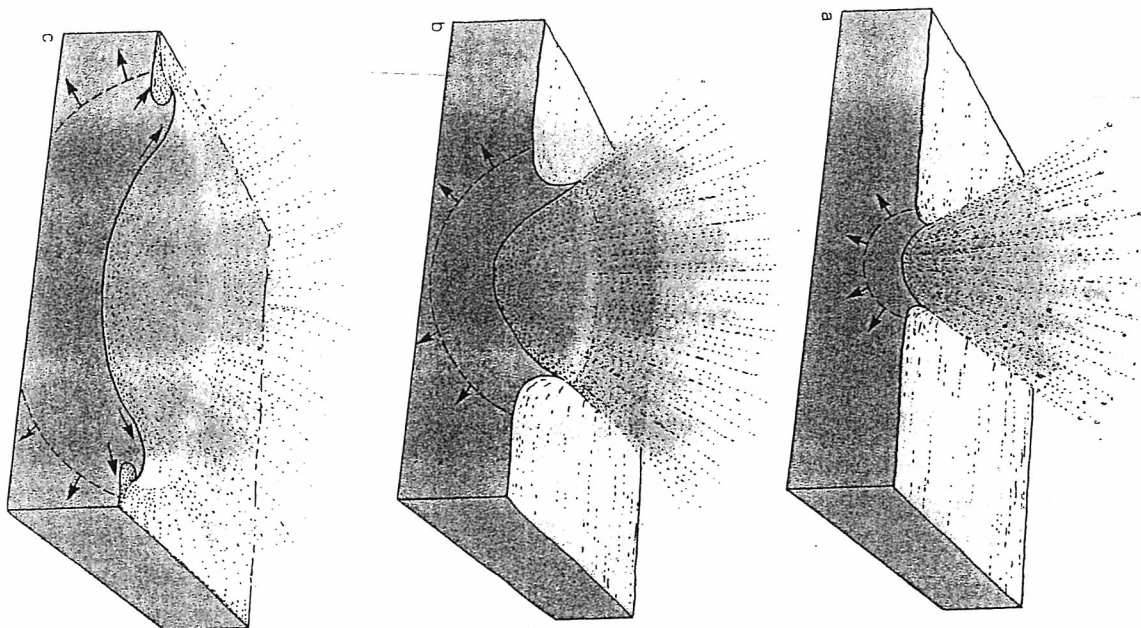


Fig. 1.9 (a) - Forma e aspecto de uma cratera de impacto: - a) O impacto do bólido projecta a grande velocidade, material da superfície; b) As ondas de choque produzem altas pressões no substrato, acompanhadas de fracturação e brechificação das camadas subjacentes; quando cessam as ondas compressivas, a descompressão projecta os fragmentos de rochas para fora da cratera; c) As camadas dos bordos ficam dobradas e vergentes para o exterior com a descompressão; a projecção de fragmentos forma um rebordo externo na cratera.

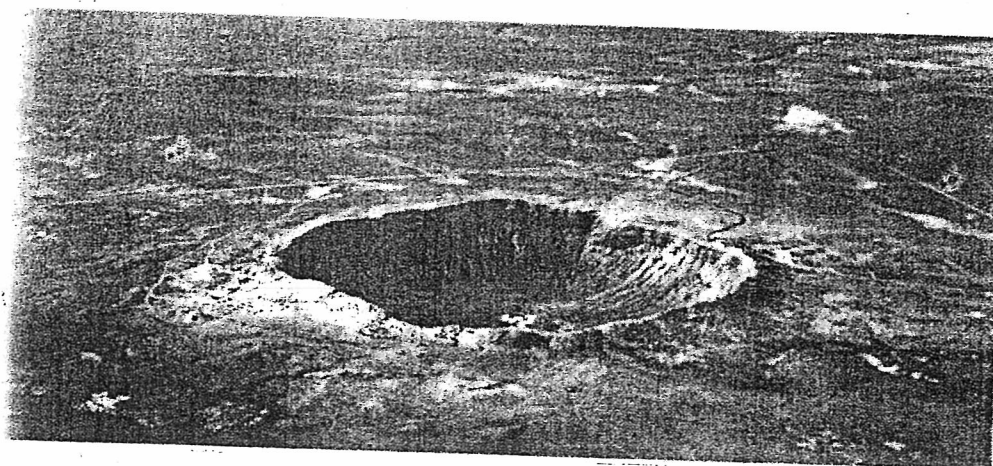


Fig. 1.9 (b) - Cratera de meteorito, próximo de Flagstaff, Arizona; a cratera foi originada pelo impacto de um bólido há cerca de 20.000 anos; tem 1.2 km de diâmetro e 200 m de profundidade.

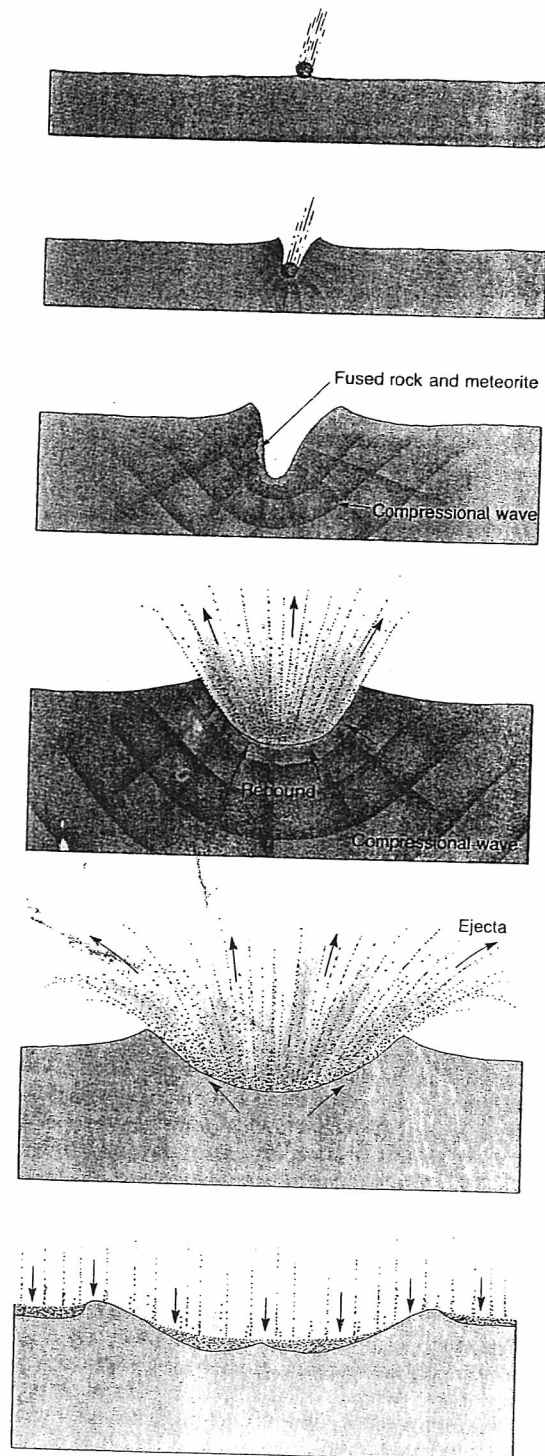


Fig.1.9 (c) - Esquema pormenorizado da formação das crateras de impacto

Todas têm estrutura análoga, (Fig. 1.9). Um relevo circular domina uma depressão central, no meio da qual se eleva um montículo. Dentro e nas imediações da cratera, o solo encontra-se coberto por uma toalha irregular de fragmentos rochosos, saibros, areias e poeiras. É a zona de influência da cratera.

1.6 - Meteoritos - Pedras do Céu (Allègre, 1987)

Sabe-se através de *Plínio, o velho*, que desde a antiguidade, os homens se interessam pela queda de estranhas pedras vindas do espaço - *os meteoritos*.

Desde a sua descoberta, estes aerolitos atraíram a curiosidade dos cientistas que em breve iniciaram a sua classificação. A discussão da sua origem inspira grandes debates e gera certa controvérsia nos finais do século XVIII. No entanto, apenas nos últimos trinta anos, é que a sua natureza, composição mineralógica e química e, bem assim, a idade radiométrica, têm sido correctamente investigadas e inseridas num contexto mais vasto como o da astrogeologia e astrofísica.

Aceita-se actualmente que os meteoritos são verdadeiras mensagens do Universo, mais precisamente, testemunhos da história primitiva do Sistema Solar e respectiva evolução. Na realidade, após longas viagens através do espaço, trazem-nos informações preciosas sobre as épocas recuadas, cujas marcas, à superfície da Terra, foram quase totalmente apagadas pela dinâmica externa deste planeta. Os meteoritos são lídimos testemunhos da origem do Sistema Solar e, consequentemente, da origem da Terra.

- Idade dos meteoritos

Posteriormente aos trabalhos de *Patterson (1950)*, ficou demonstrado que os meteoritos são as rochas mais velhas datáveis pelos métodos radiométricos. Além disso, têm a mesma idade da terra. *Patterson* foi pioneiro do método de datação cronológica **Pb / Pb** em microquantidades. Aplicou o seu método, adiante discutido com detalhe, a um número restrito de amostras, razão pela qual, a sua validade foi posta em dúvida. No período pós-II Guerra Mundial, com o avanço das técnicas analíticas, analisou e datou uma grande variedade de meteoritos não só, pelo método **Pb / Pb**, como através de outros métodos então desenvolvidos, tais como **Rb / Sr** e **K / Ar**. As conclusões iniciais de *Patterson* foram confirmadas, situando-se a idade dos meteoritos entre 4,55 - 4,5 G.a..

- Composição química dos meteoritos.

A importância dos meteoritos revela-se, ainda, pela composição química. Oitenta por cento dos meteoritos têm composição muito próxima da composição da coroa solar.

Como se determina a composição do Sol? A matéria constituinte do Sol, em permanente actividade radioactiva, brilha e emite radiações luminosas. Por espectrometria, pode analisar-se esta emissão de raios, decompondo a luz branca nos seus principais componentes. A cada estria do espectro óptico corresponde um elemento químico. Na realidade, cada elemento químico que entra na composição solar, ao ser excitado pela atmosfera quente do Sol, emite uma radiação característica e identificadora desse elemento. A intensidade das riscas corresponde à abundância do elemento. Desta forma, por espectrometria, os astrónomos puderam determinar a composição química do Sol.

Com excepção do hidrogénio e hélio, gases muito abundantes no Sol, mas, que não podem estar contidos numa rocha sólida como os meteoritos, as análises destas rochas são em tudo semelhantes às do Sol. Os meteoritos surgem, deste modo, como rochas fascinantes:- são primitivos em idade, sendo tão velhos como a Terra; e são primitivos na composição química, dado serem semelhantes ao Sol que contém 99% da massa do Sistema Solar e cuja composição é, sem dúvida, muito próxima da composição daquele conjunto designado "*nebulosa primitiva*".

Desta dupla verificação, até admitir-se que os meteoritos são amostras do produto sólido primitivo, a partir do qual se formaram os planetas internos e a Terra, medeia uma curta distância. Assim, se explica que os meteoritos caídos na Terra mereçam tantos cuidados:- dá-se-lhes o nome da localidade onde caíram; classificam-se segundo catálogos; conservam-se e expõe-se em museus. Estes albergam milhares de amostras ordenadas e classificadas.

- *Classificação dos meteoritos*

Os meteoritos podem dividir-se em dois grandes grupos que, por sua vez, admitem subdivisões:

CONDritos	{	condritos de enstatite	(E)
		condritos ricos em ferro metal	(H)
		condritos pobres em ferro metal	(L)
		condritos carbonados	(C)
ACONDritos (METEORITOS DIFERENCIADOS)	{	sideritos	
		tipo basáltico	

Condritos

A designação advém da existência, no interior destas rochas, de esférulas silicatadas denominadas condras. Esta estrutura não existe nas rochas terrestres.

Do ponto de vista mineralógico, os condritos constam de silicatos idênticos aos dos peridotitos terrestres e de ferro nativo. Os cristais de ferro estão dispersos nos silicatos, portanto, coexistem com eles. Verifica-se, além disso, que a porção entre ferro e silicatos, existente nos condritos, corresponde praticamente à que existe entre o *núcleo* e *manto* terrestre.

Ganha, portanto, consistência, a tese de que o material constituinte dos condritos representa o sólido a partir do qual a Terra se aglomerou em primeiro lugar e depois, se diferenciou. Uma hipótese simples pode ser considerada:

- O embrião terrestre aglomerou-se, ou o que é o mesmo, acretou-se a partir de um material condrítico. A seguir verificou-se uma diferenciação química que separou o ferro, concentrado no núcleo, dos silicatos dispostos em coroa, a formar o manto. Este é o esquema da *acrecção homogênea* que a estrutura dos condritos parece confirmar.

Por esta razão, os investigadores recorrem ao modelo condrítico para o estudo da Terra. Com efeito, os meteoritos constituem o material primitivo, transmitido intacto através dos tempos. O estudo detalhado desse material vai levar-nos a saber como se formou, como foi acretado e de onde é proveniente.

A distinção entre os condritos, (*Fig. 1.10*) depende da forma como o ferro que entra na sua composição se encontra oxidado ou não. O ferro encontra-se sob duas formas:- no estado metálico, ou então, ligado ao oxigénio e, neste caso, envolvido com ele nos compostos silicatados. (A metalurgia do ferro consiste, como sabemos, em colocar ferro oxidado num meio redutor, de forma a que rompa a sua ligação com o oxigénio e se possa isolar no estado metálico).

Na natureza, porém, o ferro nunca se encontra inteiramente no estado metálico e, dado existir sempre um pouco de oxigénio no meio, há sempre ferro oxidado. Isto é, uma parte encontra-se no estado oxidado e outra pequena parte, interligada àquela, no estado metálico. Inversamente, se medirmos a porção de ferro reduzido e de ferro oxidado, o valor obtido é um indicador das condições do meio, da abundância em oxigénio quando a rocha se formou. Esta propriedade foi utilizada por *Harold Urey* e *Harmon Craig* para classificar os condritos nos anos 1950.

Medindo em cada meteorito a porção de ferro metal e de ferro ligado aos silicatos, verifica-se que esta proporção é variável. Em certos condritos, todo o ferro se encontra no estado oxidado, não há partículas de ferro metal. Estes contêm também muito carbono, sendo, por isso, designados meteoritos *carbonados* (*C*). Noutros não existe ferro nos silicatos, são os condritos de *enstatite*, (*E*), mineral sem ferro. Entre estes dois ocorrem três grupos de

condritos com graus de oxidação variáveis, variando também o teor global de ferro (soma de ferro metal + ferro silicatado). Distinguem-se, assim, uma linha *rica em ferro* (*H*), uma linha *pobre em ferro* (*L*) e uma linha *muito pobre em ferro* (*LL*). Estão, desta forma, definidas as quatro classes antes sumariadas:- *E*, *H*, *L* e *C*, traduzindo uma formação em meios cada vez mais oxigenados. As diferentes variedades dependem, portanto, das condições de formação dos condritos. Medindo em cada meteorito a porção de ferro metal e de ferro ligado aos silicatos, verifica-se que esta proporção é variável. Em certos condritos, todo o ferro se encontra no estado oxidado, não há partículas de ferro metal. Estes contêm também muito carbono, sendo, por isso, designados meteoritos *carbonados* (*C*). Noutros não existe ferro nos silicatos, são os condritos de *enstatite*, (*E*), mineral sem ferro. Entre estes dois ocorrem três grupos de condritos com graus de oxidação variáveis, variando também o teor global de ferro (soma de ferro metal + ferro silicatado). Distinguem-se, assim, uma linha *rica em ferro* (*H*), uma linha *pobre em ferro* (*L*) e uma linha *muito pobre em ferro* (*LL*). Estão, desta forma, definidas as quatro classes antes sumariadas:- *E*, *H*, *L* e *C*, traduzindo uma formação em meios cada vez mais oxigenados. As diferentes variedades dependem, portanto, das condições de formação dos condritos.

Supondo então que a Terra se formou a partir de um material homogêneo do tipo condrito, pode saber-se onde se encontra a Terra num diagrama de *Urey-Craig* e quais foram as condições da sua formação, (*Fig. 1.10*).

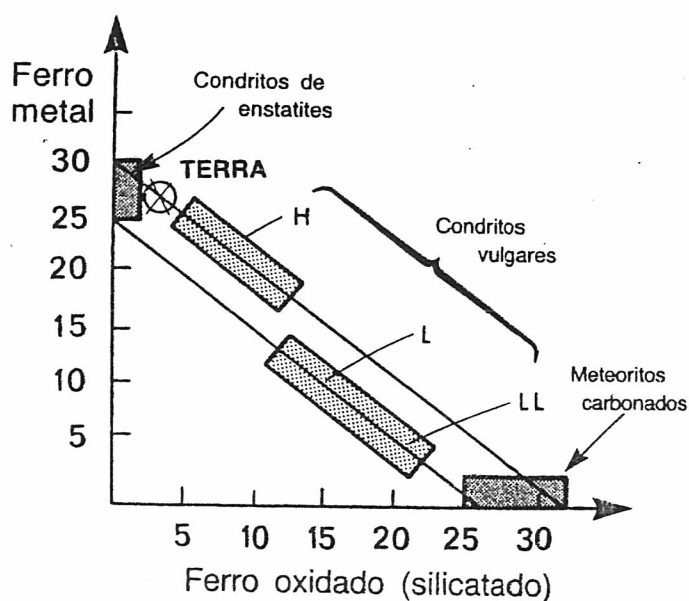


Fig. 1.10 - Classificação dos condritos, segundo Urey e Craig, a partir das proporções de ferro metálico e oxidado.

Considerando como ferro reduzido o ferro do núcleo e, como ferro oxidado, os teores em ferro das rochas do manto, a Terra fica situada entre os condritos *E* e *H*, isto é, num meio pobre em oxigénio livre, mas, não inteiramente desprovido de oxigénio.

Acondritos (meteoritos diferenciados)

Estes meteoritos são formados por silicatos, mas, ao contrário dos anteriores, não contêm condritas. A sua composição tem mais a ver com as rochas terrestres do que com o Sol.

Entre os acondritos, os mais frequentes são constituídos por pedaços de *basalto*, muito parecidos com os produtos de actividade vulcânica terrestre. Estas rochas são, no entanto, de origem extraterrestre. A idade que apresentam de 4,55 G.a., revela que se formaram a partir de lavas em fusão, algures no Universo, num planeta qualquer que, no início dos tempos geológicos, registava, também ele, actividade vulcânica intensa. Portanto, o vulcanismo, não só, é um fenómeno precoce, como também, não é exclusivo da Terra.

O outro tipo de acondritos são os *meteoritos de ferro ou sideritos*. São compostos por ferro metálico (ou melhor, uma liga de ferro e níquel). A composição química é, pois, muito diferente da do Sol ou dos condritos. Também é muito diferente dos acondritos basálticos. No entanto, a sua idade é a mesma, de 4,55 G.a., sendo por isso testemunhos do período arcaico do Cosmos.

Os acondritos, basálticos ou sideríticos, são como que o contrário dos condritos. Nestes encontramos uma mistura de silicatos e ferro nativo; naqueles, pelo contrário, o ferro e silicatos separam-se (poucos ou nenhuns silicatos nos meteoritos de ferro, nenhum ferro nativo nos acondritos basálticos).

Por esta razão, se chamam meteoritos diferenciados, isto é, meteoritos sujeitos a episódios de diferenciação química. Trata-se, portanto, de objectos mais evoluídos no sentido planetário do termo e menos primitivos que os condritos. A partir destas asserções, pode-se prolongar o esquema da acreção homogénea condritica, (*Fig. 1.11*).

- *Estádio 1*:- aglomeração, acreção de um material condritico muito misturado, localmente heterogéneo, mas, globalmente homogéneo.

Estádio 2:- fenómenos de fusão no interior do embrião planetário que empurram o ferro fundido para o núcleo, enquanto, na superfície, erupções vulcânicas emitem lavas basálticas em fusão.

- Origem dos meteoritos

Os meteoritos são os testemunhos mais primitivos do Sistema Solar. As questões que se nos colocam com maior premência são: -de onde vêm; e como se formaram.

Por uma análise balística directa das trajectórias, na altura da queda na Terra, verifica-se serem oriundos da região do Sistema Solar situada entre Marte e Júpiter, também designada *cintura de asteróides*. Como vimos anteriormente, é uma zona ocupada por um infinidade de objectos, variando em tamanho entre a pedra e o astro. O maior dos asteróides, *Ceres*, tem 1000 km de diâmetro.

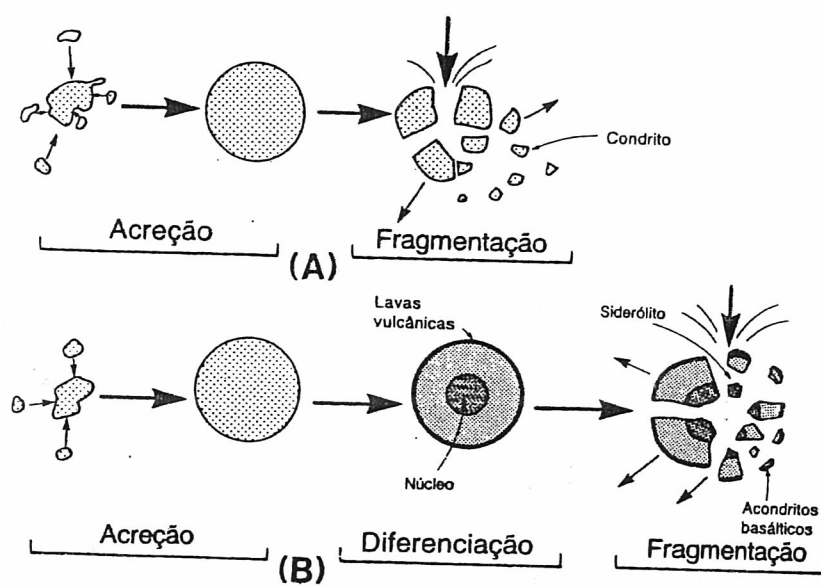


Fig. 1.11 - O quadro mostra a gênese dos meteoritos: A) gênese dos condritos; B) gênese dos meteoritos diferenciados.

Na cintura de asteróides, estes corpos rochosos circulam a grande velocidade, em órbitas muito próximas. Por esse facto, chocam com frequência, fragmentam-se, mudam de posição e, por vezes, abandonam a sua trajectória e vão chocar com a Terra ou outros planetas. Os meteoritos são, pois, fragmentos de objectos de maiores dimensões que os choques, na cintura de asteróides, libertaram. De onde vêm, porém?

Para *Platão*, seriam fragmentos do décimo planeta, o planeta de *Orchelt*, que faltava para dar satisfação à onnipotente presença do número dez e que a lei de *Bode* situava entre *Marte* e *Júpiter*, no exacto espaço da cintura de asteróides. Por muito excitante e conveniente que seja, esta hipótese não está de acordo com as observações:- i) a variedade química dos meteoritos implica origens diversificadas; ii) à excepção das zonas de choque, os minerais constituintes dos meteoritos não são formados a temperaturas e pressões muito altas, sendo portanto das zonas superficiais dos asteróides ou de corpos de fraco porte; iii) as velocidades de esfriamento dos meteoritos, calculadas através das propriedades de migração dos átomos, sob o efeito da temperatura (fenómeno designado *difusão*), verifica-se que estas velocidades são típicas de corpos bastante pequenos, inferiores ao tamanho da Lua.

Somos, pois, forçados a admitir que os objectos-pais dos meteoritos que se situavam na cintura de asteróides, eram em grande número e variados. Alguns destes objectos eram aglomerados de matéria primitiva e a sua fragmentação originou os condritos; outros eram já microplanetas, com núcleo central, um manto e actividade vulcânica, na superfície e a sua fragmentação deu origem aos meteoritos diferenciados.

Em alguns casos, estas fragmentações devem ter sido violentas e profundas, cindindo os corpos pelo cerne, como atestam os acondritos sideríticos. Coloca-se, agora, a questão cronológica:- em que altura se terá verificado este massacre; a fragmentação de objectos de tamanho razoável deu-se num único ou em vários episódios?

- Idades de irradiação dos meteoritos

A resposta às questões anteriores encontra-se na idade de irradiação dos meteoritos. Esta irradiação, designada cósmico-galáctica (*I.C.G.*) por oposição a outra menos energética emitida pelo Sol, deve-se ao bombardeamento do espaço cósmico por partículas de enorme energia. Destas, as mais numerosas e energéticas, são os *protões*, cuja fonte é exterior ao Sistema Solar.

Os protões de grande energia penetram na matéria induzindo reacções nucleares e a transformação de certos elementos, certos isótopos, noutros elementos, outros isótopos. Todavia, esta penetração nos corpos planetários é pouco profunda, não excedendo alguns decímetros. Deste modo, uma rocha isolada no Cosmos é submetida a bombardeamento, ao passo que o interior de um asteróide é protegido desse bombardeamento. Medindo então a quantidade anormal de isótopos, é possível determinar, pela proporção desse isótopos, o tempo durante o qual um meteorito esteve submetido à irradiação cósmico-galáctica. É aquilo a que chamamos *idade de irradiação*. Traduz, portanto, a idade de fragmentação do meteorito, ou seja, há quanto tempo é uma rocha livre.

Os resultados destas datações demonstraram que os meteoritos silicatados, condriticos ou acondriticos, têm 20 - 150 M.a., enquanto os meteoritos de ferro, variam de 50 M.a. a 2,0 G.a.. Ora, como todos estes meteoritos têm idade de formação 4,55 G.a., as idades de exposição indicam, assim, que as fragmentações se operaram muito depois do período primitivo. A variabilidade das idades de exposição e duração máxima indicam que colisões e fragmentações se produzem, sem interrupção, há vários milhares de milhões de anos e são normalíssimos entre asteróides. Mais ainda, o facto de os meteoritos de ferro serem mais antigos, significa que são mais duros e resistentes do que os meteoritos silicatados, particularmente, os condritos, mais frágeis e facilmente pulverizáveis. Por esta razão, têm idades de irradiação mais jovens.

Com o presente conjunto de dados é possível compreender duas situações relativas aos asteróides:

- Naquilo que é, actualmente, a cintura de asteróides, não existiu um planeta único, como já foi referido.
- Na cintura de asteróides, múltiplos corpos planetários iniciaram o processo de acreção. Todavia, nenhum deles atingiu dimensões significativas que lhe permitissem captar todos os restantes. Então o processo de acreção como que “derrapou” e acabou por inverter-se. Os corpos em vez de se juntarem para formar um planeta, entraram em choque, partiram-se e fragmentaram-se para dar origem ao enxame de asteróides, tal como hoje existe entre Marte e Júpiter.

Há, pois, uma transição contínua de equilíbrio, extremamente delicado, entre acreção e fragmentação. Uma é o encontro construtivo de objectos espaciais, a outra a sua colisão destrutiva. Porquê, em todo o Sistema Solar, apenas, numa órbita planetária não preponderou o equilíbrio construtivo da acreção? Terá sido a proximidade de Júpiter (já formado) a perturbar o processo normal?

De igual modo, em redor dos grandes planetas, há uma série de satélites e anéis formados por uma infinidade de objectos rochosos de reduzidas dimensões. Também aqui, a fragmentação substituiu a acreção. Os anéis são, à escala de um planeta como *Júpiter* ou *Saturno*, os equivalentes daquilo que os asteróides são para o Sol.

- Viagens interplanetárias

O Antártico, na qualidade de grande deserto gelado, revelou-se um grande coleccionador de meteoritos. Se, no tapete branco e gelado, repousa uma rocha, ela é, sem dúvida, proveniente do espaço. Várias equipas de investigadores se aventuraram nesta exploração, tendo obtido resultados surpreendentes.

Americanos descobrem no Antártico um meteorito com características químicas distintas dos habituais condritos e acondritos. Composições isotópicas de gases raros e o xénon 129 (isótopos produzido pela radioactividade extinta do iodo 129), contidos nesse meteorito, conduziram *Rober Pepin*, da Universidade do Minesota, à verificação de que esses teores eram idênticos aos que a *missão Viking*, acabara de medir em *Marte*. Acresce que a determinação da composição isotópica do azoto, uma das assinaturas características da atmosfera de Marte, confirmam inteiramente esta hipótese.

Por associação de ideias, os investigadores *Richard Beker* e também *Pepin* debruçaram-se sobre os meteoritos de tipo acondrítico, *Nakla* e *Shergoty*, encontrados no Egipto. As duas amostras têm a particularidade de possuir idade de 1,4 M.a. ao passo que todos os meteoritos conhecidos apresentam idades radiométricas de 4,55 G.a.. O respectivo estudo mostrou que são idênticos ao meteorito encontrado no Antártico e têm a mesma assinatura química e isotópica do meteorito marciano.

É, pois, forçoso admitir que, em dada altura, a colisão de um corpo espacial arrancou um pedaço da superfície de Marte e projectou-o no Cosmos. A sua velocidade de expulsão era superior à velocidade de escape de Marte, ou seja, de 5 km/ segundo, e este fragmento rochoso foi, assim, lançado para o espaço, segundo uma órbita complexa. Graças ao método das idades de exposição, constatou-se que a viagem durou alguns milhões de anos, acabando o fragmento por cair no Egipto.

Mais recentemente, foi ainda encontrada no Antártico, uma autêntica rocha lunar. A verificação, neste caso, foi facilitada pela enorme colecção de rochas da Lua.

Temos, assim, de admitir que um impacto violento sobre Marte, Lua ou outro planeta, pode projectar no espaço fragmentos que escapem aos respectivos campos gravíticos, iniciando desde há muito tempo as viagens interplanetárias. Os meteoritos não são exclusivos da cintura de asteróides. A existência de choques com tal violência e eficácia, capazes de extrair pedaços de planetas, foi incentivo à formulação de hipóteses ousadas:

- A Lua seria um fragmento gigante arrancado à Terra por um impacto posterior à diferenciação em núcleo e manto. Explicar-se-ia, desta forma, o fraco teor em ferro da Lua. O choque induziu a vaporização dos elementos voláteis, o que explicaria, ainda, a sua fraca presença nas rochas lunares. A Lua seria, portanto, filha da Terra, arrancada à força. Esta é a hipótese defendida por *Heinrich Wanke*.

- Vénus gira em sentido contrário e muito lentamente. Para os defensores dos grandes impactos, a explicação é simples. Inicialmente, o planeta girava no sentido normal. Teria sido atingido por um bólido cósmico que travou o seu eixo como se fosse um pião. A rotação, tornada retrógrada, vai abrandando lentamente e voltaria ao normal dentro de alguns milhares de milhões de anos.

1.7 - História comparada dos planetas.

Não é possível fazer história sem a cronologia dos factos. Em planetologia, foi possível, como vimos antes, estabelecer uma curva cronológica baseada na contagem de crateras de impacto e aferida pelas datações radiométricas de rochas da Lua, (*Fig. 1.12*). A partir daqui atribuíram-se idades absolutas aos terrenos e executaram-se cartas dos principais planetas que contam a história destes planetas. Assim:

- A actividade “geológica” da *Lua*, essencialmente, de origem interna, terminou há cerca de 3,0 G.a. com o preenchimento dos mares por lavas basálticas.

- Apesar da curva de contagem de crateras levantar alguns problemas, relativamente a *Mercurio*, a sua actividade foi muito primitiva tendo cessado há cerca de 4,0 G.a., quando a Lua se encontrava em plena actividade.

- *Vénus*, onde a sonda *Magalhães* detectou actividade vulcânica recente, parece ser um planeta vivo com dorsais oceânicas e continentes, como a Terra. É o planeta irmão da Terra.

- A actividade de *Marte* parece ter culminado há cerca de 2,0 G.a com a formação de grandes vulcões, em escudo, como *Tharsis* e *Nix Olympus*. Os tempos recentes são caracterizados, apenas, por erosão superficial de origem fluvial ou eólica, isto é, devido à dinâmica externa.

- Pelo contrário, os *meteoritos, condriticos ou acondriticos*, encerram uma história fascinante anterior a 4,4 G.a. e atravessaram os tempos e espaço cósmico sem alterações significativas, legando-nos informação preciosa sobre os estados primitivos da matéria no Sistema Solar.

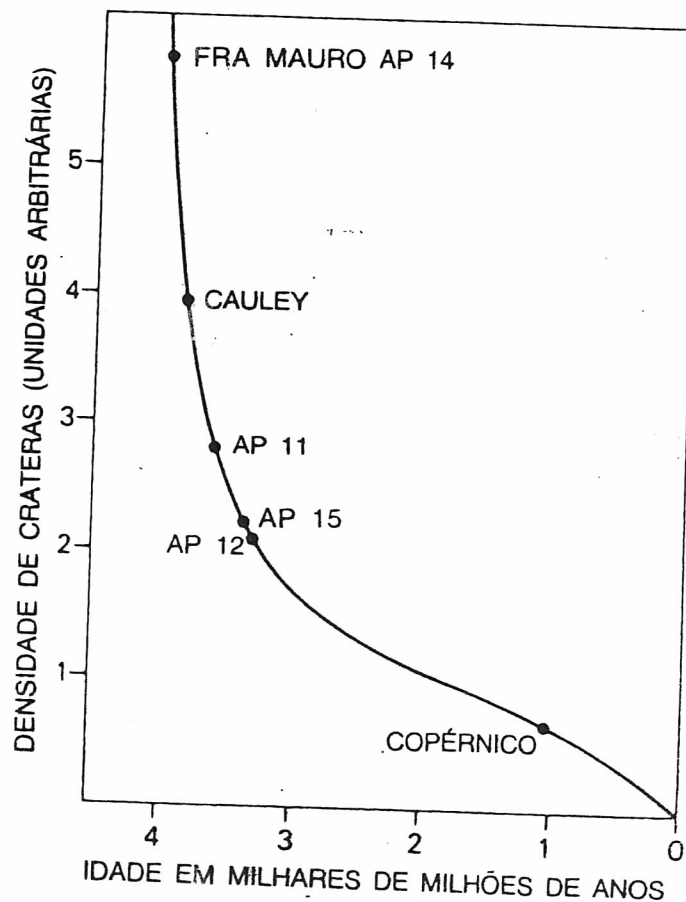


Fig. 1.12 - Curva cronológica obtida a partir da contagem de crateras de impacto. A densidade das crateras lunares diminui exponencialmente em função da idade. O diâmetro dos meteoritos, responsáveis pela formação das crateras, podia atingir 100 km e uma massa igual à de um continente terrestre. Na terra, a geodinâmica externa apagou quase na totalidade os traços dos bombardeamentos de meteoritos.

Desta análise simples, retira-se a certeza de que os planetas e respectivos satélites estabilizaram em estádios diversos da sua evolução. Os investigadores desta área do conhecimento têm sido seduzidos pela ideia redutora de reconstituir a história da Terra a partir do aprofundar de conhecimentos sobre os diversos corpos do Sistema Solar, especialmente, os meteoritos. Este posicionamento mental assenta na premissa de que a filogénese planetária imita a ontogénese terrestre.

Tal abordagem baseia-se, sem dúvida, numa enorme simplificação, assumida na ânsia de atingir rapidamente resultados. Com efeito, a história de cada planeta é peculiar e de cada um deles se retira informação preciosa susceptível de ser transposta para a Terra. Mas, os raciocínios sobre estes conhecimentos devem ser estabelecidos comparativamente e não sob a forma de duplicações rígidas. Na realidade, as leis da mecânica que regem o Universo produziram *objectos diferentes* em tamanho, comportamento e composição. Ao estudarmos os diferentes planetas constatámos diferenças de tamanho e constituição interna, analisemos agora a diversidade de fontes de energia e composição química para melhor entendimento da *diversidade dos planetas*.

1.8 -Estruturas comparadas dos planetas

Através da gravimetria, foi possível no séc. XIX determinar o diâmetro, massa e densidade da Terra, com uma aproximação razoável e, bem assim, verificar como essa massa se encontra distribuída no seu interior, através do *momento de inércia*. Estes dados foram posteriormente confirmados e rectificados pela sismologia. Por aplicação dos mesmos princípios mecânicos e geométricos, a exploração espacial determinou estas mesmas grandezas para os planetas. Pela mesma via, se pode architectar a *estrutura interna* dos planetas e satélites, (Fig.1.13):

- Aceita-se que os planetas são constituídos por camadas de densidade crescente no sentido do interior. Quanto aos materiais que os compõem:- entre os sólidos seriam o ferro, óxidos metálicos, sulfuretos de ferro e silicatos; para os gases e atmosferas, os componentes detectados na exploração espacial, são a água, azoto, gás carbónico, amoníaco, metano, hidrogénio e hélio.

- A estrutura interna dos planetas é diferente de planeta para planeta ou entre satélites. Não existem dois planetas em que as camadas internas tenham a mesma dimensão ou composição.

- Verifica-se, pelo contrário, uma zonalidade partindo do Sol:- *Mercúrio* é denso, rico em ferro o que origina um núcleo desenvolvido e não tem atmosfera; *Vénus*, *Terra* e *Marte* encontram-se divididos em núcleo, manto e revestimento atmosférico fraco, e os satélites, ou estão ausentes ou são pouco numerosos; os planetas gigantes, *Júpiter* e *Saturno*, em que o campo de gravidade retém o hidrogénio e hélio, têm, em contrapartida, atmosferas gigantes e

um enxame de satélites que se distribuem, em redor dos respectivos planetas, por ordem de densidade.

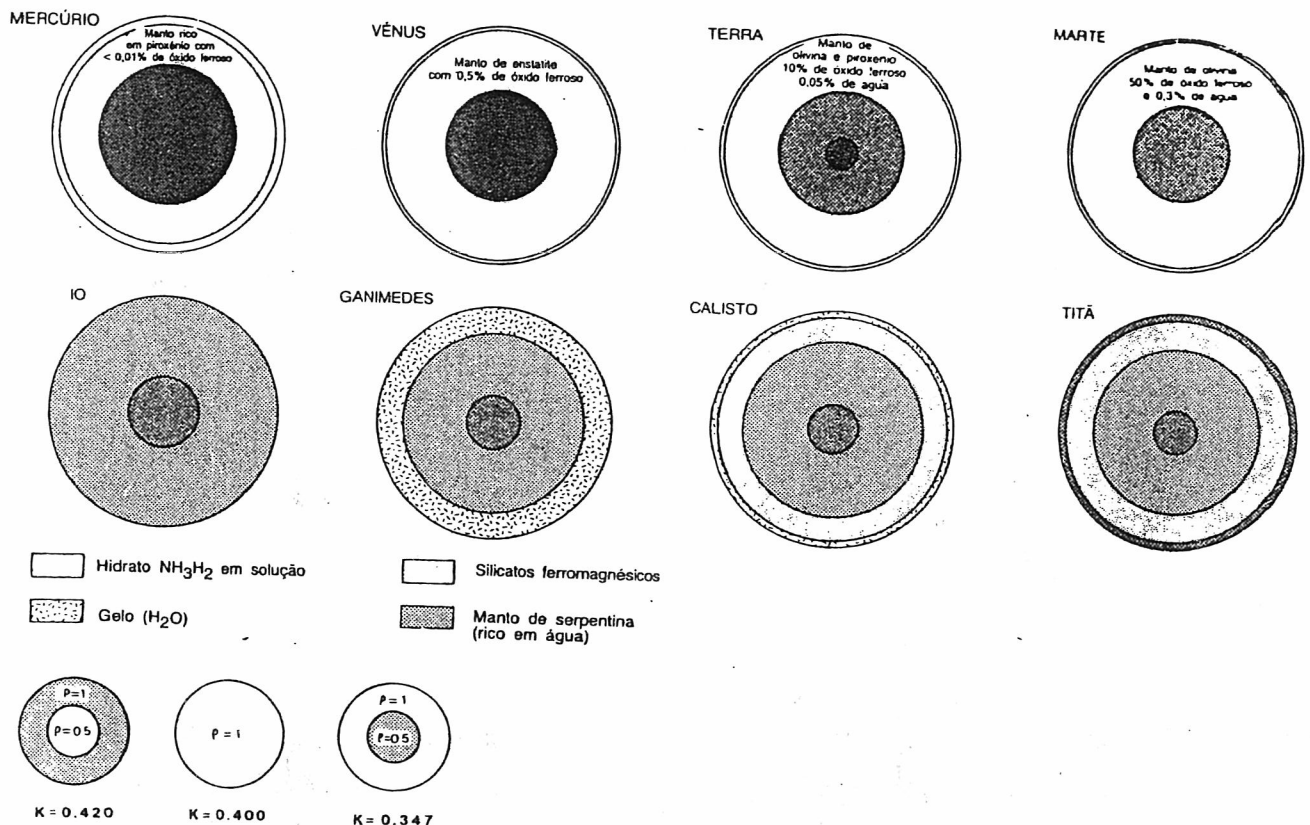


Fig. 1.13 - Estruturas internas de alguns planetas e satélites determinadas pela sua densidade, pelo momento de inércia e admitindo a natureza de alguns constituintes essenciais (segundo J. Lewis).

A mesma diversidade é também patente quando se compara a *composição química das atmosferas*: - a atmosfera de *Vénus* e *Marte* é rica de gás carbónico; na da *Terra* domina azoto e oxigénio; na de *Júpiter* e *Saturno*, hidrogénio e hélio; e na de *Titã*, o metano e amoníaco.

Quanto à *meteorologia* tudo é igualmente diferente: - nuvens de água na *Terra*; nuvens ácidas e corrosivas em *Vénus*; de petróleo (metano, etileno e acetileno) em *Titã*; e meteorologia de hélio em *Júpiter* e *Saturno*.

No respeitante ao *vulcanismo*, assiste-se à mesma diversidade: - na *Terra* e *Marte* o vulcanismo é tipo silicatado, desencadeado por uma energia interna dos planetas com origem, essencialmente, na desintegração radioactiva de certos elementos como urânio, tório, potássio, árgon, etc.; na *Lua*, a energia necessária à actividade vulcânica, advém dos impactos de asteróides, sendo também de natureza silicatada; em *Io*, o vulcanismo é sulfuroso e resulta da

atração que *Júpiter* exerce sobre o satélite; nos outros satélites dos planetas gigantes, *Europa*, *Encélado* e *Ganimedes*, ocorre um *vulcanismo-fonte*, dado tratar-se de gelo fundido.

Finalmente, quanto à existência de *campo magnético*, subsistem as diferenças:- a *Terra*, *Mercurio* e *Júpiter* apresentam campo magnético notável, embora de magnitudes diferentes; em *Vénus*, *Marte* e nos *satélites de Júpiter*, o campo magnético é fraco.

O estudo sistemático dos planetas revela que, apesar de uma origem comum a partir da nebulosa quente, apresentam grande diversidade nos domínios que acabámos de considerar. Esta diversidade foi introduzida na fase inicial da acreção por *diferenciação química*. Como bem assinalou *Urey*, compreender a formação do Sistema Solar não é apenas um problema de mecânica, é também um problema de química. A mecânica rege os movimentos sem dúvida complexos dos corpos planetários que se pautam pela regularidade da física determinista e a química introduz a diversidade no Sistema. Para compreender a formação do Sistema Solar temos de conjugar *Newton* e *Mendeleiev*.

1.9 - A Nebulosa Quente (*Allégre*, 1987)

Urey e os seus discípulos influenciaram a comunidade científica no sentido de construir uma *teoria unificada*, que integrasse todos os conhecimentos reunidos sobre o Sistema Solar. Trata-se da *Teoria da Condensação da Nebulosa Proto-solar*:

- A nebulosa tem a forma de disco (proto-solar), girando sobre si mesmo e começa por engrossar no centro, tal como era admitido por *Kant* e *Laplace*. A nebulosa seria um gás quente com a composição química do Sol actual, dado que o Sol reúne 99,9 % da massa do Sistema Solar.

- A bola central tende a contrair-se por acção gravítica, aquecendo cada vez mais e a sua temperatura depressa ultrapassa a do disco proto-solar. O disco, porém, emite luz, perde energia e esfria. Quando a temperatura do gás, atinge a temperatura de condensação, formam-se partículas sólidas e passamos a ter uma mistura de gás e poeiras. Quando estas atingem densidade elevada, aglomeram-se e formam objectos sólidos com tamanho de pequenas esferas, os *planetesimais* a que antes nos referimos, (*Fig. 1.14*).

- O esfriamento que origina estes grãos sólidos não é uniforme em todo o disco. As regiões situadas na periferia do disco e no espaço intersidereal arrefecem mais rapidamente do que as regiões próximas da *nova estrela* que é o *protosol*. Num dado instante, os gases do disco encontram-se a diferentes temperaturas. Com o abaixamento da temperatura condensam, sucessivamente, os minerais de mais elevado ponto de fusão. Assim, quando baixa a temperatura do gás, vão condensando, sucessivamente:- óxidos refractários de (*Al*, *Fe*, *Mg*, *Ti*, etc.), ferro nativo, seguidos por silicatos (olivina, piroxenas, plagioclase cálcica, etc, por ordem decrescente de ponto de fusão).

- Com os gases assiste-se a uma situação análoga. *John Lewis* calculou a sequência de condensação, a baixas temperaturas. Mostrou que, a partir de gás de composição solar, a 0° C condensa gelo. Seguem-se, a temperaturas sucessivamente mais baixa, CO₂, CH₄ e NH₃, tendo encontrado todos os componentes observados nos Planetas Gigantes e respectivos satélites.

Pode, deste modo, explicar-se a regionalização química do Sistema Solar:

Exemplo 1 - Na fase de condensação da nebulosa, perto do Sol, à distância de Mercúrio, a temperatura é de 1200° C, ao passo que, à distância da Terra, é de cerca de 1000° C. Ao nível de Mercúrio, por consequência, teremos grãos sólidos compostos de ferro, óxidos de alumínio e um pouco de silicatos, enquanto, ao nível da Terra, condensariam grãos de ferro e, também, abundante olivina, serpentina, piroxenas e silicatos hidratados. Supondo que os grãos sólidos se aglomeram para formar um planeta, Mercúrio será um planeta rico em ferro, contendo um pouco de óxido de alumínio e silicatos, ao passo que a Terra conterá algum ferro e importante porção de silicatos. Teremos, pois, dois planetas com composições químicas diferentes.

Exemplo 2 - Analisemos agora a diversidade dos planetas ao nível dos componentes gasosos. No estágio inicial de formação do Sol, tal como todas as estrelas em formação, emitiu um vento de partículas muito violento, denominado *T-Tauri*, como se referiu antes, que expulsou todos os gases presentes no Sistema Solar próximo. Permanecem nas suas órbitas, os grãos sólidos aglomerados sob a forma de planetesimais. Como este episódio teria lugar numa altura em que a temperatura à volta de *Mercúrio* seria de cerca de 1100° C, este planeta comporta, apenas, ferro e um pouco de silicatos. A região de *Vénus* encontrar-se-ia então a uma temperatura de 500° C, sendo, por isso, a proporção de silicatos, relativamente ao ferro, mais importante neste planeta. No caso da *Terra*, situada numa zona ainda mais fria, aglomerou algum ferro e uma porção elevada de silicatos contendo água. Em *Marte*, a proporção de ferro é muito baixa, relativamente aos silicatos e, também, sulfuretos que tiveram ensejo de se condensar.. Só se atingirá o nível de condensação do gelo, na região dos planetas gigantes. Ao nível destes planetas, todos os elementos gasosos da nebulosa, para ali deslocados por aquele vento de partículas, se condensam.

- *Acreção homogénea e heterogénea*

Quimicamente, os Planetas Gigantes são análogos ao Sol. Todavia, o seu tamanho é insuficiente para que se tivessem transformado em *estrelas*, e isto acontece por o aquecimento gerado pela contração não atingir valores suficientes para desencadear reacções nucleares. Em contrapartida, é elevado bastante para estabelecer um gradiente térmico e originar uma diferenciação em zonas onde os diferentes satélites se vão condensar. O zoneamento da condensação repete-se como havia acontecido com o Sol:- o satélite *Io*, mais próximo de

Júpiter, é formado por um núcleo de rochas e alguma água à superfície; *Europa*, *Ganimedes* e *Calisto* contêm poucas rochas, muita água e talvez um pouco de metano e amoníaco misturados com o gelo. Quanto a *Saturno*, sabemos que os satélites mais próximos, *Tétis*, *Encélado* e *Dione* são essencialmente compostos de gelo, enquanto *Titã* comporta mais metano, etileno e acetileno do que amoníaco, o último a condensar.

Falta explicar a presença de atmosfera em *Vénus*, *Terra* e *Marte*:

Hipótese da *acrecção homogénea* de *John Lewis*. - Admite que os gases são capturados pelos sólidos e aglomerados em conjunto com eles. Seriam libertados em fenómenos secundários como o vulcanismo que, como sabemos expulsa grandes quantidades de gás. Trata-se, pois, de uma aglomeração homogénea, uniforme, para dada região da nebulosa.

Hipótese da *acrecção heterogénea* de *Clarke* ou *Turekian*. - Estes autores fazem iniciar a acreção na condensação. Na fase inicial, logo que o ferro se condensa, aglomera-se num núcleo, os silicatos condensados aglomeram-se em redor do núcleo de ferro, formando os corpos planetários, e, finalmente, os voláteis condensados sob a forma de gelo, vão originar as atmosferas. O vento *T-Tauri*, da fase proto-solar, fez terminar o fenómeno condensação-aglomeração nos Planetas Internos e expulsou para o espaço a maior parte das suas atmosferas.

A hipótese da *acrecção heterogénea*: - i) *Explica bem* o défice da Lua em ferro. A Lua ter-se-ia condensado numa região mais distante e, portanto, mais fria, do disco proto-solar. O seu teor em ferro seria, então, mais fraco, tal como o da *Terra* é menor que o de *Mercúrio*. ii) *Explica mal* - a existência de atmosfera ténue nos Planetas Interno, para os quais não é fácil conceber uma origem primária desta atmosfera; a existência de abundantes condritos, testemunhos evidentes de uma acreção homogénea; e, por último, também explica mal a presença de feldspatos, minerais comuns a todos os corpos planetários sólidos, mas, excluídos da sequência de condensação directa a partir da nebulosa.

Somos forçados a assumir uma posição de equilíbrio entre as duas teorias.

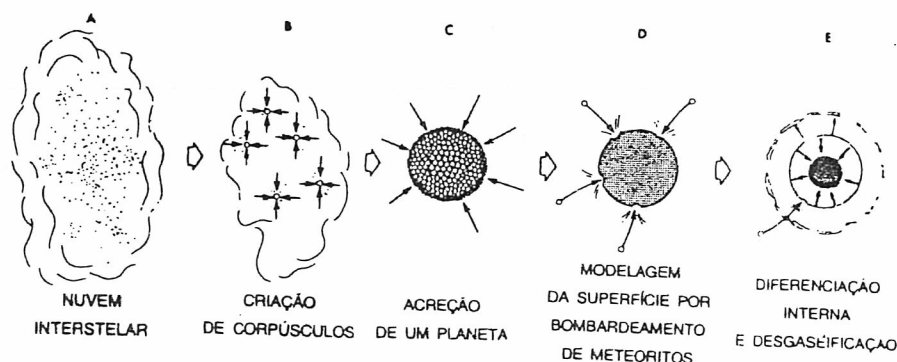


Fig. 1.14 - O esquema representa a formação e evolução dos planetas