

PROJETO
DE ENSINO
DE FÍSICA
IFUSP - Instituto de Física da Universidade de São Paulo
MEC/FAE /PREMEN

12

Gravitação

Mecânica



MEC/FAE/PREMEN

PEF — PROJETO DE ENSINO DE FÍSICA, constituído de quatro conjuntos destinados ao Ensino de 2.º Grau, foi planejado e elaborado pela equipe técnica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP) mediante convênios com a FAE e o PREMEN.

Coordenação

Ernst Wolfgang Hamburger
Giorgio Moscati

Mecânica

Antonia Rodrigues
Antonio Geraldo Violin
Diomar da Rocha Santos Bittencourt
Hideya Nakano
Luiz Muryllo Mantovani
Paulo Alves de Lima
Plínio Ugo Meneghini dos Santos

Eletricidade

Eliseu Gabriel de Pieri
José de Pinto Alves Filho
Judite Fernandes de Almeida

Eletromagnetismo

Jesuina Lopes de Almeida Pacca
João Evangelista Steiner

Programação Visual

Carlos Egidio Alonso
Carlos Roberto Monteiro de Andrade
Ettore Michele di San Fili Bottini
João Baptista Novelli Júnior

Fotografia e Reproduções

José Augusto Machado Calil
Washington Mazzola Racy

Secretaria e Datilografia

Carlos Eduardo Franco de Siqueira
Janete Vieira Garcia Novo

Linguagem

Claudio Renato Weber Abramo
Maria Nair Moreira Rebello

Construção de Protótipos

José Ferreira
Voanerges do Espírito Santo Brites

Desenho Industrial

Alessandro Ventura

Colaboraram o pessoal da Secretaria, Oficina Gráfica, Administração, Oficina Mecânica e Oficina Eletrônica do IFUSP.

IFUSP: Caixa Postal 8 219, São Paulo — SP

CAPA

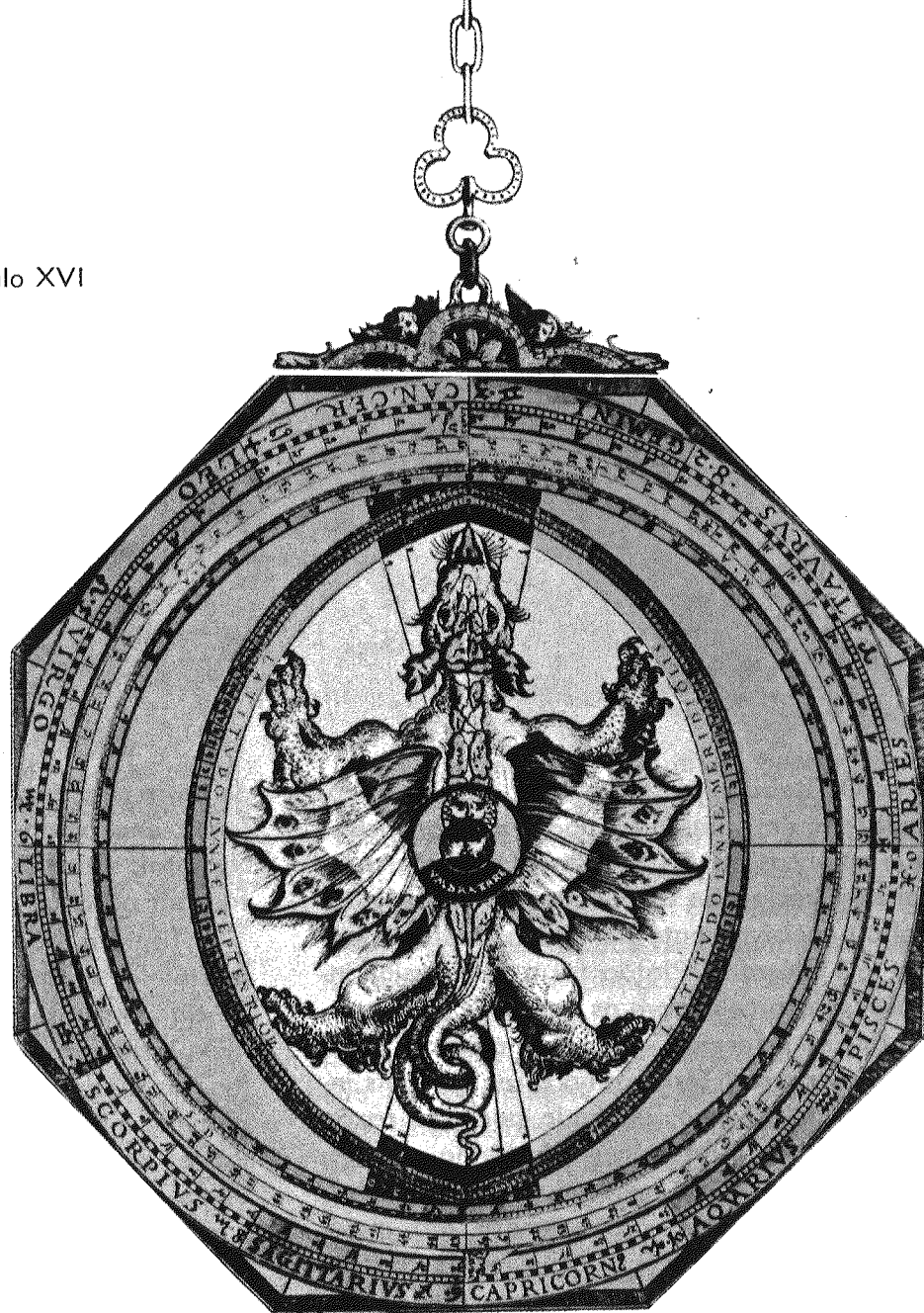
Astronauta — Claudio Tozzi (1969). Um dos problemas da exploração

espacial é a "ausência de peso" ou imponderabilidade a que os astronautas ficam sujeitos em suas missões. A pressão arterial é afetada e a densidade óssea diminui, voltando entretanto ao normal depois do retorno à Terra. O metabolismo do cálcio é afetado, de modo que em futuras missões espaciais mais longas haverá perigo de atrofia óssea e de trombose arterial.

SUMÁRIO

Gravitação-	
1. A lei da gravitação universal	12-5
2. Exercícios de aplicação	12-8
3. Verificação da lei gravitacional no movimento de um satélite	12-10
4. Energia potencial do satélite	12-13
5. Cálculo da energia potencial do satélite	12-17
6. Imponderabilidade	12-18
Leitura Suplementar	
O Universo em que vivemos	12-21

Instrumento usado no século XVI para determinar as posições da Lua em relação aos signos do Zodíaco.

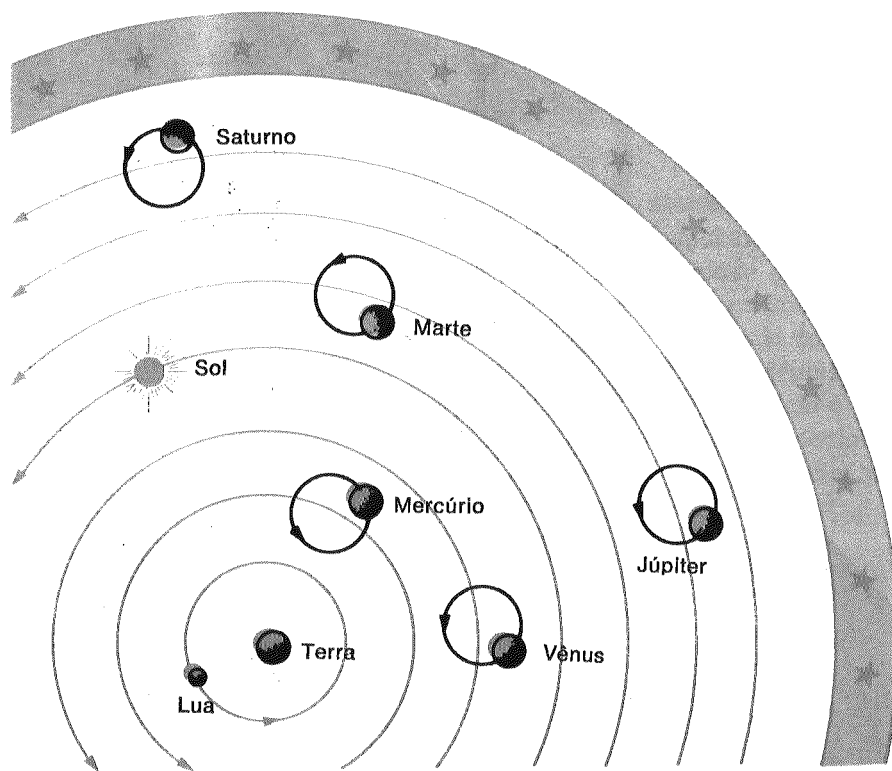


Gravitação

O céu sempre foi motivo de fascinação e interesse para o homem. Chineses, indianos e as populações que habitavam as regiões consideradas como o berço da civilização ocidental — a Mesopotâmia, o Peloponeso, o Norte da África, o Oriente Médio — observaram as estrelas durante séculos. Entretanto, além de alguns esparsos registros chineses e textos indianos de cunho religioso e fraseologia obscura, os únicos documentos que che-

garam aos nossos dias e que se referem às atividades astronômicas na Antiguidade são tabuinhas cuneiformes babilônias, datadas de época relativamente recente: 700 a.C.

O exame desses textos revela que os babilônios faziam observações sistemáticas, que lhes permitiam prever acontecimentos astronômicos (eclipses solares e lunares), efetuar medidas das translações planetárias etc.



O sistema ptolomaico; a Terra situa-se imóvel no centro do Universo; à sua volta movem-se a Lua e os planetas e além de Saturno está a esfera das estrelas fixas. Por ter acreditado que as órbitas dos corpos celestes deveriam ser circunferências perfeitas, Ptolomeu foi levado a crer que os planetas se movessem em uma pequena circunferência, cujo centro descreveria uma órbita circular em torno da Terra.

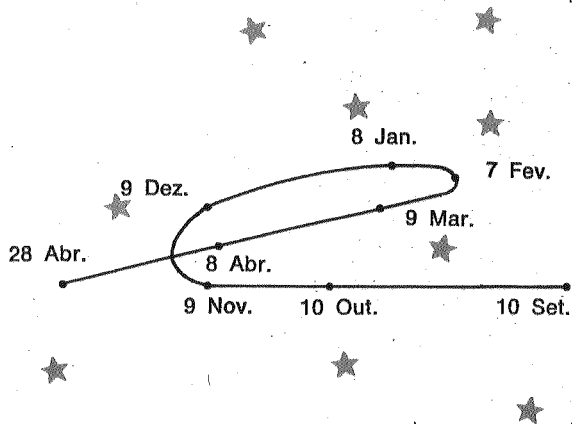
Os babilônios, entretanto, não se preocuparam em construir modelos geométricos que explicassem os movimentos dos astros; foi na Grécia que a atenção dos filósofos se voltou decisivamente para essa tarefa. E, entre tais filósofos, Platão foi o que maior influência exerceu sobre as gerações seguintes, no que se refere às idéias cosmológicas. Platão encarava a Terra como a região mais indigna do Universo, devendo por essa razão ocupar posição inferior às dos demais astros; estes, por sua vez, seriam corpos perfeitos, que somente poderiam executar um movimento perfeito — o circular. Nessas concepções repousou toda a cosmologia que predominou desde o século IV a.C. até o princípio do século XVI d.C.

Eudóxio, um dos discípulos de Platão, elaborou com base nesses dogmas um sistema cosmológico geocêntrico em que o Sol, a Lua e os demais planetas percorriam trajetórias contidas sobre as superfícies de esferas, todas elas com centro na Terra; esta última permanecia imóvel, devido à sua condição de inferioridade. O sistema de Eudóxio não explicava, porém, os movimentos aparentes de avanço e regressão que os planetas executam quando observados da Terra. Percebendo isso, Aristóteles tentou melhorar o modelo de Eudóxio, tornando mais complexos os movimentos dos planetas através do expediente

de dotar suas trajetórias de mais algumas esferas, encaixadas umas dentro das outras. No total, eram cerca de 54 esferas que concorriam para os movimentos planetários.

Tanto o modelo de Eudóxio quanto o de Aristóteles situavam cada planeta a uma distância constante da Terra; com isso, ficavam inexplicadas as variações observadas no brilho dos planetas. Restavam então duas alternativas: melhorar o sistema de Eudóxio-Aristóteles ou encontrar outra solução. Foi este último o caminho escolhido por Heráclides do Ponto e Aristarco de Samos, dois herdeiros do pitagorismo (a primeira grande escola filosófica grega, cuja fundação é tradicionalmente atribuída a Pitágoras de Samos, figura mais ou menos mitológica que teria formulado o teorema dos triângulos retângulos — o teorema de Pitágoras).

Heráclides e, mais tarde, Aristarco situaram o Sol no centro do Universo, com as estrelas e planetas — inclusive a Terra — girando em torno dele; isso explicava razoavelmente não só os movimentos aparentes dos astros como também dava conta das variações de seu brilho. Não obstante as vantagens que apresentava sobre o Universo geocêntrico para a explicação física dos movimentos planetários, esse modelo apresentava, aos olhos dos filósofos de então, a falha imperdoável de se afastar do dogma platô-

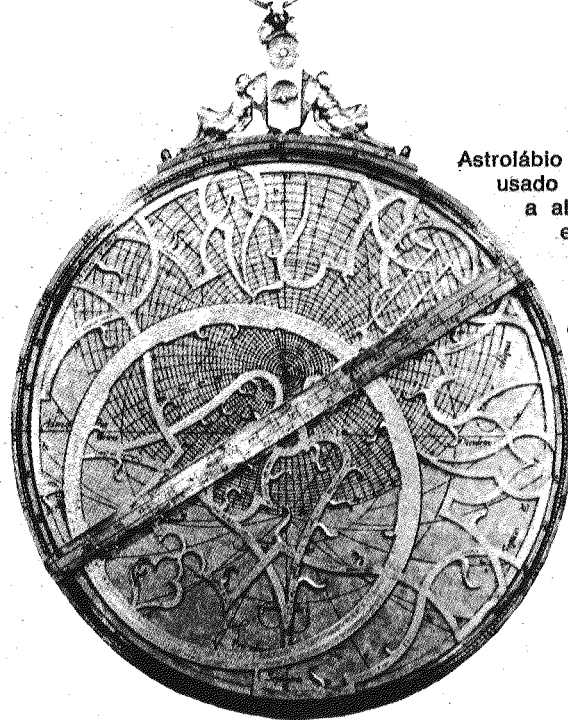


Trajetória aparente de Marte em relação às estrelas fixas, mostrando um movimento de regressão entre 10 de setembro e 28 de abril. No capítulo 1, pág. 8, discutimos como ocorre esta regressão.

nico da imobilidade da Terra. Por essa razão, o Universo heliocêntrico de Aristarco ficou esquecido.

Quatro séculos mais tarde, por volta de 150 d.C., o astrônomo alexandrino Cláudio Ptolomeu empreendeu a tarefa de melhorar o sistema geocêntrico de Eudócio-Aristóteles; o **Almagesto**, obra em que o modelo ptolomaico era exposto, constituiu a Bíblia astronômica dos 1400 anos que se seguiram. Segundo Ptolomeu, cada planeta giraria em torno da Terra segundo uma trajetória resultante da composição de vários movimentos circulares. A esfera das estrelas fixas — isto é, o **firmamento** — envolveria a tudo como a casca de um ovo. Para explicar os movimentos de todos os astros, eram necessários cerca de 80 círculos, o que complicava extraordinariamente as coisas. O Rei Alfonso X de Castela, por exemplo, quando foi iniciado no sistema ptolomaico, declarou que "se o Todo-Poderoso me tivesse consultado antes de iniciar a criação, eu lhe houvera recomendado algo mais simples".

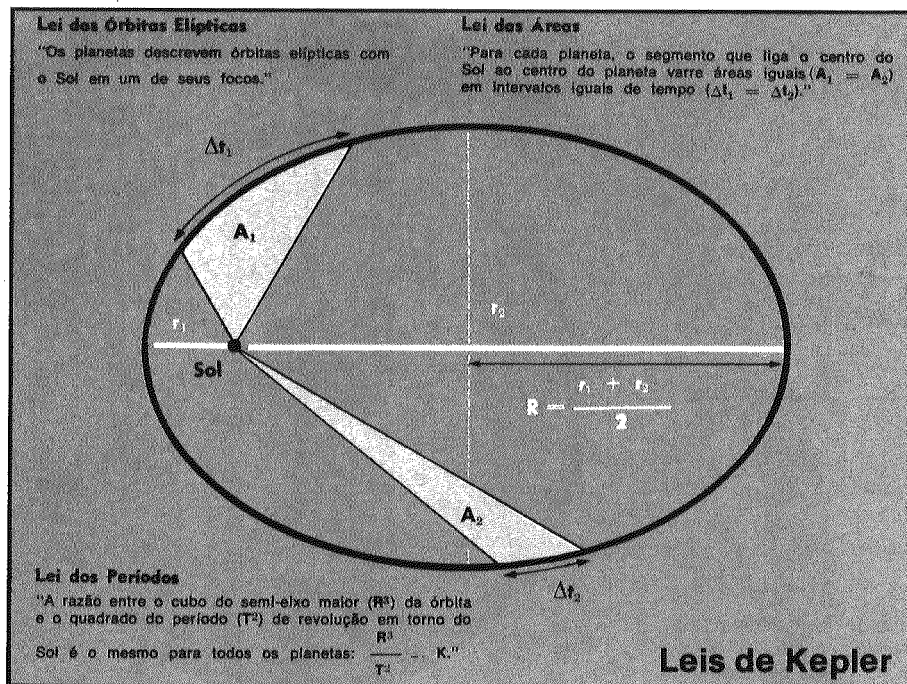
As tábuas astronômicas construídas por Ptolomeu com base em seu modelo eram bastante acuradas: as grandes navegações se fizeram com base nelas. Isso explica a aceitação do sistema ptolomaico, apesar de, como modelo teórico, estar muito longe do razoável.



Astrolábio (séc. XVI), usado para medir a altura do Sol e determinar a hora, bem como a posição e coordenadas dos corpos celestes.

O primeiro golpe contra o geocentrismo foi desferido por Nicolau Copérnico (1473-1543), que retornou — ao que parece por conta própria — ao sistema heliocêntrico de Aristarco. Entretanto, ele continuou fiel ao dogma da circularidade dos movimentos planetários, o que o obrigou a adotar um esquema semelhante ao de Ptolomeu para explicar os movimentos dos planetas: composição de movimentos circulares. Isso tornava seu sistema ainda mais complicado que o geocêntrico, com a desvantagem adicional de não dar lugar, como este, a tabelas astronômicas em que se pudesse confiar. Por essas razões, a aceitação do heliocentrismo copernicano teve que esperar o aparecimento, no cenário científico, de dois outros homens: Johannes Kepler e Galileu Galilei.

Kepler fora assistente do grande astrônomo dinamarquês Tycho Brahe, que, em seu castelo na ilha de Hveen, montara um fabuloso observatório astronômico, o mais completo até o surgimento dos observatórios modernos. Estudando os dados obtidos por Tycho em mais de 20 anos de observações extremamente precisas, Kepler, já convertido ao heliocentrismo, verificou que nenhuma combinação de círculos poderia resultar nas trajetórias aparentes fornecidas por esses dados. Chegou, enfim, à conclusão de que as trajetórias dos planetas em torno do Sol são elip-



ses, enunciando mais duas leis sobre o movimento planetário.

Foi entretanto Galileu, e não Kepler, o grande propagandista do heliocentrismo; apesar de jamais ter aceito a idéia de que as órbitas dos planetas são elipses, agarrando-se ainda ao dogma da circularidade, Galileu fez as descobertas astronômicas e escreveu os livros que acabariam por derrubar o geocentrismo.

A contribuição de Galileu à Astronomia iniciou-se quando ele recebeu como presente um instrumento recém-inventado na Holanda: uma luneta. No espaço de poucos meses, Galileu fez observações revolucionárias: descreveu o relevo lunar — mostrando que os astros não são "perfeitos"; verificou que a Via Láctea é um aglomerado de estrelas, e não uma nebulosidade que reflete a luz do Sol ou da Lua, como se acreditava; descobriu os satélites de Júpiter, mostrando que existem corpos celestes que decididamente giram em torno de outro astro que não a Terra; descobriu as manchas solares e as fases de Vênus.

As atividades astronômicas de Galileu — acompanhadas pela publicação de livros e panfletos dirigidos ao público leigo — e as polêmicas em que se envolveu — muitas vezes conduzidas de modo violento — terminaram por atrair a atenção da Santa Inquisição (o braço político da Igreja). De fato, os altos escalões da hierarquia eclesiástica viam com crescente apreensão as invectivas de Galileu contra os seculares dogmas científico-religiosos que constituíam a base das concepções

teológicas então predominantes, todas comprometidas, de alguma forma, com a filosofia aristotélica. Duvidar da imobilidade da Terra era, para esses dignitários, o mesmo que duvidar das Sagradas Escrituras.

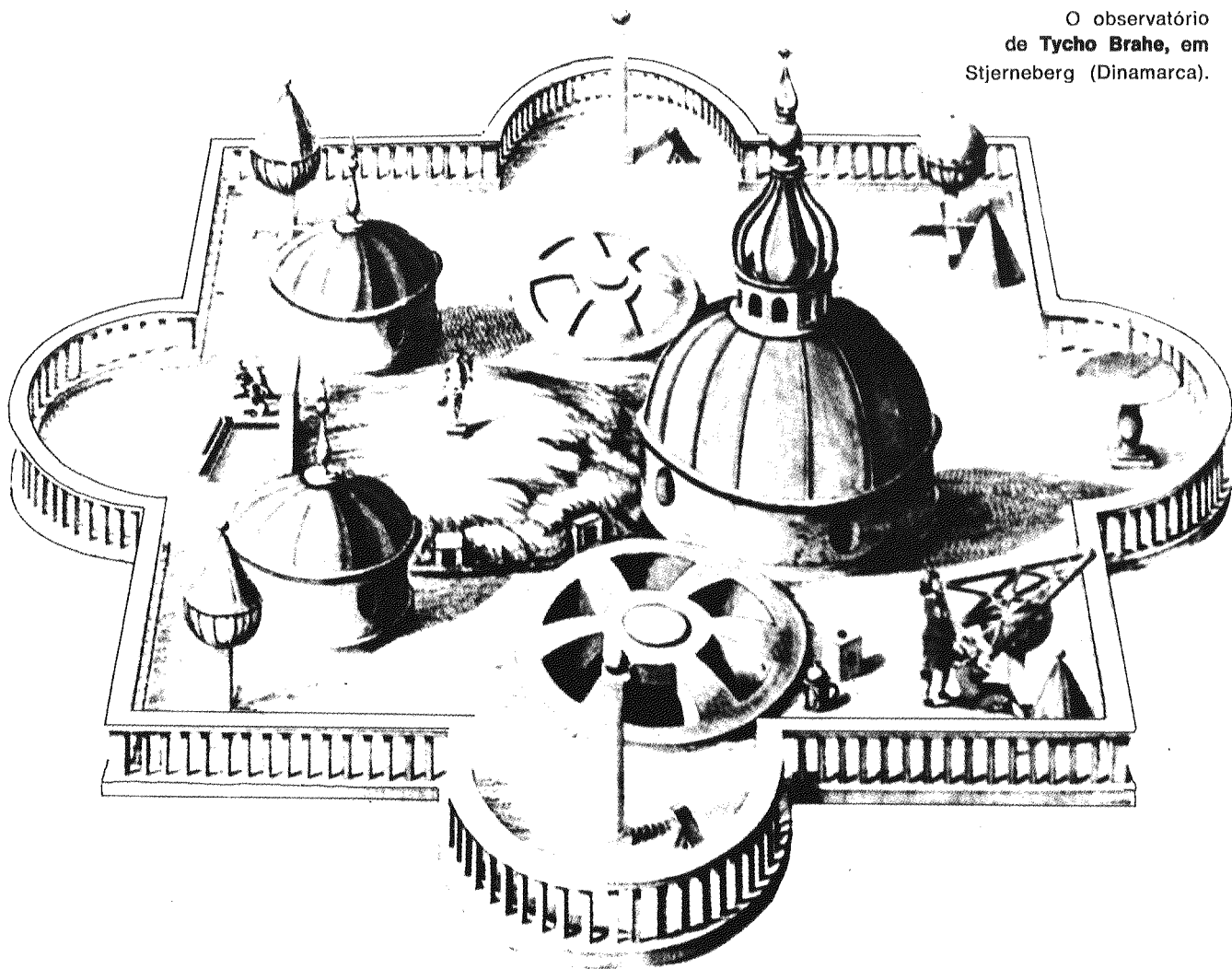
A indignação da Igreja contra Galileu alcançou o clímax quando este publicou seu livro **Diálogos a Respeito dos Grandes Sistemas do Mundo**; nessa obra, as concepções geocêntricas eram expostas ao ridículo, em favor do heliocentrismo (que, não raro, era defendido com argumentos errôneos).

Como conseqüência da publicação dos **Diálogos**, Galileu foi julgado e condenado pela Inquisição; sua pena foi a de abjurar da teoria heliocêntrica e passar o resto da vida em prisão domiciliar.

Q1 — Qual é, segundo Kepler, a forma das órbitas planetárias em torno do Sol?

Q2 — A velocidade de um planeta em relação ao Sol é maior quando os dois astros estão mais próximos ou quando estão mais afastados? Baseie-se na lei das áreas para dar sua resposta.

Q3 — Sabendo que para a Terra a relação R^3/T^2 vale $2,48 \times 10^{19} \text{ (km}^3/\text{dias)}^2$, qual é o valor dessa relação para Marte? Sabendo que o semi-eixo maior da órbita de Marte tem comprimento $2,28 \times 10^8 \text{ km}$, quanto dura, em dias terrestres, o ano marciano? Baseie-se na terceira lei de Kepler para responder a essas perguntas.



1. A lei da gravitação universal

As leis de Kepler fornecem apenas uma descrição geométrica do movimento dos planetas, não resultando em nenhum mecanismo que os explique. Coube a Isaac Newton estabelecer como esses movimentos ocorrem do ponto de vista físico.

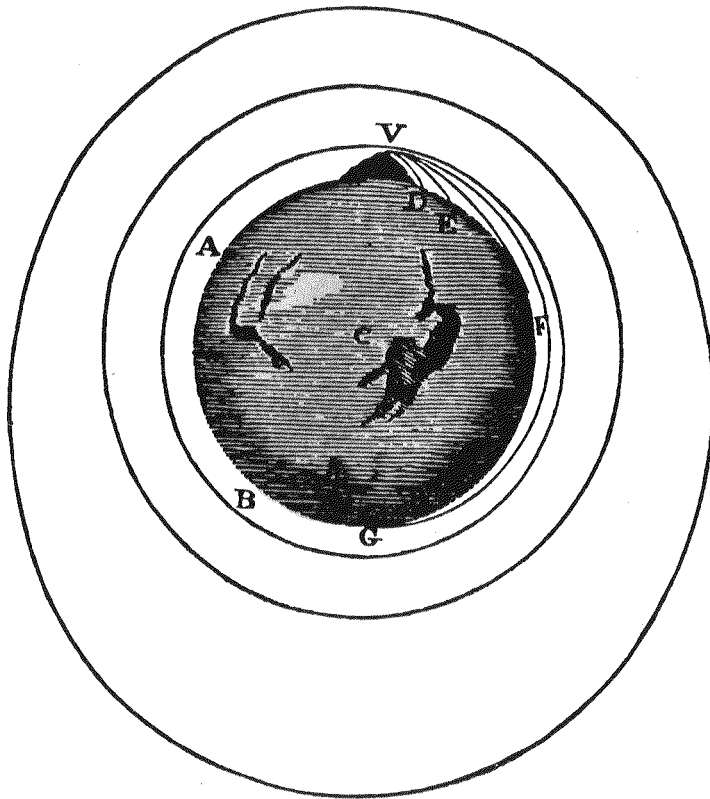
Para explicar os movimentos planetários, Newton começou por relacionar o comportamento da Lua em sua órbita com o comportamento de um corpo em queda próximo à superfície terrestre. Para a Lua descrever um movimento circular em torno da Terra — a excentricidade da órbita lunar é muito pequena, podendo ela, com boa aproximação, ser considerada circular — é necessário que esteja sob a ação de uma força centrípeta. Newton perguntou-se, então, por que tal for-

RESPOSTAS

R₁-

R₂ -

R₃ -



Desenho publicado no livro *Principia*, de Newton, mostrando possíveis trajetórias de um projétil lançado do topo de uma montanha.

O projétil poderá entrar em órbita se o valor da velocidade for suficientemente grande no instante de lançamento.

As trajetórias que começam em V e terminam em D, E, F e G correspondem a velocidades iniciais cada vez maiores, porém insuficientes para colocar o projétil em órbita.

“... e quanto maior a velocidade que é lançado, mais longe ele irá antes que caia na superfície da Terra. Assim, podemos supor que se a velocidade (de lançamento) for aumentando, ele descreverá arcos de 1, 2, 5, 10, 100, 1 000 milhas antes de cair, até que, excedendo os limites da Terra, passe ao espaço, sem tocá-la.”

ça não teria a mesma natureza da força exercida sobre uma maçã em queda. Neste caso, seria razoável supor que ambas as forças fossem exercidas pela Terra. Newton comparou então as acelerações da Lua e de um corpo em queda nas proximidades da Terra.

O raio R da órbita da Lua é $3,8 \times 10^8 \text{ m}$; sua velocidade pode ser calculada dividindo o comprimento da órbita, $2\pi R$, pelo tempo que a Lua leva para percorrê-la: 27,3 dias, ou $2,3 \times 10^6$ segundos.

Q4 — Qual é a velocidade v da Lua em relação à Terra?

A aceleração centrípeta da Lua é dada pela expressão v^2/R .

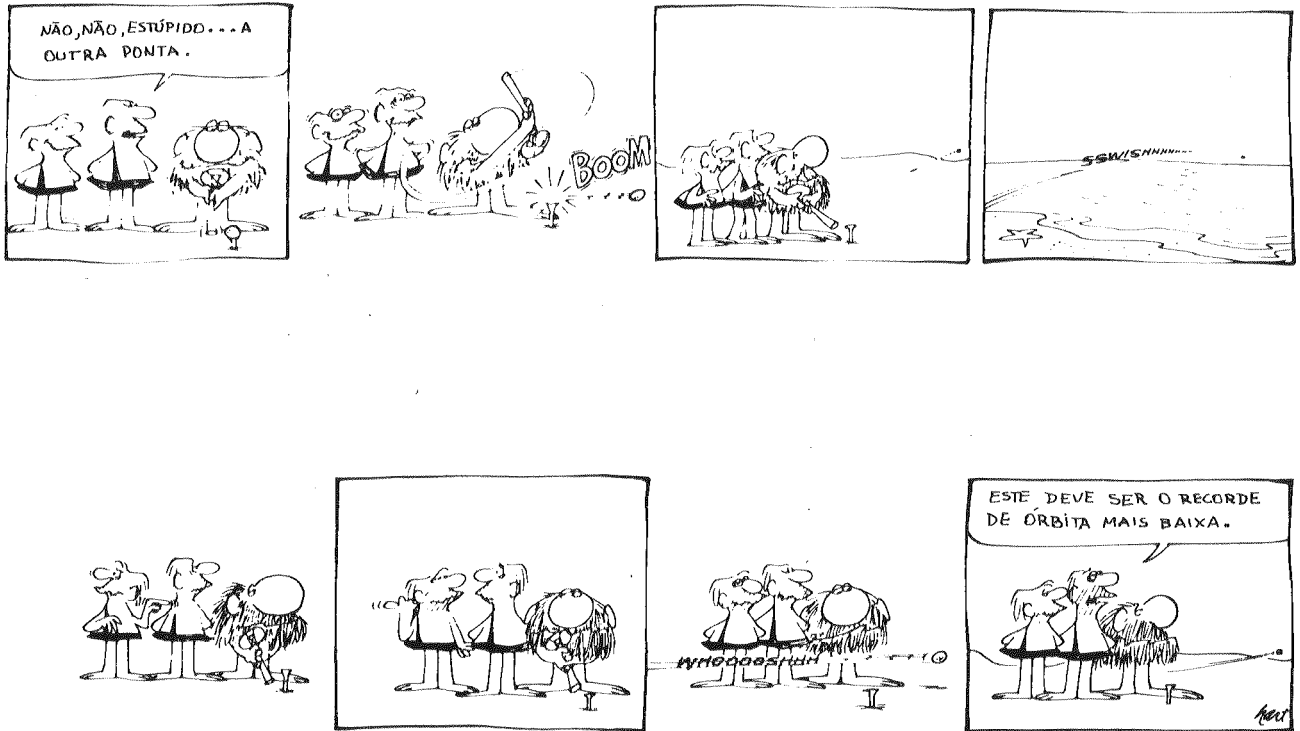
Q5 — Qual é a aceleração centrípeta a da Lua em seu movimento em torno da Terra?

Q6 — Qual é a aceleração de um corpo em queda nas proximidades da superfície terrestre?

Verifica-se, então, que a aceleração da Lua é cerca de 3500 vezes menor que a aceleração de um corpo em queda. Newton admitiu então que, se uma maçã fosse abandonada na região onde a Lua se encontra, deveria cair em direção à Terra com a mesma aceleração da Lua ($2,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$); ele chegou a tal conclusão depois de ponderar que, se na superfície da Terra a aceleração de um corpo em queda não depende de sua massa, o mesmo deve acontecer quando o corpo está situado em qualquer outro ponto do Universo, em particular na órbita da Lua.

Segundo esse raciocínio, a força que provoca a queda de um corpo de massa m_c na superfície da Terra é dada por $F_1 = m_c \cdot 9,8$, ao passo que se o corpo se encontra em algum ponto da órbita da Lua, a força deve ser $F_2 = m_c \cdot 2,6 \times 10^{-3}$. Em outras palavras, a força F_2 deve ser 3500 vezes mais fraca que a força F_1 . Isso leva à conclusão de que a força exercida sobre um corpo deve diminuir à medida que ele é afastado da Terra. O próximo passo de Newton foi determinar como se dá essa variação da força em função da distância.

A.C. por John Hart



Ele considerou então que os planetas mantêm com o Sol o mesmo tipo de relação que a Lua mantém com a Terra: eles permanecem em órbita graças à ação de forças — a que Newton deu o nome de forças gravitacionais — de interação com o Sol. Utilizando a segunda e a terceira leis de Kepler, Newton mostrou que a força de atração gravitacional entre dois astros — ou entre dois corpos quaisquer — é diretamente proporcional às massas M e m desses astros e inversamente proporcional ao quadrado da distância r que os separa. Ou seja,

$$F = \frac{G M m}{r^2},$$

onde G é uma constante — chamada constante de atração gravitacional. O valor de G é sempre o mesmo, quaisquer que sejam os corpos que se atraem e o lugar em que se encontrem.

A lei da atração gravitacional (ou lei da gravitação universal) estabelece então que "todos os objetos do Universo se atraem mutuamente por meio de forças gravitacionais".

RESPOSTAS

R₄ -

R₅ -

R₆ -

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

- R1 — Elíptica, com o Sol em um dos focos.
R2 — A velocidade de um planeta é maior quando está mais próximo, pois, de acordo com a Lei das Áreas, em intervalos iguais de tempo, o segmento que liga seu centro ao centro do Sol deve varrer áreas iguais, e quando está mais próximo, esse segmento é menor e portanto precisa se deslocar mais.
R3 — a) $2,48 \times 10^{19} \text{km}^3/\text{dias}^2$.
b) Aproximadamente 694 dias.
R4 — Aproximadamente $1,0 \times 10^2 \text{m/s}$.
R5 — Aproximadamente $2,6 \times 10^{-3} \text{m/s}^2$.
R6 — Aproximadamente $9,8 \text{m/s}^2$.

R₁ -

R₂ -

R₃ -

R₄ -

R₅ -

R₆ -

2. Exercícios de aplicação

A primeira determinação experimental da constante G foi feita em 1798, por Cavendish. O valor aceito atualmente é $6,673 \times 10^{-11} \text{N.m}^2/\text{kg}^2$. Nos exercícios seguintes, para simplificar seus cálculos, use o valor arredondado:

$$6,7 \times 10^{-11} \text{N.m}^2/\text{kg}^2.$$

- E1 — Calcule a força de atração gravitacional que age entre duas pessoas, cada uma de massa 50kg, colocadas à distância de 1 metro uma da outra.
E2 — Sabendo-se que a massa da Terra é $6,0 \times 10^{24} \text{kg}$ e o raio de sua órbita $6,4 \times 10^8 \text{m}$, calcule o peso de uma pessoa de massa 50kg na superfície da Terra a partir da lei gravitacional de Newton.
E3 — Sabendo-se que a massa da Lua é $7,4 \times 10^{22} \text{kg}$ e seu raio $1,7 \times 10^6 \text{m}$, calcule o peso de uma pessoa de massa 50kg na superfície lunar. Compare

este valor com o peso da mesma pessoa na superfície terrestre.

- E4 — Calcule o valor da força com que a Terra atrai a Lua, isto é, o peso da Lua em relação à Terra. A distância entre o centro da Terra e o centro da Lua é $3,84 \times 10^8 \text{m}$.
E5 — Quando uma pedra cai ao chão, ao ser atraída pela Terra, sua aceleração é de $9,8 \text{m/s}^2$. Como a pedra também atrai a Terra, pode-se dizer que a Terra também "cai" sobre a pedra.
a) Se a massa da pedra é de 0,5kg, qual é o valor da força com que ela atrai a Terra?
b) Qual é a aceleração da Terra devido a essa força?
E6 — Determine, através da terceira lei de Kepler ($R^3/T^2 = K$), o raio da órbita do planeta Vênus, sabendo que seu período orbital é $1,9 \times 10^7 \text{s}$. Para determinar a constante K , utilize os dados abaixo referentes à Terra:
raio da órbita — $1,5 \times 10^{11} \text{m}$;
período orbital — $3,2 \times 10^7 \text{s}$.

Escala de \vec{v}
 1cm: 5 000km/h

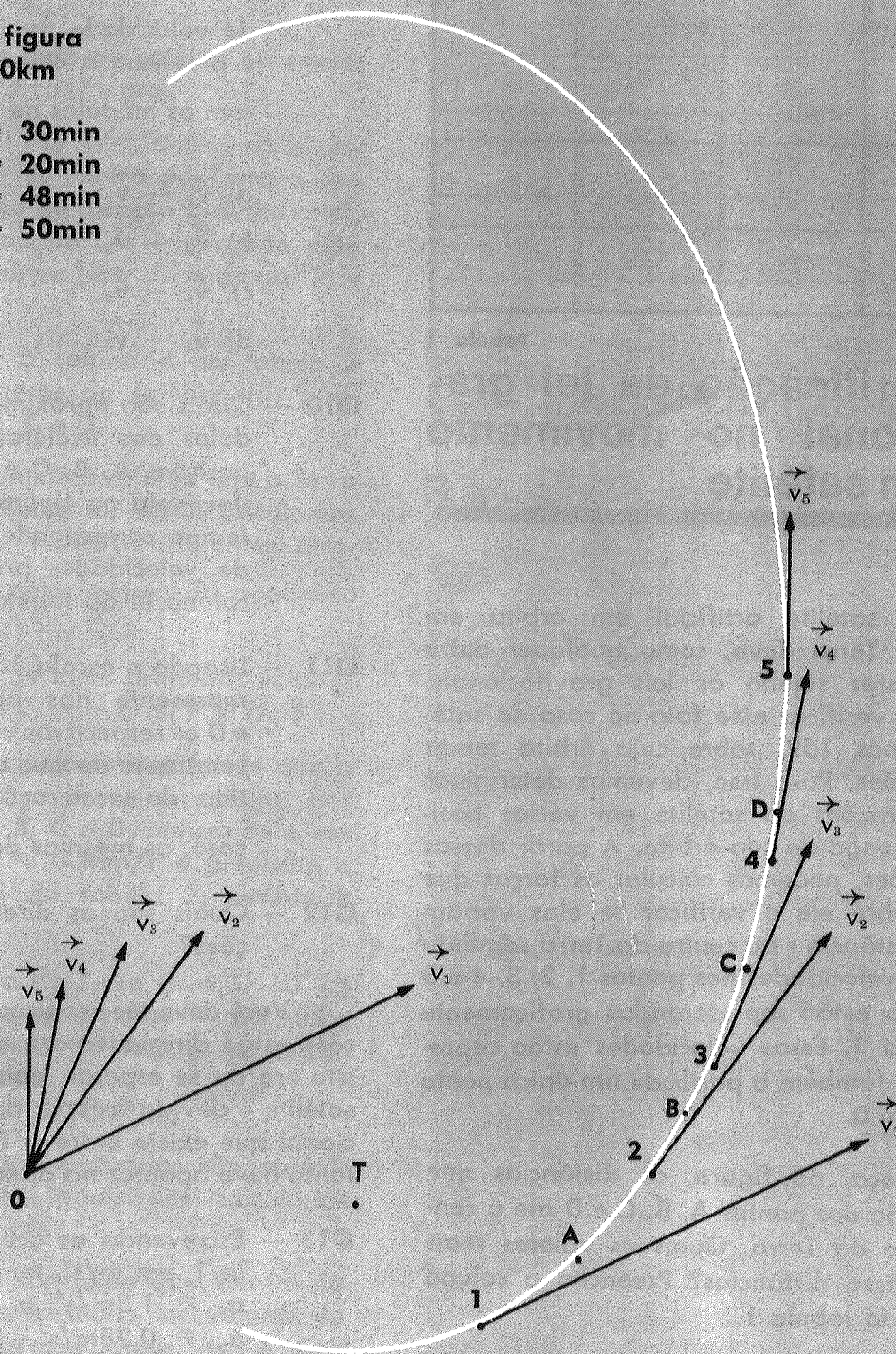
Escala da figura
 1cm: 4 000km

1-2: $\Delta t = 30\text{min}$

2-3: $\Delta t = 20\text{min}$

3-4: $\Delta t = 48\text{min}$

4-5: $\Delta t = 50\text{min}$



Órbita do satélite Kosmos 159

	I	II	III
Posição	Distância ao centro da Terra (km)	$ \Delta \vec{v} $ km/h	$ \vec{a} $ km/h/min
A			
B			
C			
D			

tabela 1

3. Verificação da lei gravitacional no movimento de um satélite

Um satélite artificial em órbita em torno da Terra deve, como qualquer outro corpo, estar sujeito às leis gravitacionais. Podemos verificar esse fato no caso do satélite Kosmos 159, sobre cuja órbita temos informações. Para isso, devemos determinar as acelerações do satélite em várias posições ao longo de sua órbita. A partir dessas acelerações, podemos calcular as forças que agem sobre ele e verificar se elas variam com a distância r ao centro da Terra segundo $1/r^2$. As velocidades nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 da órbita estão representadas graficamente na figura 1. Essas velocidades estão representadas também a partir de um único ponto de origem O .

Q7 — Meça, na figura, as distâncias que vão dos pontos **A**, **B**, **C** e **D** até o centro da Terra. Quais os valores reais dessa distâncias? Preencha a coluna I da tabela 1.

Q8 — Sabendo que o raio (R) da Terra vale $6,4 \times 10^3$ km, verifique se os pontos **A**, **B**, **C** e **D** estão respectivamente a distâncias $2R$, $3R$, $4R$ e $5R$ do centro da Terra.

Para determinar as acelerações do satélite em **A**, **B**, **C** e **D**, você vai determinar as variações de velocidade nos diversos trechos da órbita.

Q9 — Determine graficamente as variações de velocidade $\Delta \vec{v}$ indicadas abaixo e preencha a coluna II da tabela 1 com os módulos de $\Delta \vec{v}$ em km/h.

a) $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$

b) $\vec{v}_3 - \vec{v}_2$

c) $\vec{v}_4 - \vec{v}_3$

d) $\vec{v}_5 - \vec{v}_4$

Q10 — Quais são aproximadamente os módulos das acelerações médias nas posições **A**, **B**, **C** e **D**? Para calculá-los, veja na figura os intervalos de tempo correspondentes às variações de velocidade; preencha depois a coluna III da tabela 1.

Q11 — Usando a escala $1\text{cm} : 300\text{km/h.min}$, represente nas posições **A**, **B**, **C** e **D** os respectivos vetores aceleração. Lembre-se de que a direção e o sentido da aceleração são, em cada caso, os mesmos de $\Delta \vec{v}$.

Q12 — Quais são as direções das acelerações?

Você deve ter verificado que as acelerações estão dirigidas para o centro da Terra. Isto era de se esperar, pois a aceleração do satélite é devida à força de atração gravitacional que existe entre a Terra e ele, e portanto deve apontar na direção dessa força.

Q13 — Escrevendo as acelerações da tabela 1, em m/s^2 , temos $a_A = 2,4\text{m/s}^2$, $a_B = 1,3\text{m/s}^2$, $a_C = 0,5\text{m/s}^2$, $a_D = 0,28\text{m/s}^2$. Supondo que a massa do satélite é de 5000kg , calcule, usando a segunda lei de Newton, a força exercida pela Terra sobre o satélite em cada uma das posições **A**, **B**, **C** e **D**.

Verificamos então que a segunda lei de Newton permite determinar, em cada instante, a força que age sobre o satélite em sua órbita em torno da Terra.

Q14 — Preencha a coluna I da tabela 2 com os valores das forças calculadas na questão 13.

Q15 — Calcule o peso do satélite na superfície da Terra ($P=mg$).

Se vale a lei $F \propto 1/r^2$, dobrando a distância do satélite ao centro da Terra o seu peso, que é a força de atração gravitacional, deve ficar dividido por 4. Triplicando essa distância, o peso deve ficar dividido por 9, e assim por diante.

Q16 — Preencha a coluna II da tabela 2 com os pesos do satélite nas posições A, B, C e D.

O peso do satélite é a força que a Terra exerce sobre ele. Portanto, nós já calculamos essa força de duas maneiras diferentes: através de $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ e pelo inverso do quadrado da distância.

Q17 — Compare as duas primeiras colunas da tabela 2; vale a lei $F \propto 1/r^2$?

Q18 — Calcule os valores das forças que a Terra exerce sobre o satélite nos pontos A, B, C e D, utilizando a expressão $F = G \cdot Mm/r^2$ e preencha a coluna III da tabela 2; lembre-se de que:

$M = \text{massa da Terra} = 6,0 \times 10^{24} \text{kg}$

$m = \text{massa do satélite} = 5 \times 10^3 \text{kg}$

$r = \text{distância do satélite ao centro da Terra}$

$G = 6,7 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$

Q19 — Os valores encontrados são aproximadamente iguais aos calculados anteriormente?

Você deve ter concluído que, dentro da precisão de nossas medidas, os valores de uma coluna e outra são iguais. Isso é uma verificação direta de que o valor da força varia com $1/r^2$ e que portanto o movimento do satélite se dá de acordo com a lei da gravitação universal.

	I	II	III
Superfície da Terra	$4,9 \times 10^4 \text{N}$		
F_A			
F_B			
F_C			
F_D			

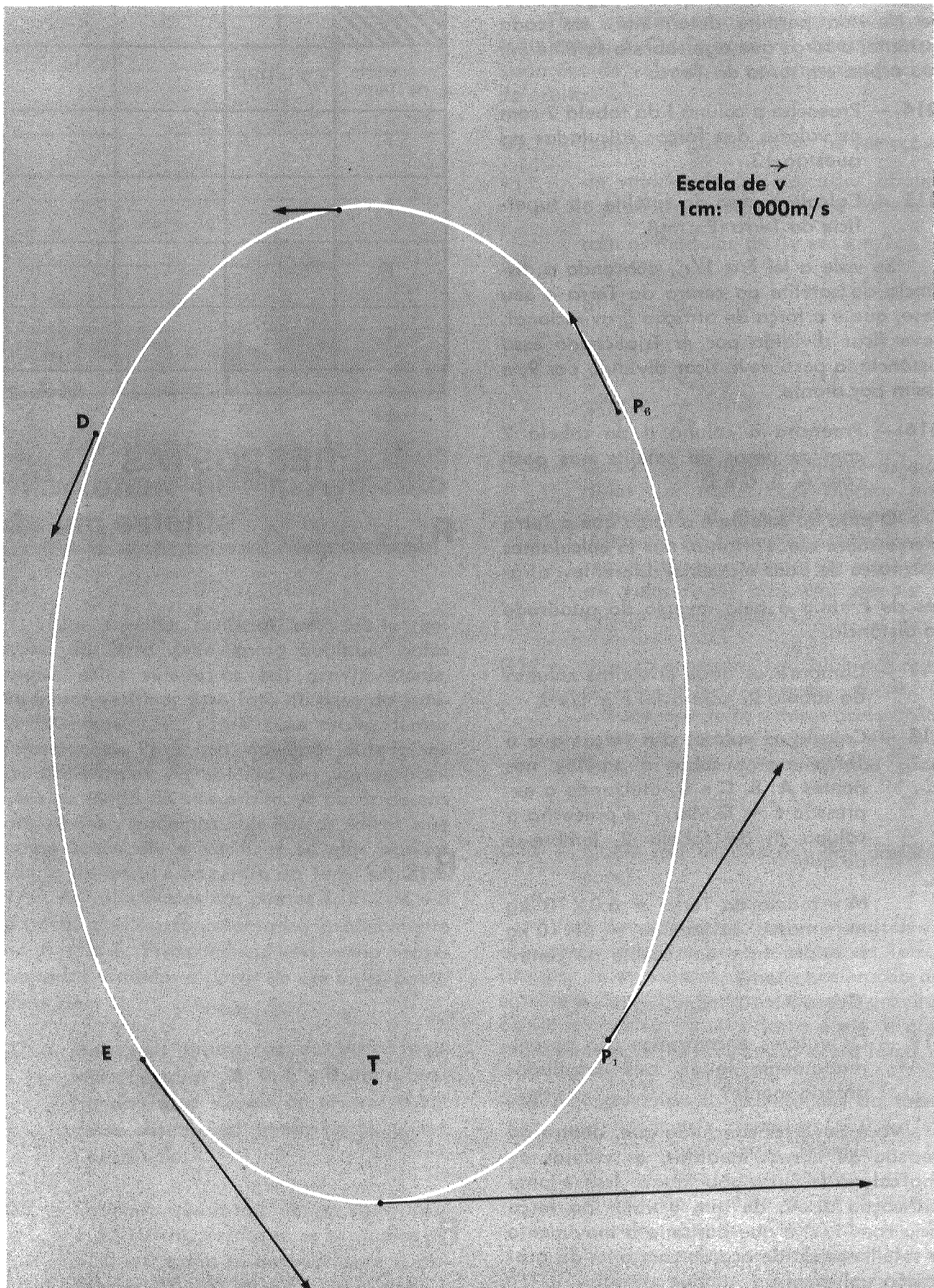
tabela 2

RESPOSTAS

R₁₂ -

R₁₃ -

R₁₉ -



4. Energia potencial do satélite

Na figura 2 está representada a órbita do satélite Kosmos 159, assim como sua velocidade em alguns pontos.

Q20 — Como varia a velocidade do satélite em relação à distância dele à Terra?

Q21 — Os pontos **P** e **D** estão situados à mesma distância do centro da Terra. Os valores das velocidades do satélite nesses pontos são iguais?

O que você acabou de verificar é geral. Em pontos da órbita eqüidistantes do centro da Terra o satélite possui velocidades de mesmo módulo.

O movimento do satélite se repete em cada volta em torno da Terra. Sua velocidade diminui à medida que ele se afasta da Terra atingindo seu valor mínimo no apogeu. Desse ponto em diante, à medida que se aproxima da Terra, sua velocidade começa a aumentar em módulo, retomando os mesmos valores assumidos quando se afastava.

Q22 — Como varia a energia cinética do satélite em uma volta completa em torno da Terra? Onde ela é máxima e onde é mínima?

Q23 — Em dois pontos da órbita eqüidistantes do centro da Terra, o satélite possui a mesma energia cinética?

As mesmas considerações feitas a respeito do módulo da velocidade são válidas para a energia cinética. De fato, enquanto o satélite se afasta da Terra sua energia cinética diminui até alcançar um mínimo quando ele atinge o apogeu. A partir desse ponto, o satélite vai se aproximando da Terra e sua energia cinética vai aumentando, passando por um máximo no perigeu.

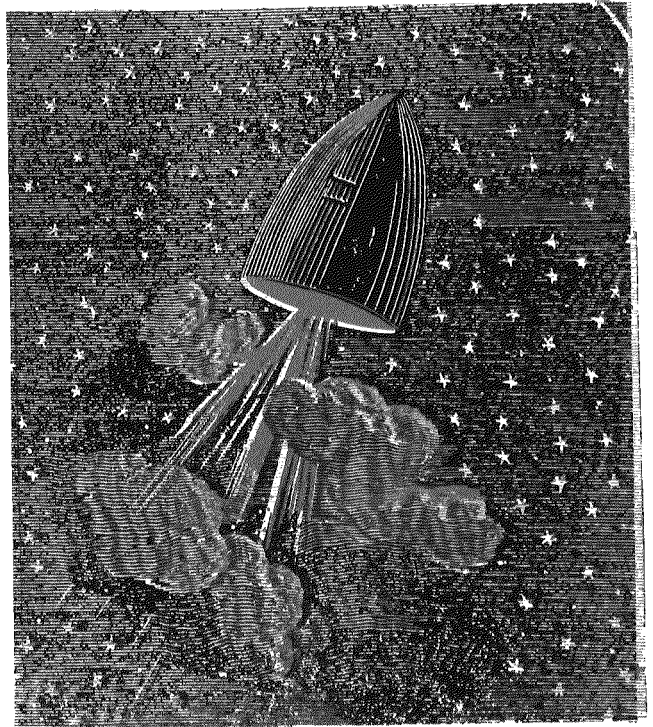


Ilustração do livro de Júlio Verne, *Da Terra à Lua* (1860).

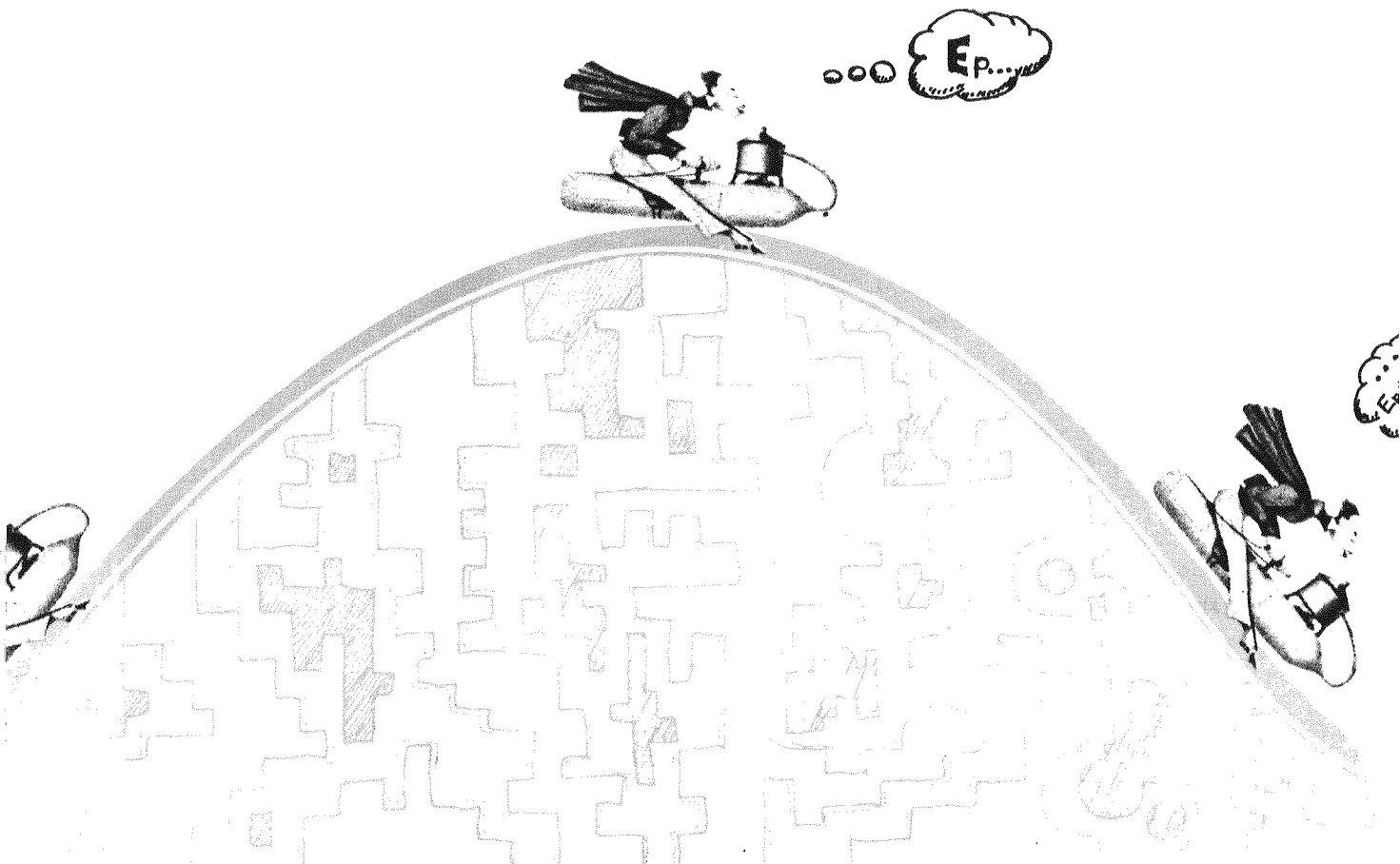
RESPOSTAS

R₂₀ -

R₂₁ -

R₂₂ -

R₂₃ -



Há nisso uma semelhança muito grande com o que ocorre quando arremessamos uma pedra para cima.

A velocidade da pedra — e, conseqüentemente, sua energia cinética ($1/2 mv^2$) — diminui enquanto ela está subindo (se afastando da Terra); a velocidade passa por um valor mínimo no ponto mais alto de sua trajetória (isto é, o ponto mais afastado da Terra, correspondente ao apogeu do satélite) para em seguida aumentar à medida que cai (se aproxima da Terra).

Portanto, a energia cinética do satélite vai “desaparecendo” enquanto ele está se afastando da Terra, para em seguida “reaparecer” quando se aproxima do planeta. Não há, entretanto, desaparecimento e criação de energia nesse processo: o que há é **transformação** da energia. Enquanto o satélite se afasta, sua energia cinética está diminuindo por causa do trabalho realizado contra a força de atração gravitacional; isto é, quando ele se afasta sua energia cinética vai se transformando em energia potencial, e quando ele se aproxima sua energia potencial se transforma em energia cinética. Isso acontece de maneira que em cada instante a

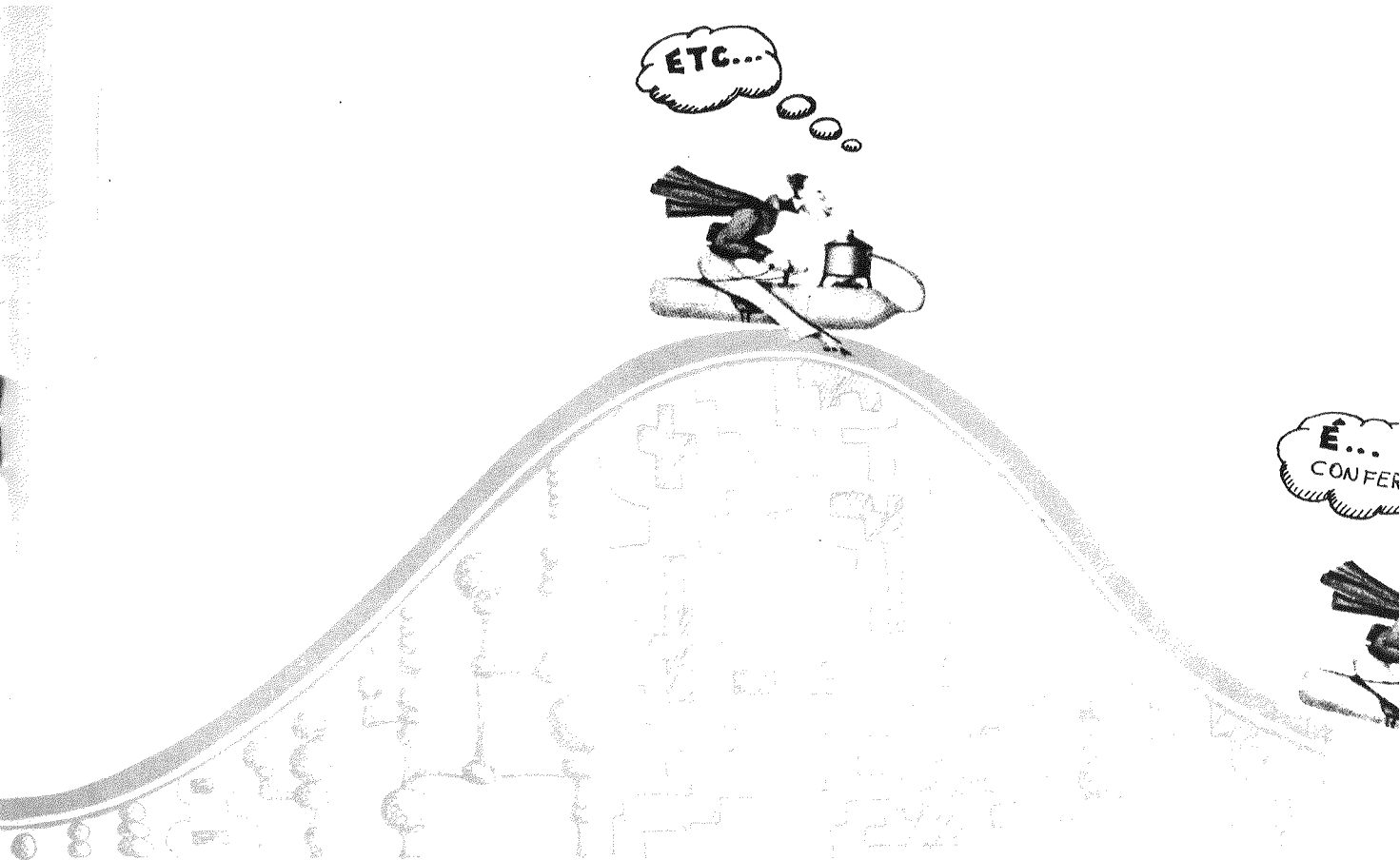
soma de energia cinética com a energia potencial é constante. Assim, energia cinética + energia potencial = energia total = constante.

Se essa soma é constante, é necessário que, entre duas posições do satélite, a variação da energia cinética tenha o mesmo valor que a variação da energia potencial.

Em linguagem comum, isso se traduz da seguinte maneira: a quantidade de energia cinética que o satélite perde (ou ganha) para ir de uma posição a outra é igual à energia potencial que ele ganha (ou perde).

- Q24** — Determine a energia cinética do satélite nas posições **D** e **E**.
- Q25** — Qual foi a variação da energia potencial do satélite entre as posições **D** e **E**?

Para exprimir essa idéia, usamos uma convenção de sinal: quando a energia aumenta a variação é positiva (+) e quando ela diminui a variação é negativa (−). Podemos então escrever:



$$\Delta E_c = - \Delta E_p$$

(variação da energia cinética) = (variação da energia potencial)

Q26 — Em que trecho da órbita o satélite sofre variação positiva de energia cinética?

Q27 — Em que trecho da órbita o satélite sofre variação positiva de energia potencial?

Observe que falamos somente em **variação** da energia potencial. E, de fato, podemos somente calcular a variação da energia potencial entre dois pontos, que é o trabalho realizado quando o satélite desloca-se de um ponto a outro. Mesmo assim, isso é feito de maneira indireta, pois o que calculamos realmente é a variação da energia cinética, determinando a energia cinética ($1/2 mv^2$) em cada um dos pontos e efetuando a diferença entre esses valores. Não podemos, assim, determinar o valor da energia potencial do satélite em um ponto de sua órbita apenas com as informações de que dispomos. Isso ocorre porque, apesar de sabermos que $E_c + E_p = K$, não temos dados sobre o valor da constante K .

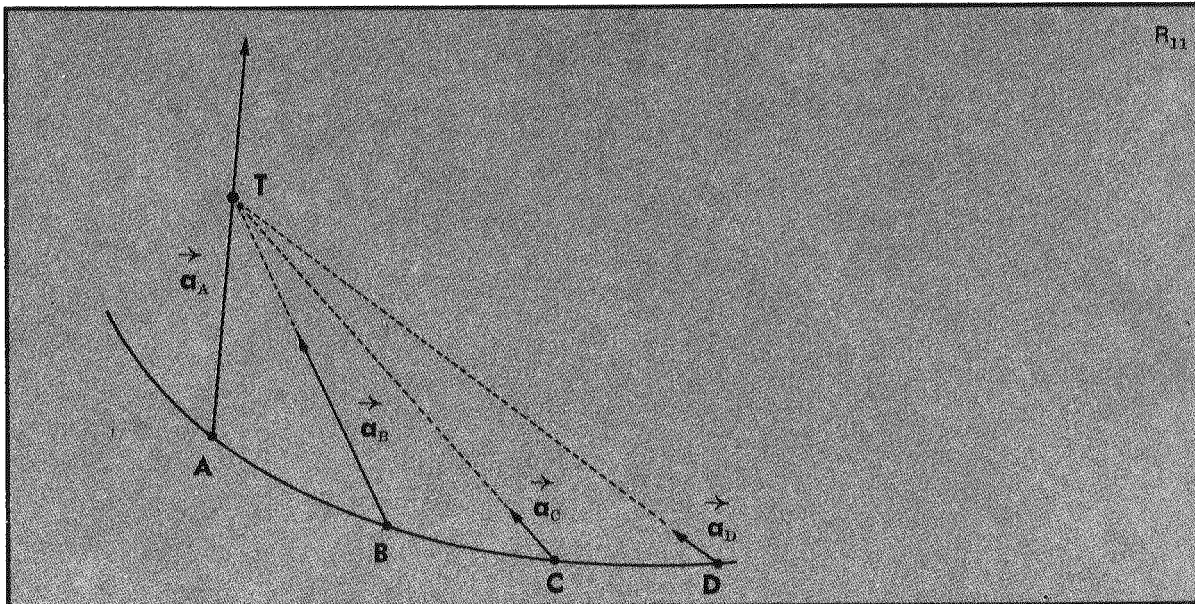
RESPOSTAS

R₂₄ -

R₂₅ -

R₂₆ -

R₂₇ -



R12 — Têm a direção das retas que unem cada um dos pontos A, B, C e D, respectivamente, ao centro da Terra.

R13 — $F_A = 12\ 500\text{N}$
 $F_B = 6\ 500\text{N}$
 $F_C = 2\ 150\text{N}$
 $F_D = 1\ 600\text{N}$

R19 — São.

R20 — A velocidade diminui à medida que o satélite se afasta da Terra e aumenta à medida que ele se aproxima da Terra.

R21 — São.

R22 — A energia cinética diminui à medida que ele se afasta da Terra, chegando a um mínimo no apogeu, e a um máximo no perigeu.

R23 — Sim.

R24 — E_{CD} aproximadamente igual a $1,1 \times 10^{10}\text{J}$.

E_{CE} aproximadamente igual a $9,0 \times 10^{10}\text{J}$.

R25 — Aproximadamente $7,9 \times 10^{10}\text{J}$.

R26 — No trecho da órbita em que ele está se deslocando do apogeu para o perigeu.

R27 — No trecho da órbita em que ele está se deslocando do perigeu para o apogeu.

Respostas dos Exercícios de aplicação

R1 — $1,7 \times 10^{-7}\text{N}$.

R2 — 490N.

R3 — $P_L = 86\text{N}$, portanto cerca de 6 vezes menor que na superfície terrestre.

R4 — Aproximadamente $2,0 \times 10^{20}\text{N}$.

R5 — a) 4,9N.

b) $8,3 \times 10^{-25}\text{m/s}^2$.

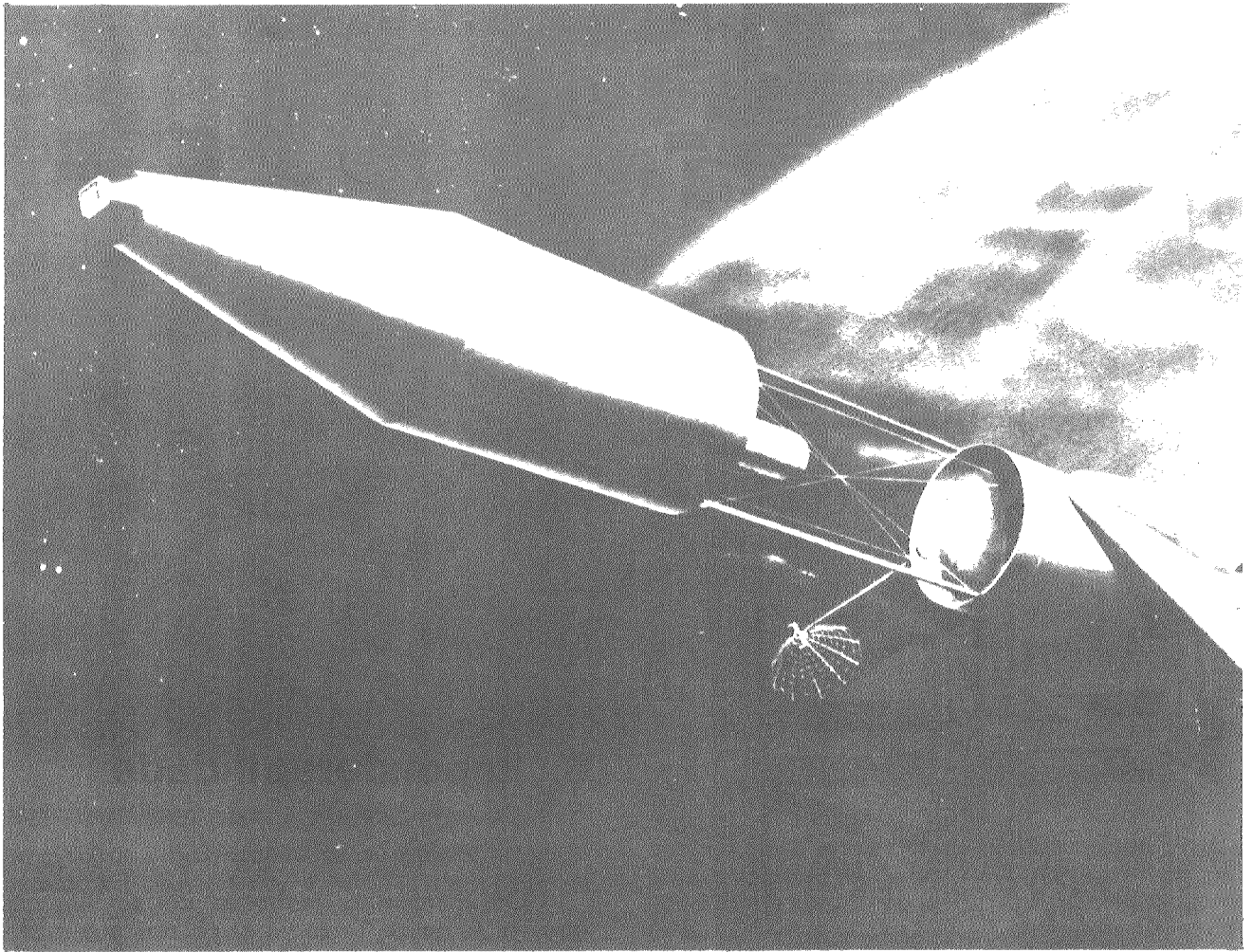
R6 — $1,1 \times 10^{11}\text{m}$.

	I	II	III
POSIÇÃO	Distâncias ao centro da Terra (km)	$ \vec{\Delta v} $ km/h	$ \vec{a} $ km/h/min
A	$1,28 \times 10^4$	$1,53 \times 10^4$	$5,1 \times 10^2$
B	$1,92 \times 10^4$	$5,5 \times 10^3$	$2,75 \times 10^2$
C	$2,56 \times 10^4$	$5,3 \times 10^3$	$1,1 \times 10^2$
D	$3,20 \times 10^4$	$3,0 \times 10^3$	$0,60 \times 10^2$

R7 a R10

R14 a R18

	I	II	III
Superfície da Terra	$4,9 \times 10^4\text{N}$	$4,9 \times 10^4$	—
F_A	$1,25 \times 10^4$	$1,23 \times 10^4$	$1,27 \times 10^4$
F_B	$6,50 \times 10^3$	$5,4 \times 10^3$	$5,4 \times 10^3$
F_C	$2,15 \times 10^3$	$3,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^3$
F_D	$1,60 \times 10^3$	$1,9 \times 10^3$	$1,9 \times 10^3$



5. Cálculo da energia potencial do satélite

Nós já calculamos a energia potencial de uma mola e de um corpo próximo à superfície da Terra, obtendo, respectivamente:

$$E_{pm} = \frac{1}{2} K x^2 \quad \text{e} \quad E_{pg} = mgh.$$

O cálculo foi possível porque as forças que agem sobre os corpos que se deslocam nos dois casos são bem simples. No caso da mola, a força é

$$F_m = -Kx,$$

e, no caso de um corpo próximo à superfície da Terra,

$$F_g = mg = \text{constante}.$$

Para calcularmos diretamente a variação da energia potencial do satélite entre dois pontos de sua órbita, precisamos calcular o trabalho realizado pela força gravitacional quando o corpo se desloca de um

ponto a outro. Esse cálculo não é simples, pois a força gravitacional varia com $1/r^2$ segundo

$$F_g = G \frac{Mm}{R^2}$$

Pode-se demonstrar que o trabalho T realizado por esta força quando o satélite se desloca de r_1 para r_2 é:

$$T = \frac{G.Mm}{r_1} - \frac{G.Mm}{r_2}$$

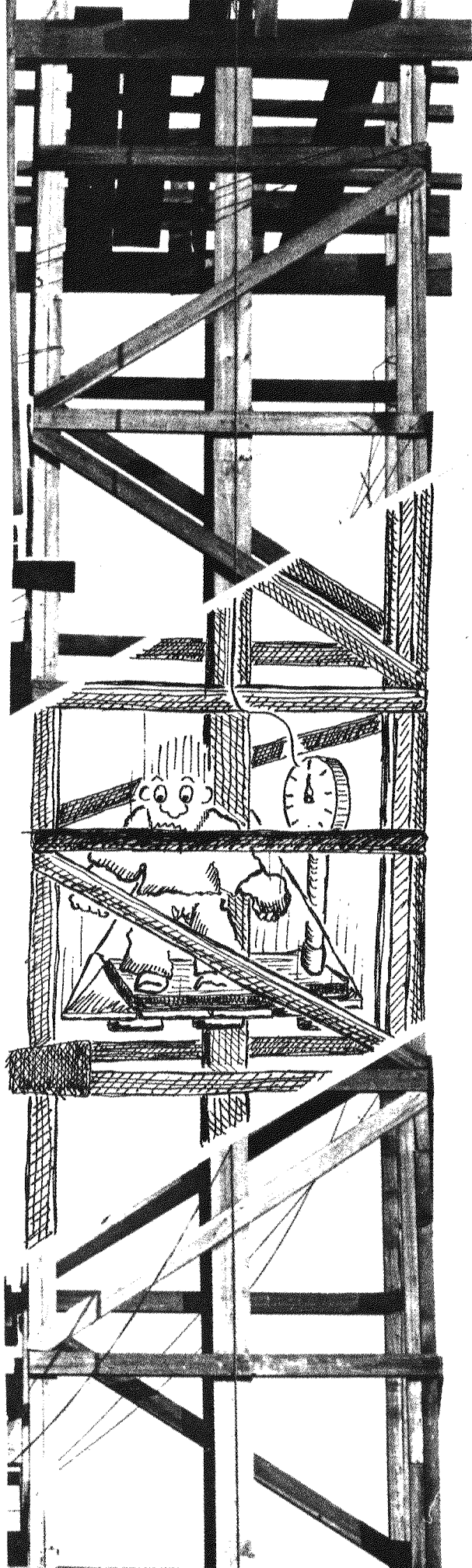
Onde r_1 e r_2 representam as distâncias do satélite ao centro da Terra em duas posições diferentes.

Como o trabalho corresponde à variação de energia, podemos escrever que

$$T = E_{p2} - E_{p1}$$

Comparando agora com a equação do trabalho vista acima, podemos concluir que:

$$E_p = - \frac{G.Mm}{r}$$



6. Imponderabilidade

Um astronauta dentro de um satélite que gira em torno da Terra vê os objetos que o cercam flutuarem. Se tentasse determinar o peso de um objeto dentro da nave com uma balança obteria resultado nulo. Diz-se então — incorretamente, conforme veremos — que os objetos “não têm peso” na nave, que estão “livres da gravidade”. Peso de um corpo é a força com que a Terra atrai esse corpo. A Terra exerce uma força sobre o satélite e sobre todos os objetos dentro dele: é por causa dessa força que o satélite e o seu conteúdo têm uma aceleração e permanecem em órbita. Por que então a balança não acusa este peso? É porque a própria balança tem a mesma aceleração do objeto e do satélite; estão todos em queda livre.

Explicamos melhor, abandonando por um momento o satélite. Suponha que você está de pé sobre uma balança colocada em um elevador.

Q28 — Se a sua massa é 60kg, quanto indicará a balança se o elevador estiver parado?

Q29 — Se agora o cabo do elevador se rompe e ele cai em queda livre (isto é, com aceleração g), qual será a força indicada pela balança?

Se o elevador com a balança está caindo livremente, você não pode exercer nenhuma

RESPOSTAS

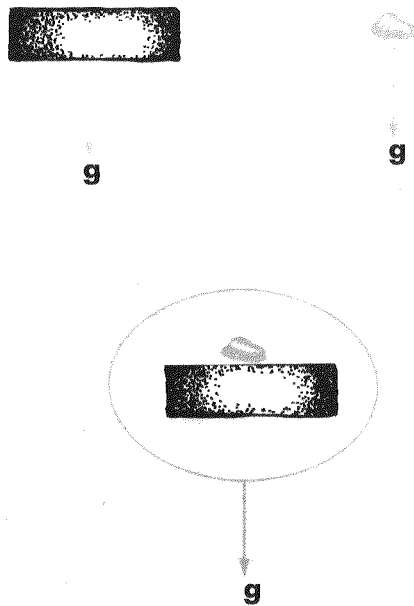


figura 3

força sobre a balança: só se a balança se opusesse ao seu movimento, freando-o, ela exerceria alguma força sobre você. Mas isto não ocorre. Tudo — você, a balança e o elevador — está caindo junto com a mesma aceleração g . Em cada instante todos têm a mesma velocidade. Você não empurra a balança nem esta empurra o elevador: os três estão sendo acelerados pela força de gravidade da Terra. Não há forças agindo entre os três corpos.

Vejamos outro exemplo. Considere um pedregulho e um tijolo (figura 3). Se o tijolo cai sozinho, tem aceleração g . Se o pedregulho cai sozinho, tem mesma aceleração g . Agora, colocamos o pedregulho sobre o tijolo e deixamos ambos caírem juntos (figura 3b). A aceleração de ambos continua sendo g , o que mostra que a força resultante que age sobre cada um é a mesma que quando cada um cai sozinho: o pedregulho não empurra o tijolo, nem o tijolo freia o pedregulho.

- Q30** — Um cavalo dispara com seu cavaleiro e salta em um precipício. Qual a força que o cavaleiro exerce sobre o cavalo:
- antes da queda?
 - durante a queda?

A situação de uma nave em órbita em torno da Terra é semelhante. Todos os objetos que estão dentro dela encontram-se sob a ação da gravidade, que comunica a todos a mesma aceleração.

O astronauta não pode medir o peso de um objeto, porque ele e o objeto estão caindo com

R₂₈ -

R₂₉ -

R₃₀ -

R₃₁ -

R₃₂ -

R₃₃ -

a mesma aceleração. Para ele parece que os objetos não têm peso, que são imponderáveis. A queda do satélite não é vertical porque ele tem velocidade inicial horizontal, mas não deixa de ser uma queda com aceleração da gravidade.

Q31 — Por que a Lua não cai?

Q32 — O satélite está livre da gravidade?

Q33 — Por que o astronauta não pode pesar um objeto dentro do satélite com uma balança?

A expressão "livre de gravidade" não tem significado em nosso universo, pois nele existem massas. Qualquer corpo, esteja onde estiver, está sob a ação da gravidade devido à ação gravitacional do resto do Universo.

Naturalmente a intensidade dessa ação gravitacional diminui com a distância, mas nunca é nula.

A situação de uma **nave perdida** no espaço, poderíamos dizer, é equivalente à de uma nave em **órbita**. O astronauta em uma nave com os motores desligados sabe que está em "queda livre", isto é, que está sujeito somente à ação gravitacional quando todos os objetos no interior da nave estão flutuando. Se num dado instante os objetos caírem no piso da nave e o astronauta sentir uma força que o comprime contra o piso, saberá que a nave não está mais em queda livre, mas sofreu ação de outras forças além das gravitacionais: ou o motor da nave foi ligado, ou ela colidiu com um outro corpo, por exemplo, pousando na superfície de um astro.



Antigo mapa (de G. C. Eimmart) das constelações do Hemisfério Austral.

R28 — $60\text{kg} \cong 600\text{N}$.

R29 — Zero.

R30 — a) O peso do cavaleiro.
b) Zero.

R31 — Cai: ao percorrer sua órbita em torno da Terra, está permanentemente caindo

em direção à Terra, isto é, sendo acelerada para a Terra. Entretanto, sua velocidade horizontal é suficiente para evitar que esta queda resulte em uma colisão com a Terra.

R32 — Não.

R33 — Porque ambos estão em queda livre, isto é, têm a mesma aceleração.

Leitura Suplementar

O Universo em que vivemos

O homem há muito tempo que olha para o céu, que o estuda, tenta entender e procura interpretar. Você deve estar ciente, pelo menos vagamente, dos esforços humanos visando à compreensão do Firmamento, da Abóbada ou Esfera Celeste; desse espaço misterioso, que à noite, quando o Sol se põe, além dos planetas visíveis a olho nu, nos aparece polvilhado de estrelas, riscado por eventuais meteoros e, de raro em raro, pelos cometas.

Neste artigo vamos descrever em linhas gerais o Universo tal como os cientistas imaginam hoje que seja. Inicialmente vamos falar da Via Láctea, das galáxias e dos quasares (seções 1, 2 e 3). Depois vamos resumir a teoria atual da formação das galáxias e das estrelas (seção 4), especialmente do sistema solar (seção 5). Finalmente, a última seção dá uma idéia da cosmologia baseada na teoria da relatividade geral.

1. Primeiras impressões — a Via Láctea

Os nossos antepassados tinham certamente, até muito pouco tempo, uma visão muito diferente, sob todos os aspectos, da que se tem agora. E com isso nós queremos dizer não apenas que ao olhar o céu noturno os nossos avós e os nossos pais tinham muito menos informação a extrair, mas, também, que eles podiam **ver** o céu. Nós, hoje, aglomerados em enormes cidades, cercados das luzes artificiais, da poeira e dos gases do nosso progresso, mal e mal, através dessas luzes e dessas nuvens de poluição, conseguimos entrever algumas pálidas estrelas.

Mas suponhamos que você more longe de um grande centro ou que possa se afastar dele e que, numa noite sem nuvens e sem umidade na atmosfera, se ponha a olhar para "cima".

A primeira observação que queremos fazer, e que é de suma importância, é que quando se olha para cima, o que se está fazendo, na realidade, é olhar para **trás**. Isso é fácil de compreender, já que a luz (e, aliás, toda a radiação eletromagnética, como raios X, raios ultraviole-

ta, luz visível, infravermelho, ondas de rádio) se propaga no espaço vazio à velocidade constante de 300 000km/s. Desse modo, a luz refletida da superfície da Lua leva pouco mais de um segundo para nos alcançar, enquanto que a do Sol demora mais de oito minutos e a da estrela mais próxima (Alfa Centauro) só nos atinge após quatro anos. Portanto, à medida que a nossa visão se vai aprofundando na imensidão do Cosmo, nós não estamos apenas mergulhando no espaço, como também no tempo, essas duas entidades indissolavelmente interligadas, como nos ensinou Einstein na Teoria da Relatividade. Em outras palavras, à medida que formos afastando a nossa vista da Terra, iremos vendo objetos celestes como eles eram em tempos cada vez mais remotos no passado (se você não entendeu direito o que acabou de ser dito, pare um pouco e pense).

Percebe-se, também, que enquanto nós nos detivermos no estudo e na descrição das coisas imediatamente à nossa volta — do sistema solar — as dimensões envolvidas serão suficientemente "pequenas" para que se possam usar, na medida de distâncias, as unidades usuais, empregadas nas medidas terrestres. Assim, diz-se que a distância média da Terra à Lua é de 400 000km, ao Sol é de 150 milhões de quilômetros, e a Plutão, o mais afastado dos planetas, de 6 bilhões de quilômetros (6×10^9 km). Contudo, quando se começa a tratar com as distâncias às estrelas (mesmo as mais próximos), faz-se necessário um outro padrão de distância. Diz-se, pois, que Alfa Centauro se encontra a 4,3 anos-luz, o que corresponde à distância percorrida pela luz em 4,3 anos, ou seja, aproximadamente $4,3 \times 10^{13}$ km.

Dito isto, voltemos ao quadro que se depara ante os seus olhos, quando você, numa noite de atmosfera límpida, de preferência sem Lua e no alto de uma montanha, se põe a admirar os astros. A princípio, você verá apenas, muito provavelmente, a moldura habitual de estrelas, distribuídas ao acaso e agrupadas pela imaginação humana em constelações, entre as quais você identifica facilmente o Cruzeiro do Sul e as Três Marias. Poderá ver ainda um ou mais planetas (como Vênus, Marte, Júpiter) e um ou outro meteoro queimando-se na atmosfera. Depois, olhando com um pouquinho só de mais atenção, você distinguirá, sem dificuldade, numa certa direção, uma faixa mais brilhante de estrelas, ocupando um grande arco esférico ao longo da abóbada noturna. Essa é a Via Láctea. Surge, então, possivelmente, a primeira pergunta: o que é? O que representa essa faixa brilhante de estrelas? O que é essa Via Láctea?



Nebulosa do Lago — Constelação de Sagitário (foto: Monte Palomar).

A resposta a isso, por incrível que lhe possa parecer, não nos vai fazer recuar muito no tempo, levando-nos apenas a uns 50 anos atrás. Com efeito, só na década dos vinte é que os astrônomos começam a poder compreender as **galáxias** e a resposta à pergunta acima está intimamente relacionada com a compreensão destas últimas.

2. Estrelas e nebulosas

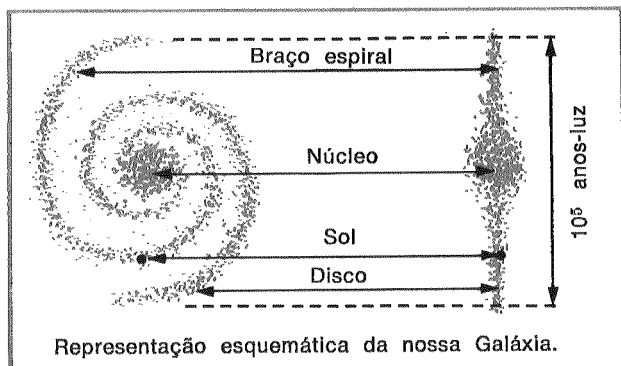
É praticamente a partir do século XVII, com o fabrico dos primeiros telescópios (Galileu foi um dos que primeiro efetuaram observações sistemáticas com os telescópios por ele mesmo construídos), que o homem começa a ter uma visão um pouco mais nítida do espaço que o cercava. A revolução já havia começado com Copérnico, o qual nos havia lançado inexoravelmente — e para sempre — da posição altamente privilegiada que ocupáramos, até então, no centro do Universo. Copérnico tira à Terra esse lugar para dá-lo ao Sol.

Nós não podemos fazer aqui (nem o pretendemos) um histórico do desenvolvimento do conhecimento humano sobre o Universo. Mencionaremos apenas os nomes de Tycho Brahe, Johannes Kepler e Isaac Newton como os homens que, além de Copérnico e Galileu, mais decisiva-

mente contribuíram, ao longo dos séculos XVI e XVII, com as suas observações — e com a formulação das leis que as comprovavam — para a nossa gradual compreensão do mundo que nos cerca.

Durante os séculos XVIII e XIX, com o aprimoramento dos telescópios, o número de objetos catalogados pelos astrônomos continuou a aumentar progressivamente e são famosos os catálogos de Herschel e de Messier.

Mas que objetos eram esses? Eles recaíam, essencialmente, em duas largas categorias (excluindo coisas menores como cometas, planetas e asteróides): **estrelas** e **nebulosas**. Se pouco se sabia sobre a primeira dessas categorias — as estrelas —, nada se conhecia sobre a segunda — as nebulosas. Estas últimas apareciam, seja nas oculares dos telescópios, seja nas chapas fotográficas como uma pequena mancha imprecisa, difusa, nebulosa (daí o seu nome), enquanto que as estrelas apareciam como pontos nítidos e bem definidos. Com o aumento do poder de resolução das lentes dos telescópios empregados é que se pôde, finalmente, verificar que muitas dessas nebulosas consistiam, na realidade, de imensos aglomerados de estrelas — enormes arquipélagos de estrelas —, as **galáxias**. Mas a incógnita persistia: esses arquipélagos, esses aglomerados pertenciam ao nosso sistema de estrelas, à nossa galáxia, ou bem constituíam eles próprios outros sistemas, outras galáxias espalhadas pelas



Galáxia de Andrômeda

vastidões do Universo? Essa dúvida (surgida já no século XVIII) só foi dirimida em 1924, quando, finalmente, e de maneira inequívoca, se pôde concluir que o nosso arquipélago de estrelas, chamado a Galáxia, não é o único no espaço, sendo apenas um entre muitos bilhões de outros.

Hoje em dia, o termo nebulosa é quase que exclusivamente reservado para designar as grandes concentrações amorfas de gases e poeira, encontradas nas regiões interestelares de nossa galáxia. Com o desenvolvimento da técnica fotográfica, conseguem-se tirar belíssimas fotos coloridas dessas nuvens, dessas nebulosas, iluminadas, por assim dizer, pelas estrelas mais próximas.

3. Os arquipélagos do espaço

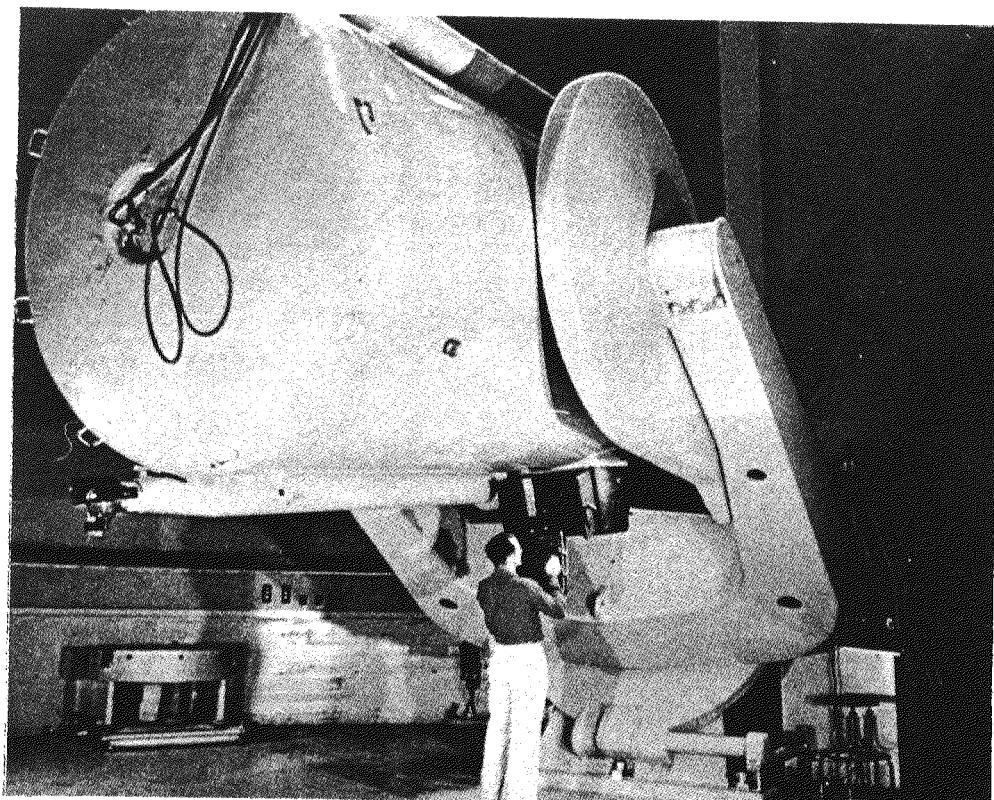
Em linhas gerais, a visão atual do homem sobre o Universo é a seguinte. As estrelas agrupam-se em galáxias, as quais contêm, tipicamente, muitos bilhões de estrelas e que se distribuem por regiões do espaço da ordem de dezenas e até centenas de milhares de anos-luz de diâmetro e possuindo formas que vão desde quase esferas a elipses alongadas (galáxias elípticas, as mais comuns de todas), a espirais (galáxias espirais), a formações irregulares (galáxias irregulares).

A galáxia em que vivemos, a Galáxia, consiste num enorme disco achatado (com espessura de 1 000 anos-luz na região do Sol), de forma espiral, contendo cerca de 100 bilhões de estrelas (10^{11}), com uma massa de 200 bilhões de vezes a do Sol (por falar nisso, a massa do Sol é de $1,99 \times 10^{33}$ kg) e um diâmetro, aproximadamente, de 100 mil anos-luz. As estrelas nas galáxias tipo espiral (como a nossa) distribuem-se essencialmente num plano — **o plano galáctico** — com uma concentração muito maior na região central do disco — **o núcleo galáctico**.

Para um observador exterior à Galáxia, a visão que ele teria seria muito aproximadamente igual à da enorme galáxia espiral Andrômeda, situada a dois milhões e duzentas mil anos-luz de nós.

Estamos agora em condição de responder à nossa pergunta inicial. O que é a Via Láctea, essa faixa brilhante de estrelas ao longo da abóbada celeste? Ela representa, meramente, a maior concentração de estrelas distribuídas no plano da Galáxia, de modo que, ao se olhar nessa direção, ver-se-ão muito mais estrelas do que em qualquer outra (examine as figuras no alto da página). O nosso Sol ocupa uma posição perto desse plano e a uns 30 mil anos-luz do centro da Galáxia.

Prossigamos com a nossa descrição em largas pinceladas do Universo. Não são apenas as estrelas que se agrupam em galáxias. Estas mesmas se distribuem em **aglomerados**, contendo de-



O telescópio refletor Schmidt em Monte Palomar tem 120cm de diâmetro e complementa o grande telescópio Hale, de 500cm de diâmetro, pois permite examinar de uma só vez regiões maiores do céu. É útil para catalogação dos corpos celestes.

zenas, centenas e até milhares de galáxias, cada um deles. A Galáxia pertence a um grupo de 17, o aglomerado local (ao qual Andrômeda também pertence) e que ocupa uma região do espaço da ordem de 7 milhões de anos-luz. Além desses aglomerados, podem-se distinguir superaglomerados, consistindo cada um deles de aglomerados de galáxias e ocupando regiões do espaço entre 100 e 150 milhões de anos-luz.

Até onde a nossa observação possa alcançar, usando os mais potentes telescópios (como o de Monte Palomar, na Califórnia, que é o maior telescópio óptico do mundo, ou com os grandes radiotelescópios), observa-se que as galáxias e os aglomerados destas se distribuem uniformemente pelo espaço em todas as direções.

À medida que a nossa vista se alarga e nos vamos aprofundando nas imensidões do espaço, vamos, também, mergulhando no tempo, deparando-nos, pois, com um passado cada vez mais remoto. A visão das galáxias que nos chega das profundezas do espaço será, portanto, aquela que elas possuíam há muito tempo atrás.

Chega-se, assim, aos **quasares**, misteriosos objetos descobertos em 1963, que parecem representar galáxias em formação e cuja luz parece ter percorrido diversos bilhões de anos-luz antes de nos alcançar.

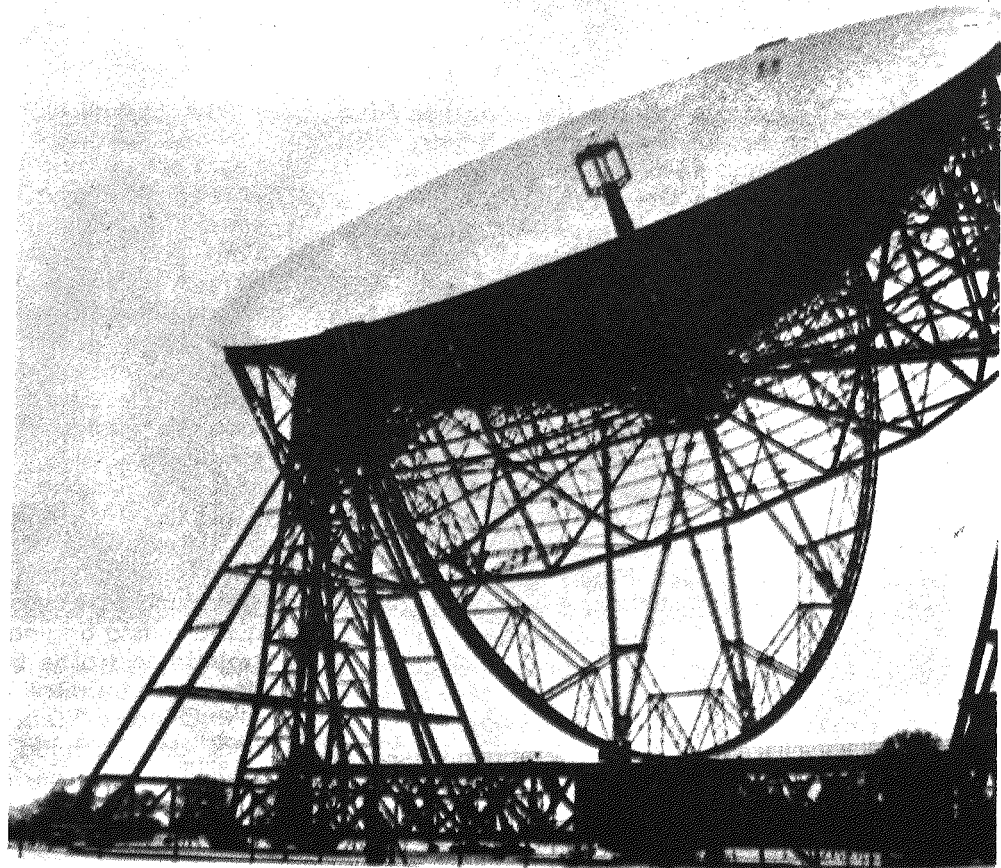
Essa é a nossa fronteira atual. A fronteira que nos é dada pelos mais potentes telescópios e radiotelescópios, sendo muito difícil e extremamente arriscado especular sobre o que as nossas

futuras observações desvendarão. Sobre tudo se nos lembrarmos que a nossa visão e compreensão do Universo à nossa volta tem sido substancialmente modificada de uns poucos anos para cá.

4. Nascimento, vida e morte das estrelas

Apesar da teoria completa da formação de uma galáxia ser altamente complicada e ainda não se poder dizer que se conhecem todos os detalhes, daremos, a seguir, um esboço extremamente simplificado da mesma. O processo se inicia com uma imensa nuvem de gás, extremamente tênue e composta essencialmente de hidrogênio (89%) e de hélio (11%). Devido à atração gravitacional entre as partículas da nuvem, esta começa a contrair-se, de maneira que a sua densidade e temperatura médias vão aumentando. Nesta visão extremamente simplificada da teoria, a galáxia é considerada como uma condensação de uma nuvem rarefeita de gás, em que as partículas ocupam originalmente um volume muito maior do que aquele ocupado finalmente.

Também cada estrela da galáxia é vista como uma subcondensação: átomos de gás e partículas maiores do meio galáctico começam lentamente a juntar-se, devido à influência gravitacional mútua de uns sobre os outros. À medida que



Radiotelescópio de Jodrell Bank (Inglaterra). Sua "concha" parabólica tem aproximadamente 82 metros de diâmetro e pode ser "apontado" para qualquer direção.

a matéria se vai condensando, a energia potencial gravitacional diminui, enquanto que, por outro lado, a energia cinética das partículas cresce, isto é, a temperatura do sistema aumenta. Com o acréscimo de temperatura, a pressão no centro do sistema aumenta até que essa pressão é suficientemente elevada para compensar a atração gravitacional e sustar o processo de contração do meio gasoso. Embora a pressão, a densidade e a temperatura continuem a aumentar lentamente na região central, o sistema terá atingido uma situação de quase equilíbrio, podendo-se afirmar que cessou a primeira fase gravitacional. Em outras palavras, terá nascido uma estrela.

Para temperaturas suficientemente elevadas, começam a ocorrer reações nucleares no núcleo da estrela (na sua região central), as quais transformam hidrogênio em hélio, com grande liberação de energia. Essa fase nuclear é a mais longa da vida de uma estrela — o Sol se encontra nela — e é um estágio em que, por causa da liberação de energia nuclear, não ocorre contração gravitacional.

A quantidade de hélio vai aumentando e a de hidrogênio diminuindo na parte central da estrela, até que este último se acabe. Agora, essa parte central começa a contrair-se gravitacionalmente, de modo que a temperatura, a densidade e a pressão recomeçam a aumentar e se libera energia potencial gravitacional, a qual obriga as regiões exteriores da estrela a crescerem exageradamente em tamanho. Com isso, essa parte mais externa decresce muito em densidade e tem-

peratura, tornando-se vermelha. A estrela terá alcançado a fase de uma **gigante vermelha** (o Sol deve lá chegar dentro de mais alguns bilhões de anos).

Entretanto, parte da energia gravitacional liberada na contração do centro das gigantes vermelhas serve para aumentar ainda mais a temperatura desses centros, os quais atingem valores superiores a 10^8 °C. A seguir ocorre um processo pelo qual o hélio é rapidamente consumido (em questão de segundos), fazendo com que o núcleo se expanda e a parte externa diminua de tamanho. Tem-se, agora, um centro contendo carbono e, possivelmente, elementos mais pesados.

Uma vez esgotado o hélio, a estrela recomeça, mais uma vez, a contrair-se e a emitir energia potencial gravitacional. Advém a última etapa na "vida" da estrela, que levará, por colapso gravitacional, ao seu estágio final e definitivo. Dependendo da massa inicial da nuvem de gás e poeira com que se iniciou todo o processo, o colapso gravitacional da estrela pode conduzi-la a três situações finais, drástica e dramaticamente diferentes: anãs brancas, estrelas neutrônicas e buracos negros.

Dentre as três categorias acima, a das **anãs brancas** é, de longe, a mais "normal" e a única conhecida há já bastante tempo. A estrela se contrai por efeito gravitacional até atingir um pequeno raio (da ordem do da Terra, isto é, alguns milhares de quilômetros) e uma alta densidade (de 50 mil a um milhão de vezes superior à da água). Cessada a contração, a estrela se manterá inde-

finidamente nessa configuração estável, esfriando-se gradativamente até se transformar, eventualmente, numa **anã preta** — um "planeta" de densidade altíssima, onde a matéria não tem as mesmas propriedades que possui a baixas densidades.

Já a segunda categoria é bem mais espetacular. Nenhuma anã branca pode ter massa superior a 1,2 massas solares, de maneira que, para valores maiores do que esse, o colapso gravitacional da estrela pode levá-la a uma situação final radicalmente diferente.

Ao atingir o estágio de gigante vermelha, esses sistemas mais massivos sofrem uma contração gravitacional muito mais drástica. Atinge-se uma situação em que, subitamente, a parte central da estrela **implode**, diminuindo enormemente de tamanho e a parte externa **explode**. Devido à explosão, a luminosidade da estrela aumenta desmesuradamente durante alguns dias: surge no céu uma **supernova** (já conhecida pelos antigos astrônomos chineses).

Tem-se, então, o seguinte: o centro reduziu-se a uma pequena esfera (da ordem de 10km de raio) e densidade muito maior que a das anãs brancas, da ordem, efetivamente, da existente, nos núcleos atômicos!

Esses são os **pulsares** (descobertos, pela primeira vez, em 1967), também conhecidos por **estrelas de nêutrons** ou **estrelas neutrônicas**, já que a sua composição consiste, essencialmente, de nêutrons muito compactados. A princípio, acreditava-se que esses gigantescos núcleos pulsavam (daí o seu nome), sabendo-se hoje que eles, em vez disso, giram muito rapidamente em torno do seu eixo, emitindo ondas eletromagnéticas com períodos muito precisos (uma imagem que pode ajudá-lo a compreender é a do feixe luminoso de um farol em rotação).

Chegamos, assim, à terceira e mais extrema possibilidade de colapso gravitacional. Como no caso das anãs brancas, também existe para as estrelas de nêutrons um limite superior para a massa (por volta de três massas solares), acima do qual mesmo a extraordinariamente elevada densidade do pulsar (100 milhões de vezes maior que a de uma anã branca) não seria suficiente para sustar a contração gravitacional. Qual seria, pois, de acordo com a teoria, o estágio final de todas as estrelas com massas superiores a três vezes a massa do Sol?

O que a teoria nos afirma (como consequência da Teoria da Relatividade Geral de Einstein) é que, embora se obtenham densidades cada vez mais elevadas, não é possível jamais atingir um estágio de equilíbrio final. O que se atinge, a situação que se alcança — um **buraco negro** —, é tão peculiar, que até mesmo as estrelas neutrônicas tornam-se coisas corriqueiras, em comparação.

Em linhas gerais, um buraco negro é uma **região do espaço** na qual desapareceu uma es-

trela e da qual região não pode escapar qualquer matéria ou energia. Pode-se descrever um buraco negro como uma região esférica, cujo raio é proporcional à massa do buraco (que é a massa da estrela original, que desapareceu por colapso). Para uma massa solar, o raio do buraco seria de 3km. A superfície da esfera é definida e caracterizada pelo fato de que qualquer sinal emitido do seu interior — seja luz, ondas de rádio, raios X, nêutrons, prótons, qualquer partícula — não pode atravessá-la e escapar para o exterior; por outro lado, de qualquer ponto no exterior podem se emitir sinais que, sob certas condições, escapem sem ser absorvidos para o interior do buraco negro.

Ainda de acordo com a Teoria da Relatividade Geral (que pode ser que não se aplique neste caso, embora seja a melhor que se tem) prevê-se que a massa original da estrela continue se contraindo dentro do buraco negro até atingir uma densidade infinita!

O nome buraco negro provém da propriedade de que nada pode escapar desse buraco: como um corpo perfeitamente negro absorve toda luz que incide sobre ele mas não emite luz nenhuma, assim, o buraco negro absorve toda e qualquer energia ou matéria que incida sobre ele, mas não emite nada. Por causa disto é difícil observar um buraco negro. Ele não emite luz nem outra radiação; sua presença precisará ser inferida a partir da influência que exerce sobre corpos vizinhos.

Embora as notícias sobre possíveis descobertas de buracos negros comecem a suceder-se no noticiário internacional, não se tem, até o momento, uma observação inteiramente conclusiva e decisiva.

5. A formação do sistema solar

Embora isso lhe possa parecer estranho, nós hoje sabemos muito menos sobre o processo detalhado que levou à formação do sistema solar, isto é, à condensação dos planetas, do que conhecemos sobre a formação, desenvolvimento e fim das estrelas. A razão para isso é, no entanto, bastante simples: no caso dos planetas, dispõe-se de muito menos evidência observacional, já que o único sistema planetário possível de observação é o nosso, e, embora se possa especular sobre a possível existência de inúmeros outros sistemas, será praticamente impossível chegar-se, um dia, a observá-los diretamente.

No caso das estrelas, tem-se-nas observado desde os primeiros estágios de condensação na nebulosa que lhes dá origem, até às últimas etapas, sob a forma de anãs brancas ou pulsares. Isso não é verdade, claramente, para o único sis-



A nebulosa do Caranguejo resultou da explosão de uma supernova em 1054 da nossa era. A nuvem de gás continua a expandir-se, já tendo alcançado hoje um diâmetro de 3 anos-luz. No centro da nebulosa existe um pulsar, que foi o que sobrou da explosão da estrela original; ele emite impulsos de luz e ondas de rádio cada 33 milissegundos, ou seja, 30 vezes por segundo.

tema planetário que podemos investigar, o qual tem sido estudado durante apenas uma fração ínfima de sua existência. É quase como se quiséssemos inferir toda a história evolutiva de um homem, desde a fecundação do óvulo à morte, por meio da análise de uma única fotografia.

Por um certo número de razões (entre as quais o fato de todos os planetas girarem na mesma direção e de suas órbitas pertencerem todas, aproximadamente, ao mesmo plano), a teoria que detém a preferência atualmente é, esquematicamente, a seguinte:

O Sol e os planetas formaram-se simultaneamente da mesma nuvem de gases e poeira, a qual deveria ser originalmente muito maior do que as dimensões do sistema planetário a que ela deu origem e deveria possuir um pequeno movimento rotatório (devido, possivelmente, à rotação da Galáxia). À medida que o gás se contraía, a maior parte da sua massa se concentrava na região central (dando lugar, eventualmente, ao aparecimento do Sol), ao mesmo tempo que a sua velocidade angular aumentava. A parte mais externa da nuvem em rotação foi se achatando num disco, no qual surgiram condensações — planetas num estágio primitivo ou protoplanetas. Os planetas propriamente ditos, de acordo ainda com esta teoria, ter-se-iam formado nas partes centrais e mais densas dessas condensações, enquanto que os seus satélites se originariam de subcondensações das mesmas.

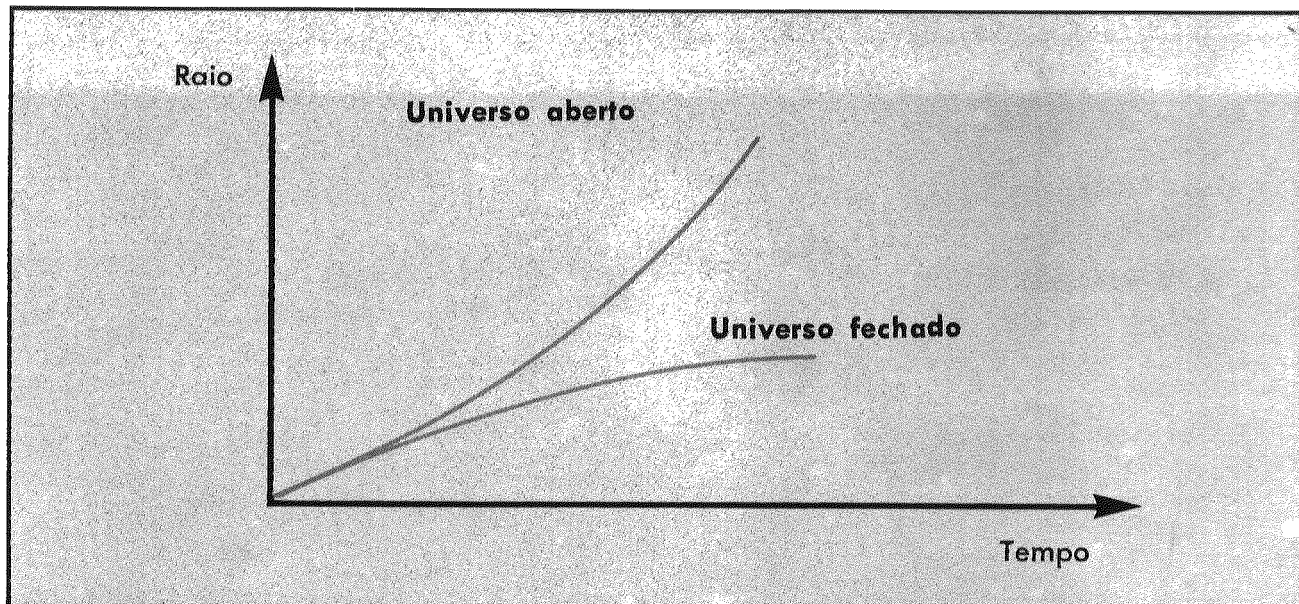
Esta teoria é coerente com a observação de outras estrelas semelhantes ao Sol. Sabe-se que, pelo menos nas vizinhanças do sistema solar, mais de 50% das estrelas parecem ser membros de um sistema contendo duas ou mais estrelas.

Alguns desses sistemas contêm membros invisíveis, devido ao seu pequeno tamanho e que são detectáveis apenas pelos efeitos gravitacionais sobre as estrelas visíveis. Em alguns casos, essas pequenas estrelas possuem massas bastante inferiores às de suas companheiras visíveis, podendo mesmo alcançar massas apenas da ordem da de Júpiter. É possível, pois, supor que muitas estrelas se condensem em sistemas binários ou múltiplos, podendo, ainda, freqüentemente, dar origem a planetas. Pode-se mesmo especular que o Sol e Júpiter constituam uma espécie de sistema estelar binário degenerado.

Se a formação do sistema solar se deu, efetivamente, aproximadamente como foi descrito acima, é de se esperar que possa haver um elevado número de sistemas planetários gravitando em torno de incontáveis estrelas, disseminadas por todos esses bilhões de galáxias existentes no Cosmo.

A idade do nosso sistema solar deve orçar por volta de 5 bilhões de anos (5×10^9 anos) e, de acordo com os cálculos, deve ainda continuar a existir por um período igual de tempo, antes que lhe sucedam mudanças apreciáveis. Passado esse intervalo, é de se esperar que o nosso Sol evolva para o estágio de uma gigante vermelha, quando a sua atmosfera possivelmente alcançará a órbita da Terra, terminando, então, qualquer forma de vida que ainda possa subsistir em nosso planeta.

Depois, seguindo as inexoráveis leis que as nossas teorias predizem, o Sol continuará a evoluir para uma anã branca, aparecendo, então, no céu escuro e sem atmosfera da Terra como um mero ponto muito brilhante.



6. Um pouco de Cosmologia

Pouco depois da descoberta de outras galáxias, além da nossa, constatou-se que elas se encontram todas afastando-se umas das outras, satisfazendo a lei de Hubble, de modo que as velocidades de recessão das galáxias são proporcionais às suas distâncias de nós. Já foram observadas galáxias afastando-se de nós com velocidades de recessão da ordem de metade da velocidade da luz. (Pense bem: um conjunto de bilhões de estrelas e com um tamanho de um bilhão de bilhões de quilômetros, deslocando-se à velocidade de 150 mil quilômetros por segundo!)

À primeira vista, poderia parecer que se as galáxias parecem todas afastar-se de nós, isso indicaria que nós nos encontrásemos no centro do Universo. Isso não é claramente verdade, bastando pensar na analogia bidimensional da superfície de um balão de borracha, onde se pintou uma série de pontos. À medida que se infla o balão, a sua superfície aumenta e ver-se-ão todos os pontos separarem-se uns dos outros, de tal modo que uma formiga colocada sobre qualquer dos pontos verá os demais se afastarem dela com velocidades proporcionais às distâncias. Uma analogia tridimensional é a de um bolo de passas no forno. Também, à medida que o volume do bolo aumenta, devido à ação do fermento, todas as passas se afastarão uma das outras: Um verme que está comendo uma das passas verá as passas que estão mais longe se afastarem mais depressa.

Esses são os dados que nos parecem advir da observação; esses parecem ser os fatos. Como explicá-los? Em que "contexto (teórico) inseri-los"? Pode a nossa inteligência ousar propor modelos que dêem conta e expliquem todo esse incalculavelmente enorme e inimaginavelmente complexo Universo que acabamos de descrever?

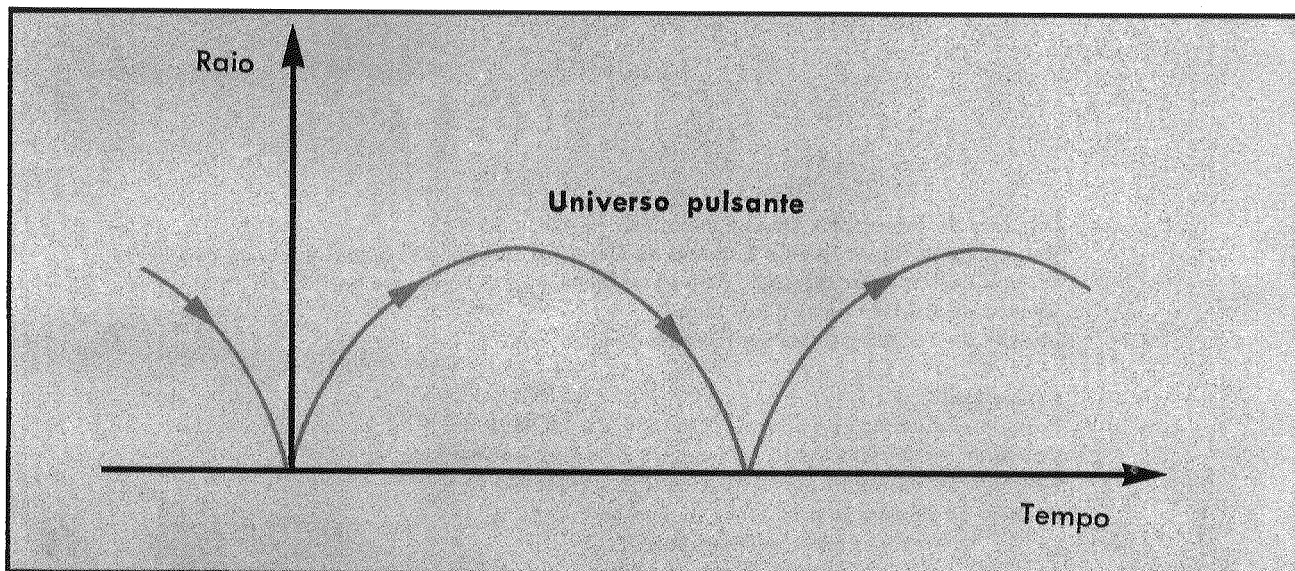
Já vimos como o homem, através de sucessivas teorias por ele elaboradas, tem conseguido explicar e dar conta dos complicadíssimos processos que regem a formação das galáxias, das estrelas e de seus planetas. Mas, e agora? Será que poderemos tentar entender o conjunto global? Todo o espaço-tempo com todo o seu conteúdo de matéria e energia? Será que, numa palavra, se poderá tentar entender, em termos humanos, o Universo? Vejamos:

A Teoria da Relatividade Geral (T.R.G.) é a teoria moderna da gravitação. Ela foi elaborada por Einstein em 1916 e prevê alguns resultados que a antiga teoria newtoniana não inclui (a deflexão de um raio de luz ao passar perto de um corpo massivo, por exemplo). Concomitantemente, ela é a moderna teoria do espaço-tempo, já que ela afirma que a estrutura do espaço é inteira e univocamente determinada pela distribuição de matéria e energia nele contidas.

Isso talvez seja mais ou menos fácil de aceitar, mesmo sem o conhecimento das idéias da T.R.G. Com efeito, nós viemos lançando mão sucessiva e repetidamente da atração gravitacional para explicar estrelas, galáxias, conglomerados de galáxias. Vimos que, embora por vezes outras forças possam atuar (como durante algum tempo no centro de certas estrelas, as forças nucleares), as forças gravitacionais voltam a imperar soberanas. De modo que, se a T.R.G. é a teoria da gravitação e esta é tão importante na formação dos grandes sistemas universais, talvez não seja tão estranho e surpreendente que essa mesma teoria determine a estrutura espaço-temporal do Universo.

Ora, Cosmologia é, justamente, a parte da Ciência que se dedica ao estudo da estrutura e da evolução do Universo. Pode-se perceber, conseqüentemente, que a T.R.G. forneça, precisamente, a base teórica para se entender o mundo (em particular, um mundo em expansão).

Para se fazer Cosmologia, isto é, para se poder tentar entender a estrutura espaço-tempo-



ral do Universo, tem-se que utilizar o chamado **Princípio Cosmológico**, o qual afirma que a parte do Cosmo que nos é dada analisar de nosso ponto de observação é representativa de todo o conjunto, não nos encontrando nós numa região privilegiada do mesmo.

Vejamos, a seguir, o que é que a T.R.G. nos pode indicar sobre este nosso mundo (nosso é como quem diz, mas, enfim!).

Logo após ter Einstein formulado a T.R.G., o cosmólogo Lemaitre lançou a idéia do "big-bang", ou grande explosão inicial. Resumidamente, isto consiste no seguinte: o Universo ter-se-ia originado, num certo instante, a partir de uma "bola de fogo" ou "átomo primevo" (nas palavras de Lemaitre), contendo toda a incomensurável energia que, por meio de uma enorme explosão, começou a espalhar-se, a rarefazer-se e a esfriar-se e de onde, eventualmente, surgiu o Universo tal como ele se nos depara hoje.

Pouco depois de Lemaitre haver proposto esse modelo, o matemático Friedman provou que a T.R.G. era consistente com a idéia de um Universo surgindo de um "big-bang" e expandindo-se posteriormente. Em outras palavras, a T.R.G. previa matematicamente a possibilidade de um Universo em expansão, o qual deixava, assim, de constituir mera especulação filosófica.

Dependendo da densidade média de matéria que exista disseminada pelo Cosmo, a T.R.G. prevê, essencialmente, duas classes de universos. Numa das classes, a expansão inicial não cessa jamais; o Universo continuará crescendo indefinidamente, já que as forças gravitacionais mútuas entre os corpos não serão nunca suficientes para fazê-lo reverter a essa situação. Essa é a classe dos universos "abertos". Na outra classe, a partir da explosão inicial, o Universo crescerá até um certo ponto, quando, então, as forças gravitacionais mútuas serão suficientes para contrabalançar a expansão. O Universo terá alcançado o seu raio máximo, a partir do qual ele começará a contrair-se gravitacionalmente, até o colapso gravitacional, quando se atingirá, novamente,

uma situação idêntica à inicial. Essa é a classe dos universos "fechados".

A hipótese de universos fechados levou mesmo alguns cosmólogos a sugerir a possibilidade da existência de uma série sucessiva de universos pulsantes:

... ntração → expansão → contração → expans...

Gamow e muitos outros dedicaram-se ao cálculo da "evolução" da matéria, a partir do momento de criação. Tem-se, hoje em dia, uma teoria bastante detalhada, que permite explicar a formação dos átomos mais leves, por meio de reações nucleares entre núcleos de hidrogênio (prótons). Os núcleos mais pesados surgem provavelmente apenas no interior das estrelas.

Evidentemente, só a observação pode decidir qual das possibilidades teóricas (se é que qualquer uma destas) está mais em acordo com as informações que se podem extrair do Cosmo.

Resultados recentes da observação parecem favorecer as cosmologias evolutivas do tipo Friedman-Lemaitre, esboçadas acima, inclinando-se, no momento, para uma solução de universo fechado. Assim é que, em 1965, foi detectada uma radiação de temperatura extremamente baixa (aproximadamente -270°C), que nos vem de todas as direções do espaço e que poderia muito bem consistir dos restos da explosão inicial.

Nós começamos esta seção perguntando se a nossa inteligência ousaria propor modelos que dessem conta e que explicassem esse incomensuravelmente enorme e inimaginavelmente complexo Universo que se apresenta à nossa investigação.

A resposta parece, ainda uma vez, ser positiva e, portanto, encorajadora. Encorajadora no sentido de se continuar a observar, a medir, a analisar, a especular, a teorizar. Não com o objetivo expresso de chegar o homem, algum dia, a uma verdade "final e absoluta", mas tão meramente para continuar a tentar dar respostas às contínuas dúvidas e indagações que o perseguem e inquietam há mais de dez mil anos.

Diretoria de Integração Aluno-Escola: Luiz Pasquale Filho
Departamento do Programa Editorial de Obras de Referência: Maria Aparecida de Oliveira
Divisão de Implementação do Programa: Maria Regina Fernandes de Souza
Divisão de Revisão: José Tedin Pinto
Divisão de Tecnologia Gráfica: Gioietta Timóteo Lana

Equipe editorial

Preparo técnico dos originais: Cecília Maria Silva Rêgo
Conjunto experimental (Kit): Elisabeth Euridice Tavares Mendes
Catologação na fonte: Maria Luisa de Souza Fragoso
Revisão de provas: Edinilce Freire da Fonseca
Sérgio Bellinello Soares
Sylvio Clemente da Motta
Produção gráfica: José Roberto Lisbôa

Preço: ver tabela

Esta obra foi impressa pela
EDITORA DO BRASIL S/A.
Av. Mal. Humberto de Alencar Castelo Branco, 368
Fone: 913-4141 — Guarulhos — SP
para a
FAE — Fundação de Assistência ao Estudante
Rua Miguel Ângelo, 96 — Maria da Graça
Rio de Janeiro — RJ — República Federativa do Brasil
em 1984.