

# AMOSTRA

## COLEÇÃO FÍSICA EM CONTEXTOS

PESSOAL  
SOCIAL  
HISTÓRICO

O material a seguir é uma amostra que representa a essência da coleção Física em contextos. Por se tratar de uma obra pouco convencional, escolhemos apresentar uma unidade completa e um capítulo diferenciado, que exemplificam as opções metodológicas.

A unidade selecionada foi a quarta (e última) do primeiro volume, chamada Astronomia, que compõe o bloco temático sobre a história da Cosmologia e o estudo da Gravitação. Nela integramos os conteúdos conceituais mais tradicionais do tema com uma abordagem que valoriza a Ciência como atividade humana.

O capítulo escolhido foi o décimo quarto, o último do terceiro volume, que trata das Partículas elementares. Esse capítulo compõe a unidade Radiação e Matéria. É um conteúdo de Física Contemporânea que, em geral, é pouco abordado no Ensino Médio por causa de sua complexidade, mas que foi escolhido para fazer parte da coleção por causa da importância para a Física atual.

### MAURÍCIO PIETROCOLA PINTO DE OLIVEIRA

Licenciado em Física e mestre em Ensino de Ciências pela Universidade de São Paulo. Doutor em Epistemologia e História das Ciências pela Universidade de Paris VII. Foi professor de Física em escolas de Ensino Médio. É atualmente professor associado da Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo.

### Alexander Pogibin

Pedagogo, licenciado em Física pela Universidade de São Paulo.

Ex-professor de escolas públicas e particulares.

Participante de diversos projetos na área de ensino de Física e de Educação em geral.

### Renata Cristina de Andrade Oliveira

Licenciada em Física pela Universidade de São Paulo, é professora de escolas públicas e particulares de Ensino Médio e mestrande em Ensino de Ciências pela Universidade de São Paulo. Já atuou em museus de ciências e shows de divulgação científica.

### Talita Raquel Luz Romero

Licenciada em Física pela Universidade de São Paulo, já atuou com formação de professores de Ciências.

Atualmente realiza pesquisas e produção de material didático com o NUPIC – Núcleo de Pesquisa em Inovações Curriculares e é mestrande em Ensino de Ciências pela USP.



# Apresentação

## A Física

### no tempo e na história

Para iniciar o volume, elaboramos uma linha do tempo com os personagens, as descobertas e as invenções relacionados aos períodos históricos tratados.



## Explorando o assunto

Seção composta de questões para interpretação de texto ou para reflexão sobre um conceito. Nesse momento, pare a leitura do texto e pense sobre a questão.



## Exercício resolvido

Nesta seção, alguns exercícios, considerados "exemplares", estão resolvidos. Sugerimos que você acompanhe as estratégias de resolução de problemas.

## Por dentro do conceito



Detalhes mais específicos de um conceito são apresentados no decorrer dos textos desta seção.

## O cientista no tempo e na história



Pequena biografia dos principais cientistas. Nesta seção, você vai conhecer parte do contexto social em que um cientista esteve imerso, bem como seu aspecto humano.

## Lembrete

Notas rápidas, durante a teoria, principalmente para reforçar as descrições matemáticas ou apresentar algum detalhe delas.

Acompanha a seguir uma breve descrição de cada seção proposta nos volumes desta coleção.

## Explorando a situação



Nesta seção, discorremos sobre uma situação específica ou uma simples descrição experimental em que um problema é analisado segundo um conceito físico recém-apresentado. Acompanhe atentamente a discussão feita no texto.

## Exercícios propostos



São os exercícios de aplicação para a apreensão do conteúdo.

## Técnica e tecnologia



Seção com textos sobre a relação da Física com a tecnologia atual. Com esses textos, você conhecerá parte da história da técnica ligada à produção de um conhecimento científico.

## Ordem de grandeza



Esta seção traz valores numéricos e unidades de medida para algumas grandezas físicas relacionadas aos conceitos estudados. Com esses textos você terá uma compreensão quantitativa dos fenômenos físicos.

## Exercícios propostos



Seleção de exercícios, no final de cada capítulo, em geral mais elaborados e selecionados a partir dos principais vestibulares do país.

## Outras ATIVIDADES

No final de cada capítulo, você encontra esta seção com diferentes formas de trabalho. Aproveite para realizar as atividades com seus colegas para a discussão ficar mais rica.



### Experimento Investigue voce mesmo

Presente na maioria dos capítulos, trata-se de procedimentos experimentais com materiais simples e de baixo custo que podem ser realizados em sala de aula ou em casa.

### Foi assim... Investigue com o pesquisador

Nesta atividade, convidamos vocês a trabalhar com o texto original de um importante cientista (pesquisador) do passado.

### Pesquise, proponha e debata

Nesta seção, propomos principalmente atividades que envolvem pesquisa em diferentes meios de comunicação ou debates coletivos para a proposição de ideias, argumentos ou estratégias de resolução de problemas. Com o conhecimento adquirido, vocês devem confeccionar um produto final para apresentá-lo ao restante da sala ou negociar com seus colegas uma resposta única para a conclusão do debate.

### Problemas abertos

Nesta atividade, não existe uma resolução ou resposta correta. Você deve elaborar estratégias de resolução de problemas por meio de levantamento de hipóteses coerentes com o enunciado e com o conhecimento que já possuem.

### Na estante Para ler e assistir

No final de cada unidade, são sugeridos livros e filmes que complementam, por meio de outras linguagens, o conteúdo abordado.

### Questões do ENEM

Exame Nacional  
do Ensino Médio

Seleção dos exercícios relacionados ao conteúdo de Física dos últimos exames do ENEM. Esta seção é encontrada no final do volume.

# Volume 1

## Unidade 1

### Bases do conhecimento físico 17

#### Capítulo 1

##### Do caos ao Cosmos 18

- 1 • Ordem e desordem a nossa volta 18
- 2 • A concepção de Universo desde o homem primitivo até o atual 20
- 3 • Cosmologia: o estudo da origem e da evolução do Cosmos 22
- 4 • Os ciclos da natureza e a história dos calendários 31

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Ordem e organização 38
- Pesquise, proponha e debata – Cosmologias indígenas brasileiras 38
- Foi Assim... Investigue com o pesquisador – A organização do Universo segundo Aristóteles 40

#### Capítulo 2

##### A Física e o método científico moderno 42

- 1 • O que faz um cientista? 42
- 2 • Produzindo medidas 43
- 3 • Modelização matemática 54

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Algarismos significativos 61
- Experimento – Investigue você mesmo – Dominó 63
- Problema aberto – Tempo × movimento 64
- Na estante – Para ler e assistir 65

## Unidade 2

### Cinemática – Movimento e sua descrição 67

#### Capítulo 3

##### A busca da ordem nos movimentos 68

- 1 • Pensando em movimento 68
- 2 • Descrição do movimento 73
- 3 • Os movimentos bem-comportados – O movimento uniforme 98

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Modelando um movimento uniforme 109
- Pesquise, proponha e debata – Movimentos iguais ou diferentes? 110
- Problema aberto – Atravessando uma rua 111

#### Capítulo 4

##### Investigando a queda dos corpos 112

- 1 • O movimento natural segundo Aristóteles 112
- 2 • Um movimento menos comportado – A queda dos corpos 114
- 3 • A variação da velocidade e suas consequências  
– A queda dos corpos e outros movimentos 119
- 4 • Aceleração média – Definição e cálculo 124

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Investigando os movimentos retilíneos uniformes e os uniformemente variados 134
- Pesquise, proponha e debata – O experimento de Galileu em outros mundos 135
- Foi assim... Investigue com o pesquisador – Um diálogo sobre a queda livre 136

#### Capítulo 5

##### Outros movimentos retilíneos 138

- 1 • O movimento não natural – Movimentos que precisam de uma ação 138
- 2 • Lançamento vertical 139
- 3 • Movimentos acelerados no plano horizontal 146

##### Outras atividades

- Pesquise, proponha e debata – Fotos estroboscópicas 159
- Experimento – Investigue você mesmo – Lançamento de foguete I 160

#### Capítulo 6

##### Os movimentos não retilíneos 162

- 1 • Lançamento horizontal 162
- 2 • Grandezas vetoriais × escalares 167
- 3 • Lançamento oblíquo 172
- 4 • Movimentos circulares 176

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Lançamento horizontal 190
- Experimento – Investigue você mesmo – Lançamento de foguete II 191
- Na estante – Para ler e assistir 192

## Unidade 3

### Dinâmica – Movimento e sua causa 193

#### Capítulo 7

##### Investigando a ação das forças 194

- 1 • Força 194
- 2 • Forças no cotidiano 196
- 3 • Outras forças 219
- 4 • Tipos de força 220

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Construindo um dinamômetro e verificando a lei de Hooke 227
- Experimento – Investigue você mesmo – Observando a força de atrito em diferentes superfícies 228
- Pesquise, proponha e debata – A tecnologia do atrito 229

#### Capítulo 8

##### Equilíbrio de forças 230

- 1 • Estática e equilíbrio de um corpo 230
- 2 • Momento de uma força 234
- 3 • Máquinas simples 236
- 4 • Equilíbrio em fluidos 243

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Pássaro equilibrista 258
- Experimento – Investigue você mesmo – Balança de braços 259
- Pesquise, proponha e debata – Flutua ou afunda? 260
- Experimento – Investigue você mesmo – Princípio de Arquimedes 261

#### Capítulo 9

##### Newton e suas leis 262

- 1 • Primeira lei de Newton ou princípio da inércia 262
- 2 • Segunda lei de Newton ou princípio fundamental da dinâmica 266
- 3 • Terceira lei de Newton ou princípio da ação e reação 270
- 4 • Utilizando as leis de Newton: sistemas de corpos 275
- 5 • Utilizando as leis de Newton: elevadores 281
- 6 • Utilizando as leis de Newton: movimentos circulares 284

##### Outras atividades

- Experimento – Comprove você mesmo – Inércia 297
- Experimento – Investigue você mesmo – Lançamento de foguete III 297
- Pesquise, proponha e debata – A tecnologia do cinto de segurança e a inércia 298
- Problema aberto – Chuva de canivete? 299
- Foi assim... Investigue com o pesquisador – *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* 300
- Na estante – Para ler e assistir 304

## Unidade 4

### Astronomia 305

#### Capítulo 10

##### História da Cosmologia 306

- 1 • O universo geocêntrico dos gregos: o culto aos círculos 306
- 2 • A “física” aristotélica 309
- 3 • A Física e a Cosmologia na Idade Média 313
- 4 • Copérnico e o sistema heliocêntrico 318
- 5 • A consolidação do heliocentrismo 322

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Observando o movimento do céu 332
- Pesquise, proponha e debata – Giordano Bruno 333
- Foi assim... Investigue com o pesquisador – *De Revolutionibus Orbium Coelestium* 334

#### Capítulo 11

##### Gravitação universal 336

- 1 • As leis de Kepler 336
- 2 • Newton e a consolidação do sistema heliocêntrico 344
- 3 • Satélites naturais e artificiais 350
- 4 • Campo gravitacional e aceleração da gravidade 355
- 5 • A vida das estrelas 358

##### Outras atividades

- Experimento – Comprove você mesmo – Dimensões do Sistema Solar 369
- Pesquise, proponha e debata – *2001: uma odisséia no espaço* 371
- Problema aberto – B612 372
- Na estante – Para ler e assistir 374

Questões do ENEM 376

Respostas 383

Bibliografia 398

# Volume 2

## Unidade 1

### Energia 17

#### Capítulo 1

#### A história do princípio de conservação da energia 18

- 1 • Energia: uma breve introdução 18
- 2 • Vis viva e as origens históricas do princípio de conservação de energia 26

#### Outras atividades

- Pesquise, proponha e debata – Moto-perpétuo 36
- Pesquise, proponha e debata – Conservação de energia 37

#### Capítulo 2

#### Trabalho e potência 39

- 1 • Trabalho e transformação de energia 39
- 2 • Potência 48

#### Outras atividades

- Investigue você mesmo – Qual a sua potência? 55
- Pesquise, proponha e debata – Quais são as outras potências? 56

#### Capítulo 3

#### Energia mecânica 57

- 1 • A construção do conceito físico da energia cinética 57
- 2 • Energia potencial 63
- 3 • Sistema mecânico 74
- 4 • Rendimento 83

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – O balde-bocha 91
- Pesquise, proponha e debata – Fotografia estroboscópica I – Energia 92
- Experimento – Investigue você mesmo – Lata adestrada 93
- Foi assim... – Investigue com o pesquisador – O pêndulo de Galileu 94

#### Capítulo 4

#### Energia e suas outras faces 96

- 1 • Ciclo de energia na Terra 96
- 2 • Energia em sistemas biológicos 104
- 3 • Fontes para produção de energia 106

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – A energia dos alimentos I 114
- Pesquise, proponha e debata – A energia dos alimentos II 115
- Pesquise, proponha e debata – Energia nuclear no Brasil 116
- Problema aberto – Homem-Aranha 117

### Capítulo 5

### Quantidade de movimento e impulso 118

- 1 • A massa e a velocidade 118
- Os primeiros passos na quantificação do movimento 118
- 2 • Quantidade de movimento de um sistema 122
- 3 • Conservação da quantidade de movimento 123
- 4 • Impulso 130
- 5 • Modelizando as colisões 133
- 6 • Quantidade de movimento angular 142

#### Outras atividades

- Experimento – Comprove você mesmo – Produzindo movimentos 154
- Experimento – Investigue você mesmo – Bate e volta! Ou não volta? 154
- Pesquise, proponha e debata – Fotografia estroboscópica II – Colisão 155
- Pesquise, proponha e debata – A tecnologia do air-bag 156
- Foi assim... – Investigue com o pesquisador – A controvérsia na conservação do movimento:  $mv$  ou  $mv^2$ ? 156
- Na estante para ler e assistir 160

## Unidade 2

### Calor 161

#### Capítulo 6

##### Calor como energia 162

- 1 • A história da natureza do calor 162
- 2 • Um modelo para calor e matéria 166
- 3 • Modelo cinético dos gases 179

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Construindo um termômetro 191
- Foi assim... – Investigue com o pesquisador – O debate sobre a natureza do calor 192

### Capítulo 7

##### Calor e dilatação 195

- 1 • Dilatação 195
- 2 • Dilatação linear • Um olhar para a dilatação nos corpos "finos" 196
- 3 • Dilatação superficial • E as chapas, elas se dilatam como os fios? 201
- 4 • Dilatação volumétrica • E o que dizer dos objetos em que as três dimensões são significativas? 204
- 5 • Dilatação dos líquidos 206

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Construindo sensores térmicos 214
- Experimento – Investigue você mesmo – Dilatação linear e volumétrica 215

### Capítulo 8

##### Trocas de calor 216

- 1 • Calor e temperatura nas substâncias 216
- 2 • Cálculo das quantidades de calor 222
- 3 • Trocas de calor em sistemas térmicos 230
- 4 • Por que as substâncias mudam de estado? 232
- 5 • Transmissão de calor: doando e recebendo calor 247

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Avaliando o calor específico 256
- Experimento – Investigue você mesmo – Condução de calor 257
- Pesquise, proponha e debata – Energia dos alimentos III 258
- Pesquise, proponha e debata – Elementos climáticos I 259

### Capítulo 9

##### Máquinas térmicas 260

- 1 • Máquinas na História 260
- 2 • Transformações em máquinas térmicas 264
- 3 • Calor, energia e trabalho 277
- 4 • Entropia e a dissipação da energia 290

#### Outras atividades

- Pesquise, proponha e debata – As máquinas de movimento perpétuo 302
- Pesquise, proponha e debata – Entrevista com um técnico em refrigeração 304
- Problema aberto – Miniestação meteorológica 304
- Na estante para ler e assistir 305

## Unidade 3

### Imagem e som 307

#### Capítulo 10

##### Luz e imagem 308

- 1 • A visão: uma abordagem histórica • Dos gregos aos tempos modernos 308
- 2 • Câmara escura e a trajetória da luz 313
- 3 • A velocidade da luz 318
- 4 • Reflexão • A luz indo e voltando 322
- 5 • Refração • A luz sendo desviada 328

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Fases da Lua e eclipses 350
- Experimento – Investigue você mesmo – Sombra e penumbra 351
- Experimento – Investigue você mesmo – Caleidoscópio 351
- Problema aberto – O homem invisível 353

### Capítulo 11

##### Espelhos esféricos, lentes e instrumentos ópticos 355

- 1 • Espelhos esféricos e a reflexão da luz 355
- 2 • Lentes esféricas e a refração da luz 367
- 3 • Instrumentos ópticos 378
- 4 • O olho humano 388

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Espelho cilíndrico 402
- Experimento – Investigue você mesmo – Lente cilíndrica 404
- Pesquise, proponha e debata – Ilusão de óptica na arte 405

### Capítulo 12

##### Som 406

- 1 • Vibrações e sons 406
- 2 • O que torna uma vibração audível? 411
- 3 • A orelha: esse labirinto complexo 416
- 4 • Música ou ruído? 424
- 5 • Outros fenômenos sonoros 428

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Amplificando o som do tique-taque 437
- Experimento – Investigue você mesmo – A audibilidade de um som 438

### Capítulo 13

##### Sons e instrumentos 439

- 1 • A produção de sons nos instrumentos 439
- 2 • Características dos sons musicais 445
- 3 • As ondas nos instrumentos 447

#### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – DJs com gramofones 460
- Foi assim... – Investigue com o pesquisador – Entre sons e sensações 461
- Na estante para ler e assistir 465

Questões do ENEM 467

Respostas das atividades do livro 480

Bibliografia 495

# Volume 3

## Unidade 1

### Eletricidade e Magnetismo

#### Capítulo 1

##### Propriedades elétricas da matéria 18

- 1 • Eletricidade e cotidiano 18
- 2 • Onde estão as cargas elétricas? 19
- 3 • A interação entre as cargas e os processos de eletrização 23
- 4 • Bons e maus condutores 32
- 5 • Uma lei para as cargas 36

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – A festa da Física 43
- Experimento – Investigue você mesmo – Garrafa de Leyden 44
- Pesquise, proponha e debata – As máquinas eletrostáticas 45

#### Capítulo 2

##### Circuitos elétricos 46

- 1 • Corrente elétrica 46
- 2 • Geradores elétricos 51
- 3 • Circuitos elétricos – uma visão geral 55
- 4 • Resolvendo circuitos elétricos 65

##### Outras atividades

- Experimento – Comprove você mesmo – Pilhas e baterias caseiras 80

#### Capítulo 3

##### Instalações e equipamentos elétricos 81

- 1 • Características e classificações dos aparelhos elétricos 81
- 2 • Consumo de energia elétrica 87
- 3 • Rede elétrica residencial 90
- 4 • Segurança e efeitos fisiológicos dos choques elétricos 95

##### Outras atividades

- Pesquise, proponha e debata – Conta de consumo de energia elétrica 101
- Problema aberto – Instalação elétrica residencial 102

#### Capítulo 4

##### Propriedades magnéticas da matéria 103

- 1 • Ímãs e bússolas 103
- 2 • Uma visão microscópica do magnetismo 112
- 3 • Classificação de substâncias magnéticas e indução magnética 117
- 4 • Ímãs permanentes e temporários 119

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – O magnetismo e a Terra 126

#### Capítulo 5

##### Campo elétrico e magnético 127

- 1 • A matéria e a ação à distância 127
- 2 • A interação mediada: linhas de força de Faraday 128
- 3 • O conceito de campo 133
- 4 • Características dos campos de interação 136
- 5 • Aplicações do conceito de campo elétrico e magnético na descrição física de outras situações 148

##### Outras atividades

- Foi assim... Investigue com o pesquisador – Ação mediada e as linhas de campo 161
- Problema aberto – Mapeamento de campos elétricos 163

#### Capítulo 6

##### Leis de Ampère e Faraday 165

- 1 • A unificação entre Eletricidade e Magnetismo – primeiros passos 165
- 2 • Campo magnético gerado por correntes elétricas 167
- 3 • A lei de Ampère 178
- 4 • Indução eletromagnética e a lei de Faraday 183

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – O experimento de Oersted 200
- Experimento – Investigue você mesmo – Eletroímã 201
- Foi assim... Investigue com o pesquisador – Unificação da Eletricidade e do Magnetismo 204

#### Capítulo 7

##### Força magnética, motores e geradores 207

- 1 • Força magnética 207
- 2 • Motores elétricos 221
- 3 • Geradores 225
- 4 • Transformadores 231

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Motor elétrico 240
- Pesquise, proponha e debata – Eletricidade no Brasil e a rede de transmissão local 240
- Na estante para ler e assistir 241

## Unidade 2

### Ondas eletromagnéticas

#### Capítulo 8

##### A luz como onda eletromagnética e as telecomunicações 244

- 1 • A natureza ondulatória da luz 244
- 2 • Interação da luz com a matéria 251
- 3 • Interferência entre ondas 260
- 4 • Polarização: outro misterioso comportamento da luz 267
- 5 • Nas ondas da comunicação 270

##### Outras atividades

- Experimento – Comprove você mesmo – Produzindo ondas eletromagnéticas 280
- Experimento – Investigue você mesmo – Telefone mudo 280
- Problema Aberto – Fazendo contato 281

#### Capítulo 9

##### Luz e fenômenos atmosféricos 284

- 1 • Um viaduto chamado arco-íris 284
- 2 • Aurora e crepúsculo: espetáculos jamais reprisados 288
- 3 • O paradoxo da água transparente que forma nuvens brancas e mar azul-esverdeado 292

##### Outras atividades

- Experimento – Comprove você mesmo – Arco-íris caseiro 295
- Experimento – Investigue você mesmo – Espalhando a luz na água 295

#### Capítulo 10

##### Fontes de luz e suas cores 296

- 1 • Misturas de cores: A controvérsia entre cientistas e artistas 296
- 2 • Fontes de radiação visível 302

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – O pião que mistura cores (disco de Newton) 310
- Pesquise, proponha e debata – Construindo um diagrama HR 311

#### Capítulo 11

##### Espectroscopia 314

- 1 • Espectros luminosos 314
- 2 • Escritos nas estrelas 324

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Espectroscópio 331
- Foi assim... Investigue com o pesquisador – Cartas de Bunsen e a descoberta dos espectros dos elementos químicos 333
- Experimento – Investigue você mesmo – Astrônomo mirim 334
- Na estante para ler e assistir 336

## Unidade 3

### Radiação e matéria

#### Capítulo 12

##### A natureza da luz 338

- 1 • A velocidade da luz 338
- 2 • Controvérsias a respeito da natureza da luz 340
- 3 • Éter 349
- 4 • A teoria da Relatividade Restrita 355
- 5 • A teoria da Relatividade Geral 371
- 6 • O efeito fotoelétrico 376
- 7 • O que é a luz afinal? 384

##### Outras atividades

- Foi assim... Investigue com o pesquisador – Quanta 393
- Problema aberto – A Relatividade da Arte 395

#### Capítulo 13

##### Estrutura da matéria 396

- 1 • Pensando sobre o muito pequeno 396
- 2 • Níveis de energia no átomo 408
- 3 • Núcleo atômico 421
- 4 • Decaimento radioativo 426

##### Outras atividades

- Experimento – Investigue você mesmo – Laser 450
- Pesquise, proponha e debata – Anjos e demônios da Física Nuclear 450

#### Capítulo 14

##### Partículas elementares 453

- 1 • O mundo das partículas 453
- 2 • Aceleradores 461
- 3 • Dispositivos de detecção de partículas 465
- 4 • Leis de conservação 472
- 5 • Identificando partículas em fotografias 473
- 6 • Três partículas especiais: pósitron, píon e os raios cósmicos 477
- 7 • Famílias de partículas e os quarks 484
- 8 • Partículas mediadoras e o modelo padrão 490

##### Outras atividades

- Pesquise, proponha e debata – Um “cíclotron” pelos aceleradores 496
- Experimento – Investigue você mesmo – Descobrindo novas partículas 498
- Na estante para ler e assistir 499

Questões do ENEM 500

Respostas das atividades do livro 511

Bibliografia 524

# A Física

Pré-História –  
3500 a.C.

## no tempo e na história

**N**a **linha do tempo**, você conhecerá personagens, descobertas, invenções, aparatos científicos e tecnológicos relacionados ao desenvolvimento da história da Física e que serão encontrados ao longo dos capítulos deste volume. Para que você possa identificá-los mais facilmente, a seção é dividida em três partes: contexto histórico de cada período, representado na parte superior; descobertas, invenções, aparatos científicos e tecnológicos, direta ou indiretamente vinculados à Física, apresentados na parte central; e os principais filósofos naturais, pesquisadores, inventores e cientistas na parte inferior. No alto das páginas, destacamos a divisão cronológica proporcional de cada período.

Esse breve passeio pelo tempo começa na Pré-História (... até 3500 a.C.), segue para a Idade Antiga (3500 a.C.-476 d.C.), passa pela Idade Média (476-1453), percorre a Idade Moderna (1453-1789) e chega à Idade Contemporânea (1789 a nossos dias). Apresentamos assim uma visão geral do contexto histórico de cada período, para convidá-lo a refletir sobre quão estreitas são as relações entre ciência, tecnologia, economia, cultura e política de determinada época. Você poderá perceber, por exemplo, que o desenvolvimento da Termodinâmica, nos séculos XVIII e XIX, é fruto de inovações como a máquina a vapor, com a Revolução Industrial constituindo um estímulo à atividade científica e vice-versa.

Desejamos que sua viagem pela **Física no tempo e na história** continue em muitos outros momentos e contextos além das páginas desta coleção.

### Período Paleolítico

(2500 000 a.C.-10000 anos a.C.)

### Período Neolítico

(10000 a.C.-3500 a.C.)



- A invenção da roda facilitou os grandes deslocamentos.

## Pré-História – 3500 a.C.

- Aparecimento do gênero Homo (*Homo Habilis*)



- A fabricação de utensílios de pedra facilitou a execução de várias tarefas e contribuiu para o desenvolvimento do cérebro dos hominídeos.



- O domínio do fogo permitiu o conforto da luz artifical para a vida noturna e o calor nos períodos de inverno.
- O domínio do fogo possibilitou o desenvolvimento inicial da metalurgia.

- O desenvolvimento da agricultura e a domesticação de animais estimularam a sedentarização de grupos humanos.



- Os curandeiros podem ser considerados os primeiros de uma linhagem de investigadores experimentais e ancestrais remotos do cientista moderno.

Pré-História –  
3500 a.C.

# Idade Antiga – 3500 a.C.-476 d.C.



## Egito antigo



- Os egípcios foram o primeiro povo da Antiguidade a fabricar o vidro.
- Os astrônomos do Egito antigo alinhavam as pirâmides em direção ao Polo Norte usando as estrelas como referência.
- Os filósofos atomistas acreditavam no princípio da conservação da matéria.



- Fogo, Terra, Ar e Água eram considerados os quatro elementos fundamentais do Universo.



- Mônocórdio de Pitágoras (caixa de ressonância para estudo das vibrações sonoras).



Pitágoras  
(570 a.C.-496 a.C.)



Empédocles  
(493 a.C.-430 a.C.)



Demócrito  
(460 a.C.-370 a.C.)



Platão  
(427 a.C.-347 a.C.)



Lucretius  
(98 a.C.-55 a.C.)



Cláudio Ptolomeu  
(83-121)

## Grécia antiga



- Balestilha: instrumento usado para medir a altura de astros em relação ao horizonte.

Idade Antiga  
(3500 a.C.-476 d.C.)

Idade Média  
(476-1453)

Idade Moderna  
(1453-1789)

Idade Contemporânea  
(1789 até nossos dias)

## Roma antiga



- Eolíptica, a máquina térmica de Heron.



- Gnómon, relógio de sol introduzido na Grécia antiga por Anaximandro.

- Astrolábio: instrumento para medida da altura das estrelas.



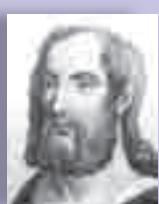
Aristóteles  
(384 a.C.-322 a.C.)



Arquimedes de Siracusa  
(287 a.C.-212 a.C.)



Hiparco de Niceia  
(190 a.C.-125 a.C.)



Plínio de Elder  
(23-79)

## China antiga



- O primeiro relato do aparecimento do cometa Halley data de 240 a.C., na China.



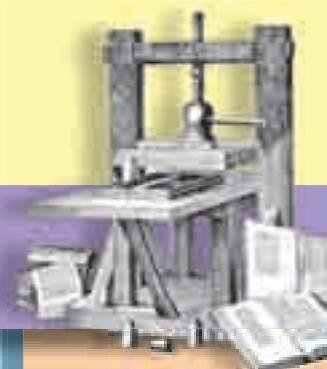
- Ampulheta, o relógio de areia.



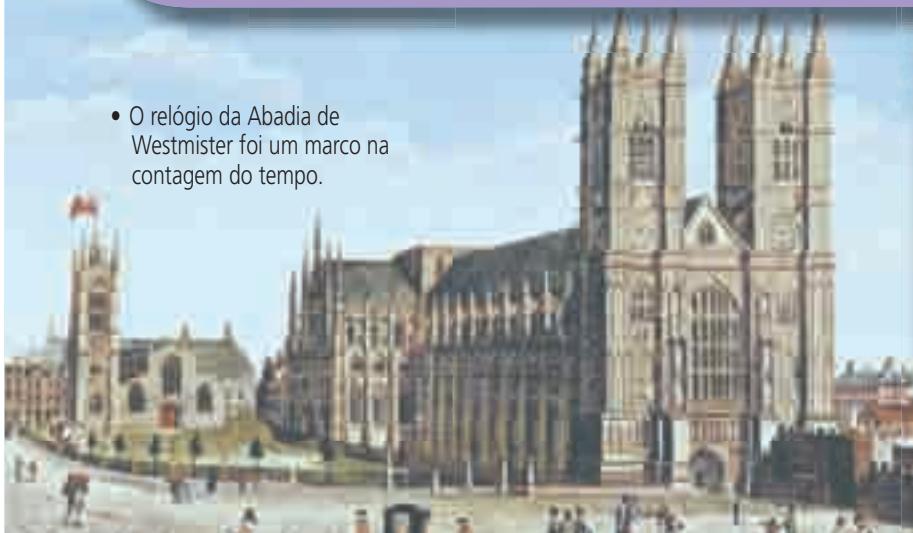
- Clepsidra, o relógio de água.
- O desenvolvimento da biga e da quadriga diminuiu as distâncias e agilizou a comunicação, facilitando, assim, a administração do vasto Império Romano.

- Atribui-se a invenção da bússola aos chineses.

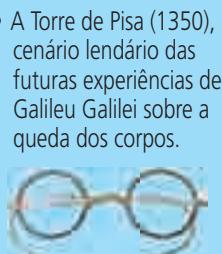
# Idade Média – 476-1453



- O relógio da Abadia de Westminster foi um marco na contagem do tempo.



• Abu Ali al Hasan (Alhazen), matemático e astrônomo árabe publicou *O tesouro da óptica*, que influenciou a óptica medieval e moderna.



• Os óculos foram desenvolvidos pelo físico e filósofo Roger Bacon.

• Os moinhos de vento foram utilizados pelos agricultores desde o século X.



• A primeira universidade europeia foi fundada em Bolonha, Itália.



• O músico Guido d'Arezzo contribuiu para o estabelecimento da pauta musical (1050).



Abu'Ali Al-Hasan Alhazen (965-1040)



Nicolau Oresme (1325-1382)



São Tomás de Aquino (1225-1274)



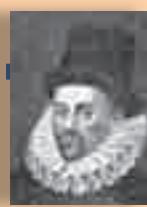
Leonardo da Vinci (1452-1519)



• Galileu Galilei aprimora a luneta e aponta o equipamento para o céu (1492).



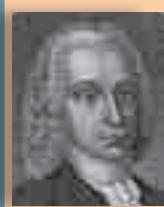
Nicolau Copérnico (1473-1543)



William Gilbert (1544-1603)



Tycho Brahe (1546-1601)



Anders Celsius (1701-1744)



Charles A. Coulomb (1736-1806)



James Watt (1736-1819)



• Robert Hooke aprimora o microscópio composto e observa as células da cortiça (1665).

• 1492. Desenho do primeiro globo terrestre.

Idade Antiga  
(3500 a.C.-476 d.C.)

Idade Média  
(476-1453)

Idade Moderna  
(1453-1789)

Idade Contemporânea  
(1789 até nossos dias)

## Idade Moderna – 1453-1789



- Isaac Newton constrói o primeiro telescópio refletor (1670).



- Johannes Kepler desenvolve o conceito de universo geométrico.

- William Gilbert inventa a bússola de inclinação (1690).

- O padre Bartolomeu de Gusmão inventa o balão de ar quente (1709).

- Willem Jacob's Gravesande demonstra a dilatação volumétrica.

- Méde de Sivrac inventa a primeira bicicleta (1790).

- Nicholas Cugnot utiliza pela primeira vez um motor a vapor para movimentar um veículo (1790).

- Alessandro Volta desenvolve a primeira pilha (1800).



Galileu Galilei  
(1564-1642)



Johannes Kepler  
(1571-1630)



Willebrord Snell  
(1591-1626)



René Descartes  
(1596-1650)



Edme Mariotte  
(1620-1684)



Robert Boyle  
(1627-1691)



Isaac Newton  
(1643-1727)



Alessandro A. Volta  
(1745-1827)



Benjamin Thompson  
(1753-1814)



Thomas Young  
(1773-1829)



André M. Ampère  
(1775-1836)



Hans C. Oersted  
(1777-1851)



Carl F. Gauss  
(1777-1855)



Christian Huygens  
(1629-1695)

# Idade Contemporânea – 1789 até nossos dias



- Protótipo do quilograma e metro padrão.



- Invenção da locomotiva (1804) e do barco a vapor (1807).

- Em 1835, Samuel Morse inventa o telégrafo, tornando possível a comunicação à distância.



- Invenção do telefone em 1876.

- Fonautógrafo de Leon Scott.

- Praxinoscópio de projeção.

- Em 1853 é criado o primeiro elevador para transporte de passageiros.

- Tomas Edison fabrica a primeira lâmpada elétrica (1879).

- A primeira usina termelétrica é instalada no Brasil (1883).

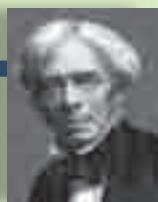
- Karl Benz e Gottlieb Daimler inventam o primeiro automóvel com motor de combustão interna (1885).

- Albert Michelson e Edward Morley realizam experimento para detectar o éter (1887).

- Wilhelm Röntgen produz a primeira radiografia (1896).



Georg Simon Ohm  
(1789-1854)



Michael Faraday  
(1791-1867)



Nicolas L. Sadi Carnot  
(1796-1832)



Robert W. E. Bunsen  
(1811-1899)



James Prescott Joule  
(1818-1889)



Henri Becquerel  
(1820-1908)



Hermann Helmholtz  
(1821-1894)



Hendrik Lorentz  
(1853-1928)



J. J. Thomson  
(1856-1940)



Heinrich R. Hertz  
(1857-1894)



Max Planck  
(1858-1947)



Wilhelm Wien  
(1864-1928)



Pierre (1859-1906)  
e Marie Curie  
(1867-1934)



Ernest Rutherford  
(1871-1937)

Idade Antiga  
(3500 a.C.-476 d.C.)

Idade Média  
(476-1453)

Idade Moderna  
(1453-1789)

Idade Contemporânea  
(1789 até nossos dias)



- Alberto Santos Dumont realiza o primeiro voo com uma aeronave movida a motor com gasolina (1906).
- Experimento de Rutherford em 1911.

- Robert Alexander Watson-Watt desenvolve o primeiro radar (1935).
- Chester Carlson produz a primeira xerocópia (1938).
- Primeiro teste com bomba atómica em Los Alamos, EUA (1945).

- Theodore Maiman desenvolve o primeiro laser sólido (1960).



- Advento da televisão colorida em 1950.
- O físico indiano Narinder Singh Kapany desenvolve a fibra óptica (1952).

- Lançamento telescópio espacial Hubble em 1990.

- Em 2001, surge a internet sem fio.



Gustav Kirchhoff  
(1824-1887)



Lord Kelvin  
(1824-1907)



James C. Maxwell  
(1831-1879)



William Crookes  
(1832-1919)



Josef Stefan  
(1835-1893)



Ludwig Boltzmann  
(1844-1906)



Wilhelm Röntgen  
(1845-1923)



Ejnar Hertzprung  
(1873-1967)



Henry N. Russell  
(1877-1957)



Albert Einstein  
(1879-1955)



Niels Bohr  
(1885-1962)



Edwin Hubble  
(1889-1953)



Louis de Broglie  
(1892-1987)



César Lattes  
(1924-2005)

## Justificativa da escolha da unidade

A unidade *Astronomia*, presente no primeiro volume da coleção, é composta por dois capítulos. O primeiro deles, capítulo 10, apresenta o nascimento da Cosmologia moderna, com a proposição de Copérnico do sistema heliocêntrico e sua consolidação com os trabalhos de Kepler, Galileu e Newton. A abordagem privilegia a contextualização dos problemas físicos numa perspectiva histórica com ênfase humanística. Convida os alunos a participar dos embates entre a Cosmologia medieval e a Cosmologia moderna e a reconhecer a gênese e a evolução das ideias sobre o Universo. O capítulo 11 tem por objetivo finalizar o estudo da Mecânica newtoniana, enfatizando principalmente a Gravitação Universal. A evolução estelar encerra os conteúdos da unidade, dando uma perspectiva sobre o ciclo de vida do Sol nos próximos bilhões de anos.

Gostaríamos de chamar a atenção para a seção *Outras atividades*, que finaliza cada um dos capítulos da coleção. Nela, procuramos diversificar as abordagens de ensino-aprendizagem e propor estratégias que vão além dos tradicionais problemas “fechados”. Nesta unidade, essas novas abordagens podem ser encontradas, por exemplo, nas atividades: *Foi assim... Investigue com o pesquisador – De Revolutionibus Orbium Coelestium*, versando sobre As revoluções das órbitas celestes de Copérnico, e *Problema aberto – B612*, que, nesse caso, trata o texto do livro *O pequeno príncipe* como situação-problema.

# Unidade 4

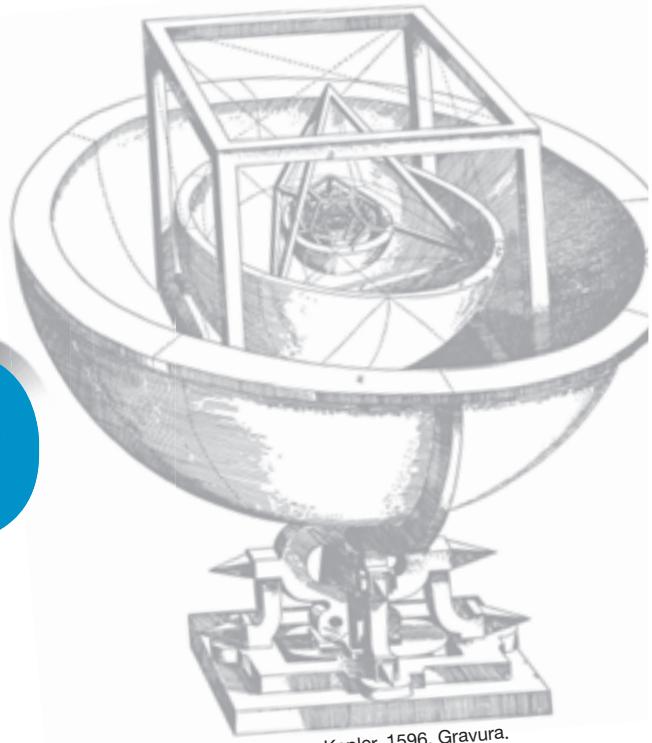
**N**a unidade anterior, você conheceu as forças presentes ao nosso redor e as três leis fundamentais da dinâmica newtoniana. Com elas foi possível interpretar situações envolvendo corpos sobre a superfície da Terra.

Mas e os movimentos dos corpos no céu? Será que a “física celeste” é igual à “física terrestre”?

Por muito tempo, acreditou-se que o Universo era dividido em duas partes. A porção terrestre era um lugar em constante transformação e a porção celeste um local de perfeição e imutabilidade. Assim, as explicações para os fenômenos de cada uma dessas partes também deveriam ser diferentes.

Ao longo desta unidade, você vai estudar com mais profundidade a teoria aristotélica do Universo bipartido, que, aliada aos sistemas de mundo geocêntricos, permaneceu válida por muitos séculos, até o desenvolvimento da teoria heliocêntrica de Copérnico e sua posterior consolidação com a Física universal de Newton e seus seguidores. No final da unidade, abrangeremos a famosa teoria da relatividade de Einstein. Vamos lá?

Mercúrio



Johannes Kepler. 1596. Gravura.  
New York Public Library

## Astronomia

The Hubble Helix Nebula  
Team/ESA/NOAO/NASA



# CAPÍTULO 10

Professor, as sugestões ou orientações para o encaminhamento de atividades e outras discussões foram numeradas sequencialmente no *Caderno de orientações*, que se encontra no final deste volume.

**Neste capítulo,  
você vai conhecer  
a evolução  
das teorias  
desenvolvidas  
para explicar  
a dinâmica  
celeste desde  
a Antiguidade  
grega até o  
início do século  
XVI, quando  
Nicolau Copérnico  
propôs o sistema  
heliocêntrico e  
apareceram os  
trabalhos de  
Galileu Galilei e  
Johannes Kepler.**

4



Andoni Canela/AGF Fotostock/Keystock

## HISTÓRIA DA COSMOLOGIA

### 1. O universo geocêntrico dos gregos: o culto aos círculos

Além da explicação da dinâmica terrestre, que você estudou nos capítulos anteriores, outro grande problema vivenciado pelo homem, ao longo de sua história, foi obter uma explicação adequada para o movimento dos corpos celestes.

As explicações dadas pelos gregos inauguraram uma nova forma de pensar o Universo. Ao olharem o céu, eles viram mais do que um palco para suas divindades e, desta forma, começaram a pensar em como seria o funcionamento do Cosmos.

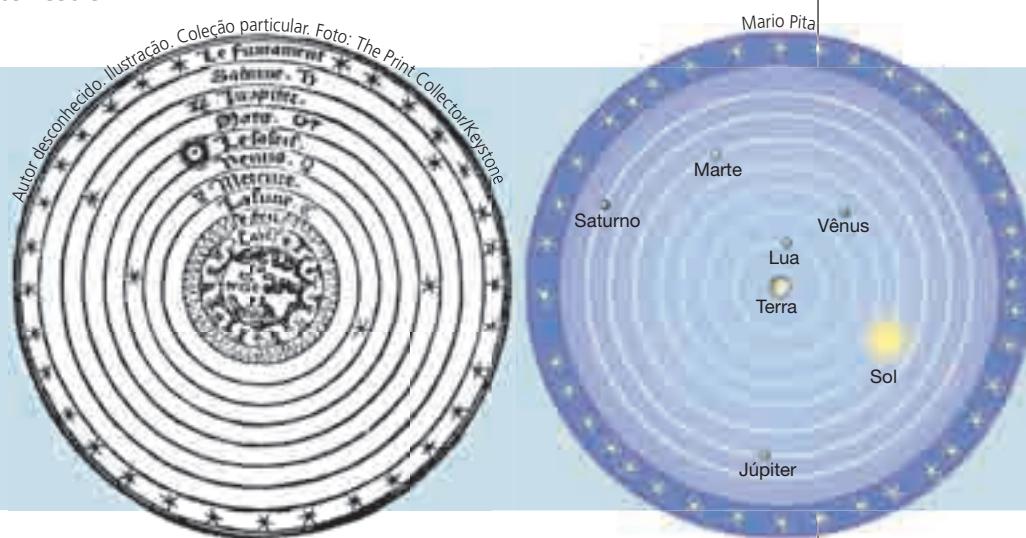
Talvez você esteja se perguntando qual o interesse em estudar modelos explicativos de Universo atualmente considerados ultrapassados. Isso pode ser interessante se por esse estudo pudermos entender a trajetória histórica em direção à Ciência de nossos dias.

Se numa noite você se dispuser a observar o céu, vai perceber que tanto as estrelas como a Lua descrevem arcos nele. Foram observações como essa que levaram os gregos a refletirem de forma diferente sobre o céu.

Juntando a explicação dos movimentos dos astros, a partir da observação, com a crença na perfeição dos círculos e das esferas, Platão, mais tarde Aristóteles (um de seus alunos mais brilhantes), e outros gregos desenvolveram no século IV a.C.

um sistema astronômico em que a Terra estava parada e todos os corpos vistos no céu executavam movimentos circulares ao seu redor. Esse movimento circular era garantido pela existência de esferas cristalinas que giravam com período constante em torno do eixo terrestre.

Para os gregos, o Universo era formado por várias cascas esféricas. A casca mais externa continha as estrelas, as cascas mais internas continham os planetas conhecidos à época, a Lua e o Sol. Esse universo grego era finito, não existindo nada além da esfera das estrelas.

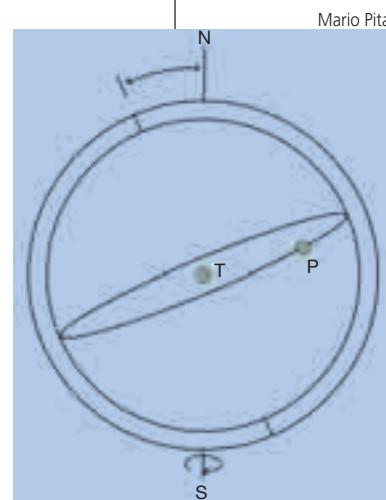


Para os gregos, o círculo era a forma mais perfeita do Universo; portanto, tudo o que estava no céu deveria ser perfeito e redondo. Com inúmeras esferas, o sistema geocêntrico proposto na Antiguidade grega fornecia respostas a questões que intrigavam os homens desde muito tempo, mas sem a inclusão de divindades.

A duração do dia podia ser explicada pelo movimento de translação do Sol ao redor da Terra. Nesse modelo cosmológico, a variação do caminho percorrido pelo Sol entre inverno e verão era explicada por um sistema de cascas esféricas acopladas com seus eixos desalinhados. Tratava-se de duas esferas concêntricas, como numa cebola, mas que não giravam da mesma forma uma em relação à outra. Isso podia explicar tanto a variação da altura do Sol ao longo do ano como a variação da duração entre dia e noite.

As fases da Lua podiam ser explicadas pela combinação conjunta do movimento do Sol e do movimento da Lua em torno da Terra.

A esfera externa representa a esfera das estrelas, e seus eixos coincidem com o Polo Norte (N) e o Polo Sul (S) da Terra (T), que se encontra no centro. A esfera interna está inclinada em relação aos polos terrestres e carrega o Sol ou a Lua (P) no equador.



*Professor, as respostas e outras orientações sobre a(s) questão(ões) do Explorando o assunto encontram-se no Caderno de orientações.*

**Na fotografia do céu apresentada anteriormente, você observou o movimento circular dos astros. Sem utilizar conhecimentos do sistema heliocêntrico, como pode ser explicado esse fenômeno?**

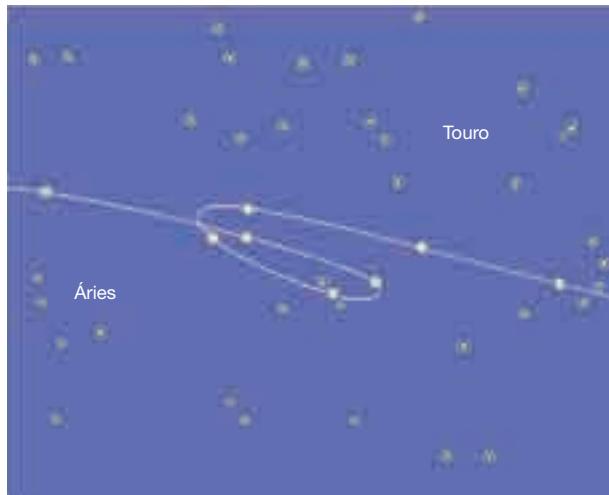
De fato, as estrelas mantêm suas posições relativasumas às outras. Essa observação corroborava com a concepção das esferas cristalinas, pois elas pareciam presas a uma espécie de anteparo se movendo em relação à Terra. Já os planetas, ao serem observados no céu ao longo de semanas ou meses, pareciam descrever movimentos em forma de "laços" em relação às estrelas. Esses movimentos eram mais complicados para explicar, tanto que o nome *planeta* vem de uma palavra gre-



ga que significa astro errante. Sem a utilização de instrumentos, os gregos podiam observar cinco astros errantes: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, além do Sol e da Lua.

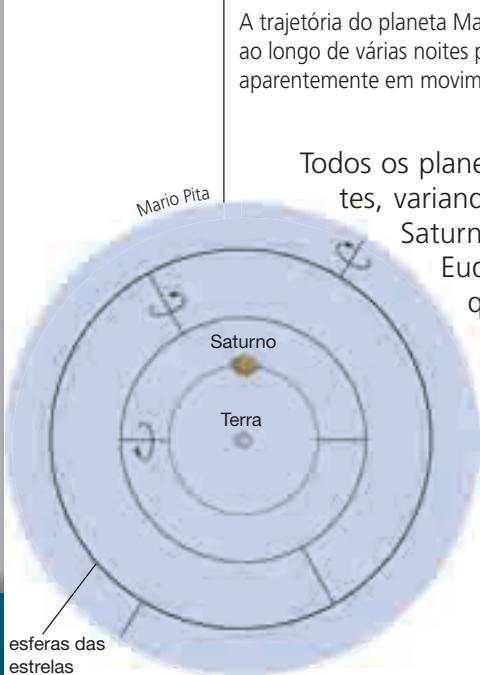


Tunc Tezel (TWAN)/NASA



Mario Pita

A trajetória do planeta Marte forma um laço no céu. A posição do planeta em relação às estrelas se adianta ao longo de várias noites para em seguida voltar e novamente avançar em relação a elas, que se mantêm aparentemente em movimento circular uniforme em torno da Terra.



Todos os planetas conhecidos à época apresentavam movimentos semelhantes, variando o período de cada um deles. Para explicar o movimento de Saturno, planeta com maior período de translação então conhecido, Eudoxo (c. 408 a.C.-355 a.C.), um aluno de Platão, estabeleceu que seria necessário combinar 26 esferas girantes em movimento uniforme. Aristóteles acrescentou mais três movimentos à proposta de Eudoxo chegando ao montante de 29 esferas associadas para melhor explicar o que se observava no céu.

Para explicar o movimento dos planetas observado no céu, foi necessária uma composição de esferas girantes. Nesta ilustração, aparecem somente três esferas da associação de 29 propostas por Eudoxo e Aristóteles para o movimento de Saturno.

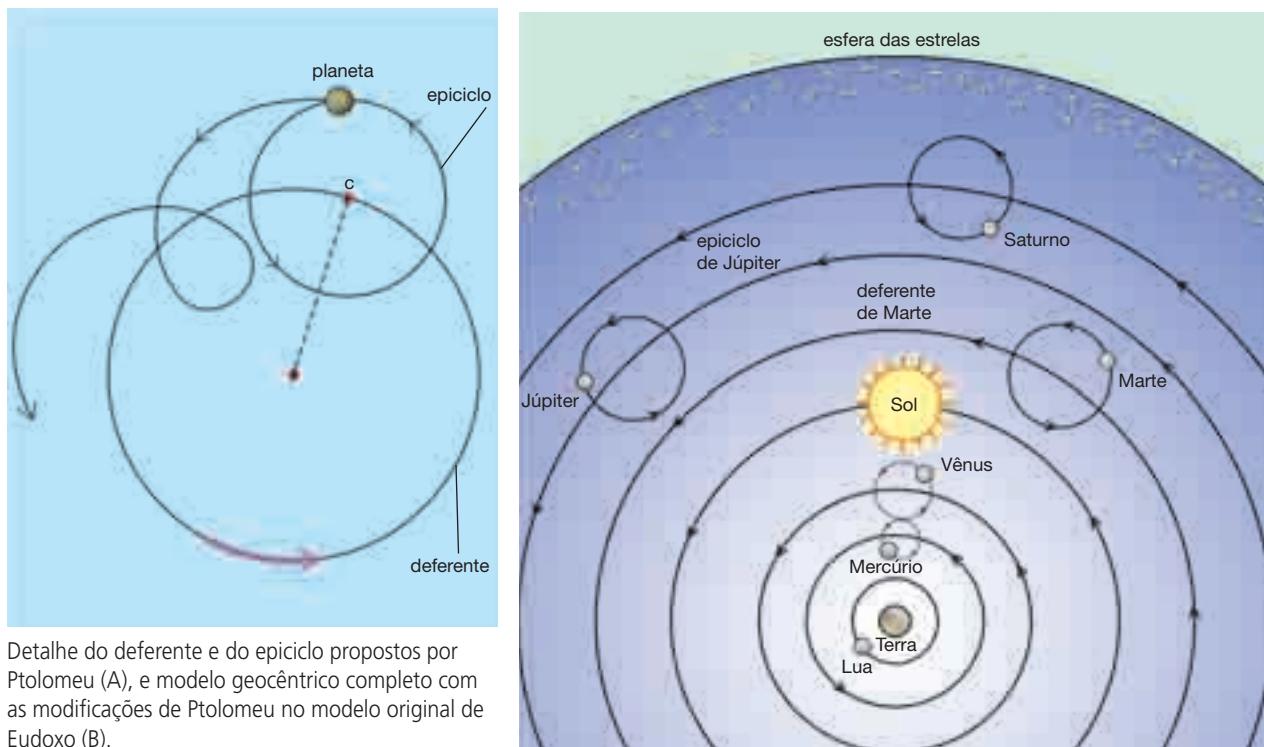
4

Porém, a mais eficiente explicação para o movimento retrógrado dos planetas no sistema geocêntrico foi desenvolvida pelo grego Ptolomeu, astrônomo, matemático e cartógrafo que viveu entre 83 e 121 d.C.

De acordo com um de seus modelos explicativos, um planeta se move ao longo de um círculo chamado **epíciclo**, cujo centro se move em um círculo maior, chamado **deferente**. Ptolomeu publicou suas teorias em uma obra de 13 volumes intitulada *Almagesto*, que, segundo algumas traduções, em árabe significa a grande síntese ou o maior compêndio.



Autor anônimo. Séc. XVI. Gravura. Coleção particular



Detalhe do deferente e do epicílio propostos por Ptolomeu (A), e modelo geocêntrico completo com as modificações de Ptolomeu no modelo original de Eudoxo (B).

Ilustrações: Mario Pita

Nesse trabalho, para obter uma maior precisão da trajetória prevista do planeta com a de fato observada, Ptolomeu propôs outras modificações que deixaram a versão final do modelo mais complexa. Por exemplo, ele associou mais de um epicílio a um mesmo deferente e deslocou a Terra ligeiramente do centro do deferente dos planetas. Esse modelo é conhecido como excêntrico.

**Professor, é importante promover uma discussão entre os alunos antes de apresentar a resposta ou a solução do exercício. Pode-se pedir que alguns alunos respondam à pergunta oralmente e que outros alunos a avaliem.**

Os gregos desenvolveram uma grande paixão pela geometria e acreditavam que o círculo era a forma mais perfeita do Universo. Qual é a relação dessa crença com os modelos explicativos dessa civilização?

No céu, a Lua e o Sol são astros esféricos, mesmo as estrelas e os planetas podem ser vistos como pequenas esferas, e o movimento aparente desses astros no céu é circular. Assim, o céu é o lugar da perfeição e, portanto, das esferas.



## Exercício resolvido

## Exercícios propostos



**Ver Orientação 28.**

## 2. A “física” aristotélica

Os estudiosos da Grécia antiga não se limitavam a fornecer explicação sobre o que se via no céu. Na estrutura idealizada por Aristóteles, os movimentos de objetos terrestres também eram explicados. Porém, o que valia para o céu não valia para os objetos na Terra.

## 2.1 As leis físicas no céu e na Terra

O céu era o local da perfeição; por isso, era representado por meio de formas consideradas perfeitas, como o círculo e a esfera. Já a Terra era o lugar da corrupção, onde nada poderia ser perfeito e eterno.

A fronteira entre as duas porções do Universo era feita pela esfera lunar. Assim, havia dois mundos com características distintas: o sublunar (Terra) e o supralunar (céu). No céu, os corpos eram formados de éter, elemento sutil, mais perfeito que o mais perfeito dos cristais. Na região terrestre, os corpos eram formados de quatro elementos básicos: fogo, ar, água e terra. Tudo na Terra era composto a partir da combinação desses quatro elementos, em proporções diferentes.



As leis que valiam para o mundo supralunar determinavam uma ordem perfeita: os corpos deviam se mover constantemente em trajetórias perfeitamente circulares. Mas isso não valia para o mundo terrestre, por isso os cometas e os meteoros faziam parte da esfera sublunar e eram considerados fenômenos da atmosfera. No mundo sublunar também havia uma ordem, mas que estava longe de ser perfeita. Cada elemento ocupava um lugar natural: o elemento terra era próximo ao centro da Terra (centro do Universo); a água ocupava um lugar natural acima da terra; o ar acima da água; e o fogo acima do ar. Essa era a ordem natural dos elementos. Mas essa ordem era constantemente perturbada, pois a Terra era o local da corrupção. Por diversos motivos, os corpos terrestres encontravam-se frequentemente fora de seus lugares naturais e a ordem precisava ser constantemente restabelecida.

Algumas vezes, a água estava acima do ar e a chuva correspondia ao retorno da ordem, pois a água caía buscando seu lugar natural. Quando se lançava uma pedra para o alto, corrompia-se a ordem, e ela acabava por buscar seu lugar natural, caindo de volta para o solo. Assim, os elementos tendiam a buscar espontaneamente seus lugares naturais na ordem desse mundo. Quando assim procediam, estavam em movimento natural.



### Explorando o assunto

*Como você explicaria a constituição da madeira a partir da teoria dos quatro elementos primordiais?*

Havia também movimentos violentos ou forçados. Por exemplo, uma pedra ao ser lançada para cima executava um movimento forçado por um agente externo. O movimento era violento, pois a obrigava a deixar seu lugar natural.

Assim, segundo o modelo explicativo de Aristóteles, teríamos os seguintes movimentos nas regiões:

Os movimentos do céu	Os movimentos da Terra
<b>Movimento natural:</b> circular, uniforme e eterno. Exemplo: movimento das estrelas.	<b>Movimento natural:</b> vertical, para baixo ou para cima visando à busca do lugar natural. Exemplo: queda de uma pedra depois de abandonada no ar.
<b>Movimento violento:</b> não há.	<b>Movimento violento:</b> gerado pela ação de algum “ente” externo. Exemplo: movimento de uma carroça puxada por cavalos.

Para Aristóteles, a queda dos corpos em busca de seu lugar natural também dependia de sua massa, pois, quanto mais “pesado” um corpo, maior seria sua tendência a buscar seu lugar natural. Assim, uma pedra cai mais rapidamente que uma pluma, pois ela é muito mais pesada do que esta.

Por que o universo de Ptolomeu e Aristóteles era finito, ou seja, sua última camada era a das estrelas fixas?

Um dos argumentos é que um universo infinito não teria centro. Assim, a Terra não estaria no centro do Universo, seu lugar natural, e não ocuparia nenhum lugar especial.



## Exercício resolvido

## Exercícios propostos

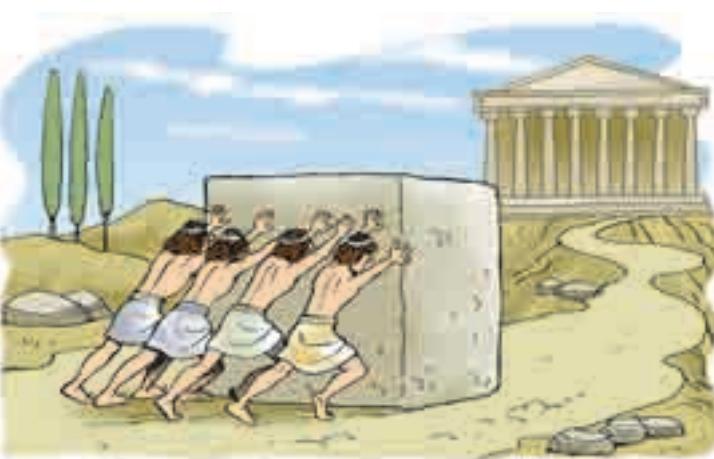


- 1) Quais as diferenças entre o mundo supralunar e o mundo sublunar? Qual a justificativa para essas diferenças? [Resposta no final do livro.](#)
- 2) Como Aristóteles explicaria o aparecimento do movimento das águas de uma cachoeira? E o movimento das chamas de uma fogueira? [Resposta no final do livro.](#)
- 3) Faça um desenho representando a trajetória de uma pedra lançada para dentro de um lago. Represente nela os trechos de movimentos naturais e violentos. [Resposta no final do livro.](#)
- 4) Redija para a questão acima uma explicação de por que ocorreu esse movimento em termos aristotélicos. [Resposta no final do livro.](#)

## 2.2 A relação entre “força” e movimento para Aristóteles

A maneira de Aristóteles considerar a relação entre as ações violentas sobre os corpos e o movimento difere muito daquela apresentada nas leis de Newton, no capítulo anterior. Na “física” aristotélica, o movimento não era pensado como estados (movimento uniforme, movimento acelerado), mas como um processo ou uma transição entre a situação presente e a situação seguinte. Assim, quando uma pedra cai, seu movimento é a transição para seu lugar natural, que é embaixo do ar e da água. Quando ela é levada pela mão para o lado, seu movimento reflete a violência da ação de quem a empurra. Finda a ação, esse movimento cessa.

Qualquer ação exercida sobre um corpo que o obriga a sair de seu lugar natural é dita **ação motora** (M). Por exemplo, uma rocha numa superfície plana não



tenderia a se mover a não ser sob uma ação violenta. Além das ações motoras sobre os corpos, Aristóteles reconhecia a existência de **resistências** ( $R$ ) na natureza. O atrito com o ar, a água e o solo era visto como resistência ao movimento.

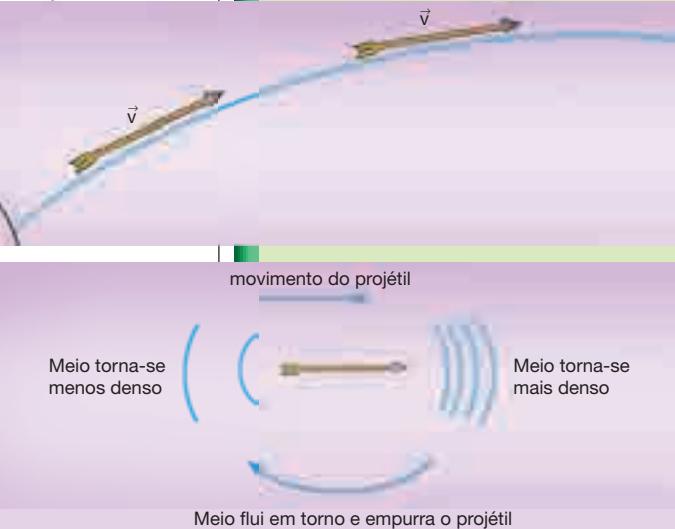
A ação motora é a força aplicada pelos operários, e a resistência é o atrito com o solo.

## Por dentro do conceito



### 4

Ilustrações: Mario Pita



## A Dinâmica segundo Aristóteles

Os termos aristotélicos *ação motora* ( $M$ ) e *resistência* ( $R$ ) podem ser traduzidos pelo conceito moderno que temos de *força*.

A velocidade  $v$  de um corpo seria o resultado das ações motoras e das resistências sobre ele. Assim:

$$v \propto M \text{ e } v \propto \frac{1}{R} \Rightarrow v \propto \frac{M}{R}$$

Segundo esse raciocínio, se a ação motora for maior que a resistência, haverá movimento, mas, se a ação motora for menor que a resistência, não haverá movimento.

Se  $M > R \Rightarrow v \neq 0$ ; caso contrário, se  $R > M \Rightarrow v = 0$

Embora engenhoso, o sistema aristotélico continha algumas questões sem explicação reconhecidas pelo próprio Aristóteles.

Por exemplo, ao lançar um objeto para o alto, o movimento é forçado pela ação motora produzida pela mão de quem a lança. Mas, depois que o objeto deixa a mão do lançador, que motor continua a movê-lo para o alto?

Suponhamos que o corpo lançado seja uma flecha. Se livre de ações, ela deveria buscar seu lugar natural embaixo do ar. Então por que primeiro ela sobe, durante parte da sua trajetória, para somente depois iniciar a queda?

Para Aristóteles, o movimento do objeto continuava por um processo que ele chamou *antiperistasis*. Nesse processo, quando o corpo se movimenta para a frente, ele ocupa um lugar que antes era preenchido somente por ar. O ar comprimido flui ao redor do corpo ocupando o espaço vazio que o objeto deixou e, assim, o objeto é impelido para a frente.

Como esse processo não é perfeito, pois existe resistência e o objeto tem a tendência a voltar a seu lugar natural, ele cai gradualmente.

Explique com palavras o que podemos entender da relação matemática  $v \propto \frac{M}{R}$ . A velocidade de um objeto em movimento é diretamente proporcional à ação motora impressa no corpo, ou seja, quanto maior a ação motora, maior será a velocidade. Por outro lado, a velocidade também é inversamente proporcional à resistência. Assim, quanto maior for a resistência da natureza ao movimento, menor será sua velocidade.

- 1)** Para Aristóteles, os movimentos violentos só poderiam acontecer por meio de uma ação. Argumente a favor dessa teoria a partir de uma situação cotidiana.

Resposta no final do livro.

- 2)** Dê um exemplo cotidiano que justifique a concepção aristotélica que  $v \propto \frac{M}{R}$ .

Resposta no final do livro.

## Exercício resolvido

## Exercícios propostos



### 3. A Física e a Cosmologia na Idade Média

#### 3.1 A simbiose entre a ciência grega e a fé católica

Inicialmente pode parecer absurdo que uma teoria tão estranha tenha tido sucesso na explicação do mundo. Porém, é necessário compreender que essas ideias foram formuladas e avaliadas há mais de dois mil anos, numa época em que certamente os valores, as necessidades, as crenças e os critérios das pessoas eram muito diferentes dos nossos.

A concepção de Universo de Aristóteles e Ptolomeu atravessou barreiras geográficas e históricas. Ela se espalhou por Europa, Oriente Médio, Ásia Menor, norte da África, entre outros, e foi constantemente aperfeiçoada nos séculos que se seguiram a sua proposição. Apenas na Idade Média é que encontramos críticas mais profundas ao sistema aristotélico.

No início desse período, as teorias clássicas (greco-romanas) foram em geral rechaçadas pela Igreja Católica, que reivindicava uma explicação religiosa para o mundo. Uma passagem de Santo Agostinho, o mais influente dos primeiros Padres da Igreja, ilustra a visão sobre as ciências físicas nessa época:

*Quando, portanto, nos perguntam em que acreditamos em matéria de religião, não é necessário provar a natureza das coisas, como foi feito por aqueles a quem os gregos chamam físicos; nem precisamos ficar alarmados por cristãos ignorarem a força e o número dos elementos – o movimento, a ordem, os eclipses dos corpos celestes; a forma do céu; as espécies e a natureza dos animais, plantas, pedras, fontes, rios, montanhas; a cronologia e as distâncias; os sinais de tempestades vindouras; e milhares de outras coisas que esses filósofos ou descobriram ou pensaram que tinham descoberto... É suficiente que os cristãos acreditem que a única causa de todas as coisas criadas, sejam celestes ou terrenas, visíveis ou invisíveis, é a bondade do Criador, o único Deus verdadeiro; e que nada existe a não ser Ele próprio.*

T. S. Kuhn. *A revolução copernicana: a astronomia planetária no desenvolvimento do pensamento ocidental*. Lisboa: Edições 70, 1980. p. 130.

Sandro Botticelli, 1480.  
Coleção particular

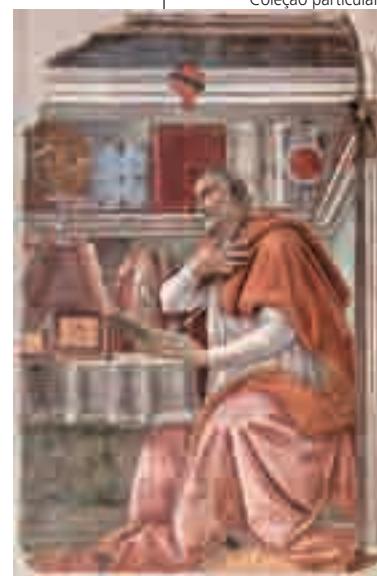


Imagem de Santo Agostinho no vitral da igreja St. Agustine, Flórida, EUA.

Professor, esta temática é bem caracterizada no filme *O nome da rosa*, de Jean-Jacques Annaud (Alemanha/França/Itália, 1986). É interessante exibi-lo em aula (nesse caso, para otimizar o tempo, você pode selecionar alguns trechos para exibição) ou recomendar como atividade para casa. É importante promover uma discussão após o filme.



Fra Angelico. Séc. XV. Afresco. Coleção particular

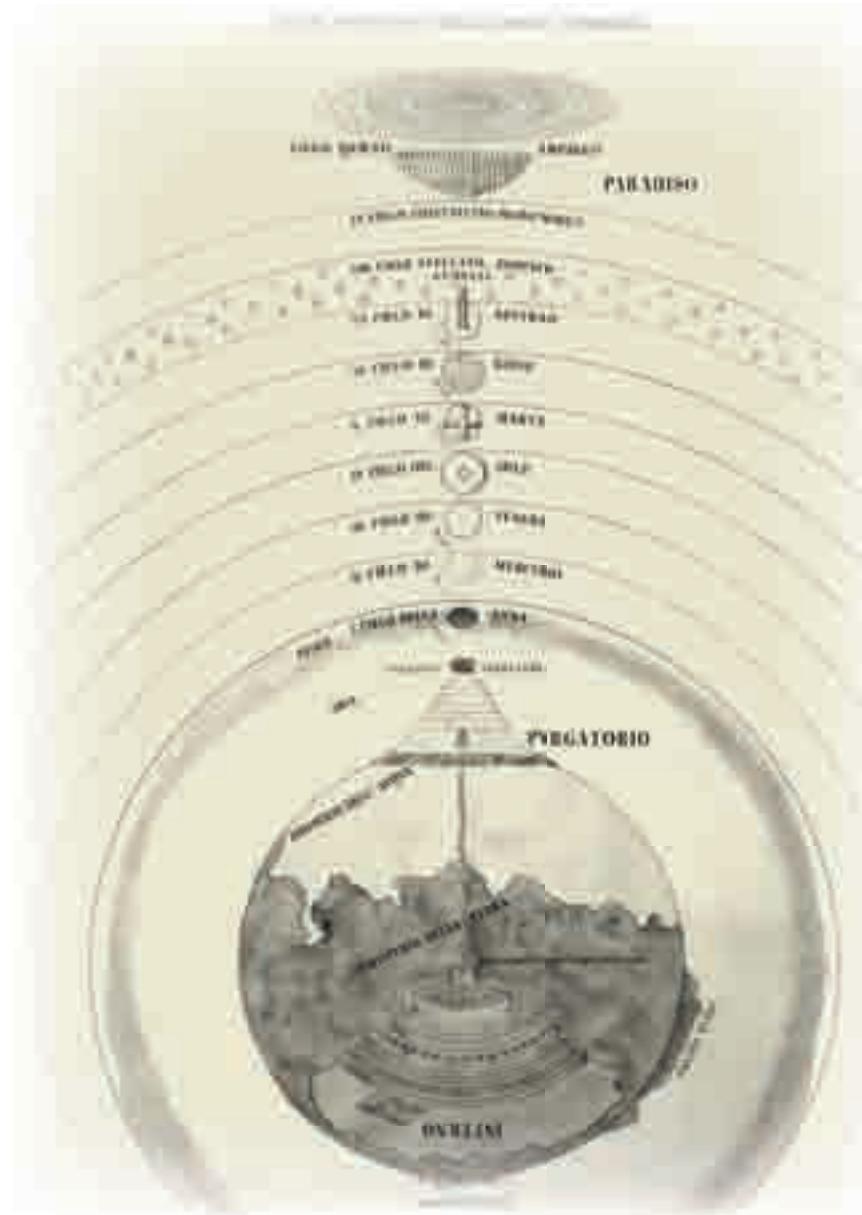
Mas com o passar dos séculos a posição da Igreja Católica sofreu algumas modificações e a concepção aristotélica do Universo sofreu um processo de simbiose com as afirmações encontradas em documentos sagrados, como o Antigo Testamento, por exemplo. Boa parte da junção entre ciência grega e fé católica foi obra de São Tomás de Aquino, sacerdote e estudioso do século XII. Essa linha filosófica ficou conhecida como Escolástica.

São Tomás acreditava que conhecer a natureza era uma das maneiras de conhecer Deus, e o conhecimento desenvolvido pelos gregos deveria ser usado para esse fim. Nesse contexto, a Igreja deveria ter autoridade nos assuntos relacionados à salvação das almas.

## Explorando o assunto

4

Também encontramos a simbiose da crença científica vigente com a fé católica na arte da Idade Média, como no poema épico *A divina comédia*, do italiano Dante Alighieri. Observe os detalhes do universo dantesco, apresentado na ilustração, e trace relações deste com o universo aristotélico e o catolicismo.



M. Caetari. 1855. Biblioteca Britânica, Londres. Foto: The Bridgeman Art Library/Keystone

## 3.2 Luzes na Idade Média: críticas à “física” de Aristóteles

Já falamos que as ideias de Aristóteles, tanto da estrutura do Universo quanto da dinâmica dos corpos, prevaleceram como corretas, aceitas sem discussão e amplamente difundidas durante séculos.

No Ocidente, poucos pensadores propuseram teorias que contradissem as proposições aristotélicas. Um dos críticos mais antigos foi o pensador Filoponos de Alexandria (c. 490-570), na transição entre a Antiguidade e a Idade Média. Ele não aceitava a ideia de *antiperistasis* e argumentava que, ao ser empurrado pela flecha, o ar não poderia executar três movimentos: ir para a frente; voltar para trás e ir novamente para a frente para empurrar a flecha. Para ele, o ar poderia apenas exercer resistência ao movimento, ideia lançada anteriormente por Hiparco de Niceia, astrônomo e matemático grego que viveu no século II a.C.

Hiparco de Niceia propunha que o movimento de uma flecha acontecia por causa da existência de uma força impressa no corpo, que se devia à ação do arco. Essa força ficava **impregnada** na flecha e lhe servia de motor ao longo do seu movimento. No entanto, conforme a força ia se desgastando, por causa da resistência com o ar, por exemplo, ela acabava se esvaindo e o movimento acabando até o repouso da flecha.

Jean Buridan, filósofo e religioso francês da Idade Média, que você conheceu brevemente no Capítulo 9, retoma as críticas ao modelo aristotélico. Ele aproveita as ideias de Filoponos e Hiparco e, de maneira muito criativa, elabora bons argumentos contra as proposições de Aristóteles. Por exemplo, ele dizia que o movimento de um pião girando na vertical mostrava que o deslocamento do ar não podia ser o responsável pelo seu movimento após perder contato com a ação do barbante.

Em outro exemplo, Buridan usa o movimento de um barco que desloca constantemente o ar em sua frente para explicar que um marinheiro no convés de um navio não sente o ar atrás dele empurando-o, mas somente o ar da frente resistindo a seu movimento. Além disso, se o marinheiro estivesse na traseira do navio e em sua frente houvesse cargas mais pesadas do que ele, como madeira ou grãos, ele deveria ser prensado contra a carga pelo ar atrás de si; isso se a teoria de Aristóteles fosse correta.

A partir dessas críticas, Buridan propôs que a única forma de conceber o movimento de projéteis era considerar a existência de algo que fica impresso no corpo. Ele chamou isso de **impetus**, dando-lhe as seguintes características:

- permanente e não se extingue por si mesmo;
- desgasta-se pela tendência natural do movimento dos corpos e pela resistência do meio;
- aplica-se a qualquer movimento, mesmo o circular;
- proporcional à quantidade de matéria e à velocidade do objeto lançado.

Sobre o movimento das estrelas, uma crítica interessante foi feita por Nicolau Oresme, matemático, físico, astrônomo e religioso francês que foi aluno de

Autor desconhecido.  
1754. Gravura. Coleção particular. Foto: Archive Photos/Getty Images



Hiparco de Niceia  
(190-125 a.C.).



Nicolau Oresme  
(1325-1382).

## Técnica e tecnologia

Autor anônimo. Miniatura.  
Biblioteca Nacional, Paris



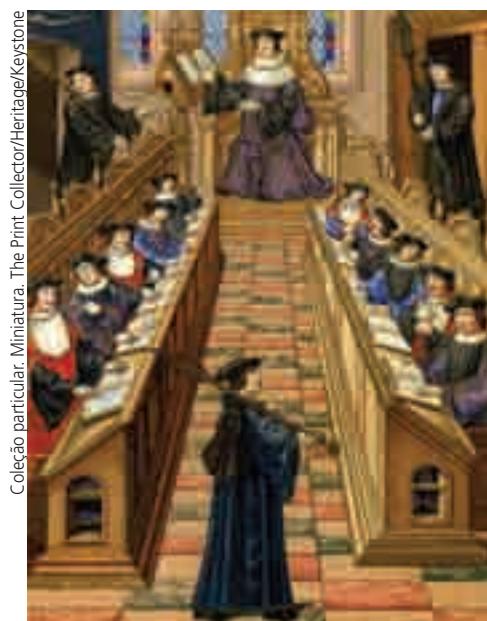
Buridan na Universidade de Paris. Oresme não via no deslocamento das estrelas no céu uma prova final de que elas estivessem em movimento. Para ele, o fato de observarmos o movimento das estrelas poderia significar, também, que a Terra gira enquanto o céu se encontra em repouso. Segundo Oresme, a observação do movimento de um corpo é sempre relativa, ou seja, tanto o observador quanto o observado podem estar em movimento. Ele não queria com isso provar que a Terra estivesse em movimento, mas apenas dizer que o fato de se observar as estrelas em movimento não era suficiente para decidir o que realmente se movia.

Sobre o movimento da Terra, Aristóteles argumentava que, caso nosso planeta se movesse, ao se lançar uma pedra para o alto ela deveria cair em um ponto muito distante do lançamento. Utilizando a teoria do *impetus*, Oresme contestou esse argumento dizendo que a Terra imprimia um impulso à pedra quando ela ainda estava em contato com a mão do lançador. Esse *impetus* fazia que a pedra “perseguisse” a Terra.

## As universidades

Na Europa, a principal inovação medieval no campo do ensino foi a criação das universidades. Essas escolas de ensino superior surgiram no século XII, a partir do contato do Ocidente com a cultura muçulmana e bizantina. Muito diferentes das instituições independentes que conhecemos hoje, eram fundadas por imperadores ou papas, como uma corporação eclesiástica que visava manter o monopólio cultural da Igreja.

As primeiras instituições fundadas foram: a Universidade de Paris, que possuía as faculdades de Teologia, Filosofia, Direito e Medicina; a Universidade de Bolonha, especializada em Direito; e a Universidade de Salermo, que tinha por especialidade a área de Medicina. No século XIV, também começaram a ser ministrados cursos de artes.



Coleção particular. Miniatura. The Print Collector/Heritage/Keystone



Séc. XV. Manuscrito. Biblioteca da Universidade de Glasgow, Escócia.  
Foto: The Bridgeman Art Library/Keystone

O Brasil, por ter uma história mais recente, teve um desenvolvimento tardio das universidades. Por exemplo, o Observatório Nacional, no Rio de Janeiro, está entre as mais antigas instituições brasileiras de pesquisa, ensino e prestação de serviços tecnológicos. Conhecido pela sigla ON, foi criado em 15 de outubro de 1827 por D. Pedro I, com a finalidade de orientar estudos geográficos do território brasileiro e ensinar navegação. Com a proclamação da República, em 1889, o Imperial Observatório do Rio de Janeiro passou a ser denominado como conhecemos atualmente.

As universidades brasileiras começaram a aparecer na primeira metade do século XX, quando foi redigida a primeira legislação universitária brasileira, em 1931.



Rogério Reis/Olhar Imagem

Tanto Santo Agostinho quanto São Tomás de Aquino foram personagens muito importantes na história da Igreja Católica na Idade Média e por isso foram canonizados. Porém, na Ciência, suas concepções sobre o conhecimento da natureza eram divergentes. Comente.

Para Santo Agostinho, a fé estava acima de tudo; portanto, era prioritária ao conhecimento. Já São Tomás de Aquino acreditava que embora o mundo natural fosse uma obra divina deveríamos compreendê-lo por meio da razão científica. Mas não deixou de lado a religião, pois a autoridade do mundo espiritual estava na Igreja e nas Escrituras. Por isso, iniciou a Escolástica, na tentativa de unificar a fé e a razão com base no pensamento de Aristóteles.

**1)** Acabamos de ler um texto sobre a simbiose entre ciência e religião, mas você sabe o que esse termo significa? Escreva em no máximo cinco linhas o que você entende por *simbiose*. Compare sua resposta com a de seus colegas e depois com a definição fornecida por um dicionário ou enciclopédia. *Resposta pessoal.*

**2)** Aponte o principal paradoxo da ideia de *antiperistasis*, proposta por Aristóteles e criticada por seus sucessores.

*O ar, ao mesmo tempo que oferecia resistência ao movimento, impulsionava o projétil.*

**3)** Qual a semelhança entre a força impressa de Hiparco e o *impetus* de Buridan? *Segundo ambas as teorias, o movimento acontecia por causa de um “ente” que ficava impregnado no objeto e se desgastava por conta do atrito.*

### Exercício resolvido

### Exercícios propostos



## 4. Copérnico e o sistema heliocêntrico

Não é de surpreender que uma teoria antiga como a aristotélico-ptolomaica cedo ou tarde tivesse de ser modificada, afinal, nem as mais recentes teorias estão livres dessa circunstância. As críticas a esse modelo, que apresentamos anteriormente, eram pequenas quando comparadas ao que viria a acontecer na época do Renascimento, período aproximado entre os séculos XIV e XVII, em que valores da Antiguidade grega foram retomados na Europa ocidental.

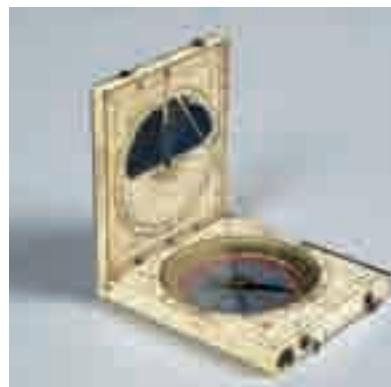
Para os escolásticos Oresme e Buridan e outros críticos do século XIV, era muito difícil aceitar mudanças radicais no sistema aristotélico, por ser o universo defendido pela Igreja Católica. Mesmo assim, suas críticas foram importantes, uma vez que levantaram problemas pontuais e mostraram que essa teoria não podia ser considerada uma verdade pronta e acabada.

Nesse período, com o início das grandes navegações houve uma elevada melhoria nos campos da Cartografia e da Astronomia, desenvolvendo-se instrumentos de medida como a bússola, o quadrante, o astrolábio e a balestilha, que forneciam dados cada vez mais precisos sobre a posição de estrelas e a trajetória dos planetas.

Drewett Neate Fine Art Auctioneers, Newbury, Berks, Reino Unido. Foto: The Bridgeman Art Library/Keystone



Autor desconhecido. Séc XVI. Óleo sobre tela. Museu Nicolau Copérnico, Polônia



Séc. XVII. Museu de Belas-arts, Orleans. Foto: Giraudon/The Bridgeman Art Library/Keystone



Séc. XVIII. Musée National de la Renaissance, Écouen, França. Foto: Giraudon/The Bridgeman Art Library/Keystone

Isso acabou por aumentar a discrepância entre o que se via no céu e o previsto pelo sistema aristotélico. Para tentar reparar essa divergência, os astrônomos tinham de aumentar o número de esferas (epiciclos) usadas na descrição da trajetória dos planetas. No início do Renascimento, o universo produzido a partir das ideias originais de Aristóteles e Ptolomeu tornava-se cada vez mais complexo. Não tardou para que questionamentos sobre a complexidade e o funcionamento lógico do Universo fossem levantados.

Um dos críticos dessas ideias foi Nicolau Copérnico, astrônomo, matemático e cônego da Igreja Católica que foi muito influenciado por ideias platônicas sobre a beleza e a perfeição do mundo.

Ao ser consultado pela Igreja sobre os erros cumulativos do antigo calendário (cujas correções resultariam na reforma do calendário juliano, como vimos no Capítulo 1), Copérnico percebeu que as incoerências no calendário se deviam à incerteza dos movimentos celestes e, portanto, essa reforma também exigia uma reformulação na Astronomia.

4



Nicolau Copérnico (1473-1543).

*Imagine que os epiciclos e os deferentes são como os ponteiros de um relógio, assim um pequeno erro no sistema pode atrasar a contagem do tempo. Se esse atraso for de 1 segundo por década, isso será facilmente percebido?*

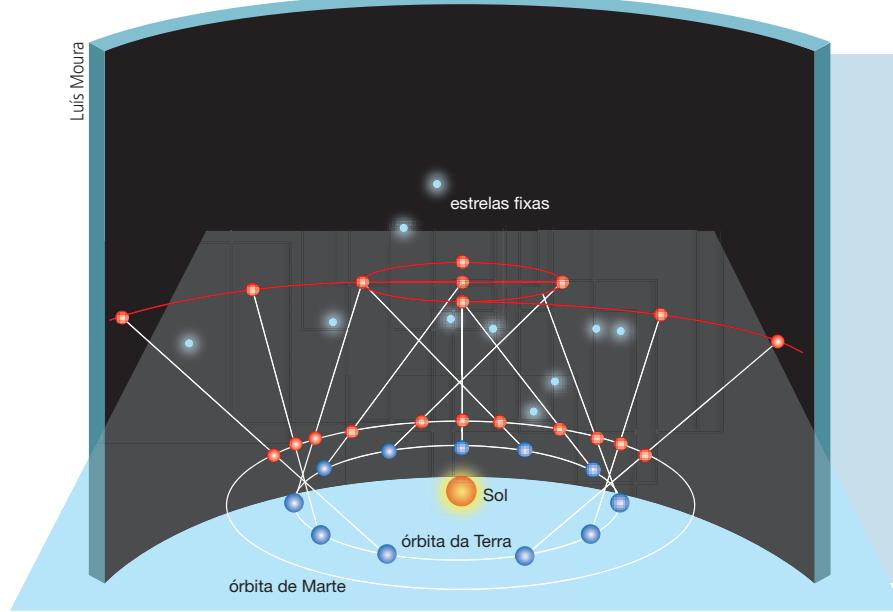
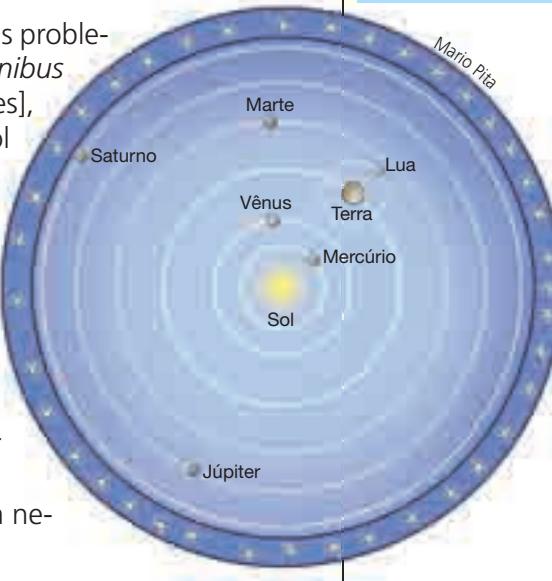
## Explorando o assunto

Ao estudar longamente o sistema geocêntrico e seus problemas, Copérnico escreveu um livro intitulado *De Revolutionibus Orbium Coelestium* [Sobre revoluções das esferas celestes], em que apresentava um sistema astronômico com o Sol parado no centro do Universo.

No modelo copernicano, o Sol passa a ocupar o centro do Universo, e os planetas giram em torno dele em órbitas circulares. Esse Universo é finito e as estrelas estão todas a uma mesma distância fixa em uma esfera exterior.

Vejamos algumas das explicações que essa proposta de sistema de mundo trouxe, principalmente, para outra interpretação dos fenômenos observados no céu.

- Há um movimento retrógrado dos planetas sem a necessidade de deferentes e epiciclos.



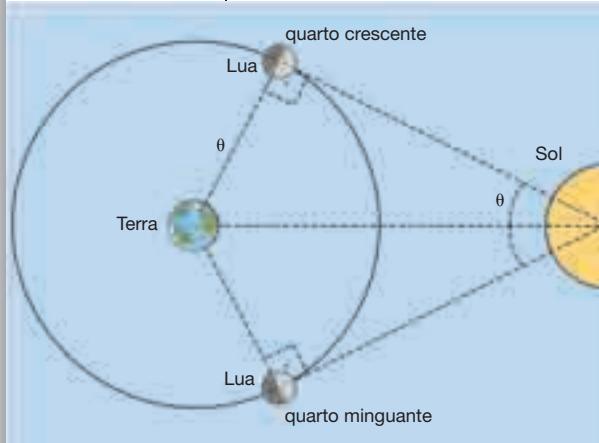
Ao admitir que os planetas descrevem uma órbita circular ao redor do Sol com velocidades diferentes, o movimento de "laçada" descrito pelos planetas em relação ao fundo de estrelas, quando observado da Terra, é explicado pelo movimento relativo entre eles. Por exemplo, como a velocidade orbital da Terra é maior que a de Marte, ao ultrapassá-lo, temos a impressão de que Marte realiza um movimento retrógrado no céu, mas esse movimento é um efeito de projeção e, portanto, aparente.

- Vênus e Mercúrio são observados apenas nas proximidades do Sol porque estão entre ele e a Terra.
- Marte, Júpiter e Saturno podem ser observados em oposição ao Sol porque a órbita da Terra está entre suas órbitas e o Sol.

Talvez prevendo a reação negativa a seu livro, Copérnico só autorizou a publicação no ano de sua morte. Ele foi então muito criticado pela Igreja por retirar a Terra de uma posição central no Universo, fazendo que se tornasse um planeta como outro qualquer. O livro entrou para o *Index*, a lista de livros proibidos da Igreja Católica, em 1609.

Apesar de o modelo heliocêntrico de Universo ser fortemente atribuído a Copérnico, ele não foi o primeiro a propor um sistema com o Sol no centro. Cabe ao astrônomo grego Aristarco de Samos, que viveu entre 310 e 230 a.C., o primeiro modelo heliocêntrico. Ele afirmava que o movimento dos planetas poderia ser explicado se o Sol estivesse no centro do Universo. Porém, naquele momento sua teoria não foi aceita, por contradizer a teoria aristotélica. Na época, as medidas das posições das estrelas e dos planetas não eram tão precisas e o modelo das esferas girantes de Eudoxo era satisfatório. Somente mil anos depois, o sistema heliocêntrico seria novamente proposto por Copérnico.

Mario Pita



Para justificar seu modelo heliocêntrico, Aristarco usa como argumento o fato de as fases quarto crescente e quarto minguante da Lua não serem perpendiculares ao segmento de reta entre o Sol e a Terra.

- Por que a Lua acompanha a Terra no seu movimento pelo espaço?
- Por que, ao lançarmos um objeto para cima, ele ainda cai na nossa mão apesar de estarmos nos movendo em alta velocidade com a Terra?

Copérnico conhecia boa parte desses argumentos e não tinha todas as respostas, porque na Ciência perguntas novas nem sempre podem ser respondidas no campo das velhas ideias!

Isso mostra que, na Ciência, as ideias não mudam de forma abrupta. Muito menos aquelas relacionadas à estrutura do Universo. Publicado em 1543, o livro de Copérnico, com a teoria sobre o heliocentrismo, não foi imediatamente aceito pelos demais pensadores. Ao contrário, a maioria de seus contemporâneos se mantinha fiel às ideias geocêntricas de Aristóteles e Ptolomeu. Eles talvez aceitassem pequenas modificações, mas não concordavam em colocar a Terra em movimento. E havia algumas boas razões para considerar a Terra parada. Podemos listar:

- Como explicar o movimento de queda dos corpos se a Terra não é mais o centro do Universo?
- O que faz que a Terra e os demais planetas permaneçam em órbita ao redor do Sol?

## 4

## Técnica e tecnologia



## O movimento da Terra e a paralaxe

Se a Terra se move em torno do Sol, deve haver mudanças na posição de todos os astros do céu ao longo de alguns meses. Ao observar uma mesma estrela no inverno e, seis meses depois, no verão, deve ser possível notar a diferença em sua posição.

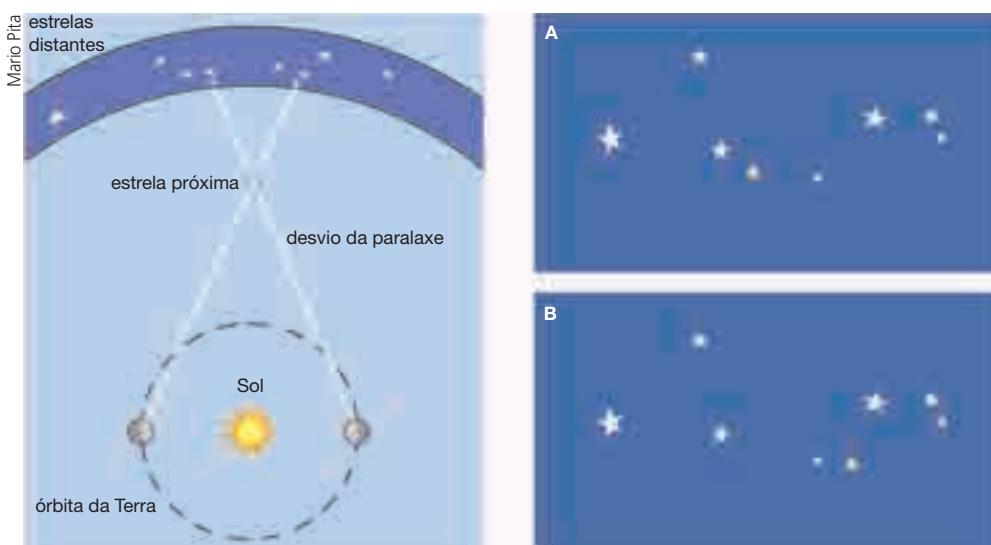
Esse fenômeno é conhecido como paralaxe. Você pode verificar facilmente ao observar, por exemplo, um objeto próximo, digamos a ponta de seu indicador. Estique o braço e levante somente o dedo indicador. Com um dos olhos fechados, alinhe seu dedo com um objeto mais ao fundo, de maneira que esse objeto fique totalmente encoberto pelo dedo. Agora, sem mexer, abra o olho que estava fechado e feche o outro. Apesar de você não ter se mexido, parece que o objeto ao fundo se deslocou



Mario Pita

e não está mais superposto com o dedo. Aparentemente o dedo muda de posição, mas de fato há uma mudança de perspectiva, pois você está realizando as observações a partir de dois “lugares” diferentes: ora o olho direito, ora o olho esquerdo.

O mesmo efeito ocorre quando observamos uma estrela próxima, em relação ao fundo de estrelas mais distante, a partir de duas posições da Terra ao longo de sua órbita. Quando a Terra está na posição *A*, vemos uma estrela mais próxima na frente de determinado grupo de estrelas que compõem o fundo *A'*. Seis meses depois, quando a Terra se encontra na posição diametralmente oposta *B*, observamos a mesma estrela em frente ao mesmo grupo de estrelas, porém de outra perspectiva, *B'*. Essa aparente mudança de posição da estrela se deve à Terra estar se movendo e as observações terem sido feitas a partir de pontos diferentes da órbita.



Esquema que ilustra o fenômeno de paralaxe para uma estrela observada a partir de duas posições diferentes da órbita da Terra e como se observa esse efeito no céu. Verifique que, entre as imagens *A* e *B*, o grupo de estrelas de fundo se mantém, e somente uma estrela parece ter se deslocado no céu.

Copérnico tinha consciência desse efeito e atribuiu a falta de visibilidade do fenômeno à grande distância da esfera das estrelas. A paralaxe foi percebida pelos astrônomos somente a partir do século XVI e só foi medida em 1838 pelo matemático e astrônomo alemão Friedrich Wilhelm Bessel. A dificuldade na observação desse efeito é explicada por seu valor muito reduzido, alguns segundos de arco. Essa medida, durante o Renascimento, teria diminuído muito a resistência ao sistema de Copérnico.

Qual a implicação religiosa da retirada da Terra do centro do Universo?

A Terra foi retirada da posição central do Universo e passou a ser vista como mais um planeta entre outros. Consequentemente, o homem não estava mais situado no lugar central que lhe caberia por ser a imagem de Deus.

**1)** Apesar da revolução astronômica proposta por Copérnico, ainda havia alguns elementos de seu universo que continuavam apoiados no universo aristotélico-ptolomaico. Relate pelo menos um deles.

*Os dois sistemas de mundo eram finitos e suas fronteiras acabavam na esfera das estrelas fixas.*

**2)** Como a teoria de Copérnico simplifica o movimento retrógrado dos planetas? *O movimento retrógrado deixa de ser real e torna-se um movimento aparente. Não é mais necessário usar vários epiciclos para explicar esse fenômeno.*



## Exercício resolvido

## Exercícios propostos



# 5. A consolidação do heliocentrismo

Foram necessários cerca de cem anos e a contribuição de outros cientistas para que a revolução iniciada por Copérnico se concluisse. A seguir, abordaremos as contribuições de Galileu Galilei e Johannes Kepler.

## 5.1 Galileu Galilei

Ver Orientação 29

Você já conheceu uma parte do trabalho de Galileu, em particular seu estudo sobre a queda dos corpos (Capítulo 4) e sobre a inércia (Capítulo 9).

O principal trabalho do cientista italiano na consolidação das ideias de Copérnico foi abrir caminhos para a elaboração de uma nova física (posteriormente desenvolvida por Newton) apresentando argumentos contra a física de Aristóteles. A seguir apresentamos em alguns tópicos os argumentos sustentados por Galileu para negar as afirmações de Aristóteles.

### Sobre a queda dos corpos

**Afirmiação aristotélica:** A queda dos corpos em busca de seu lugar natural dependia do peso do corpo.

**Contra-argumentação de Galileu:** Experimentalmente pode-se observar que todos os corpos caem da mesma forma, independentemente de sua massa.

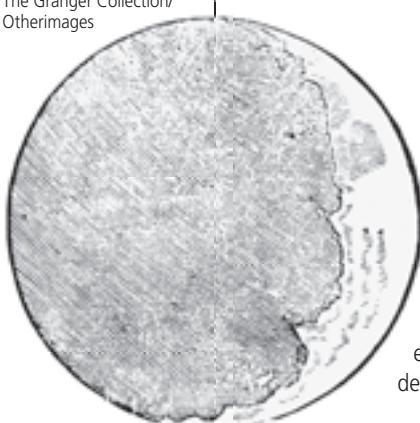
### Sobre a perfeição dos céus

**Afirmiação aristotélica:** Tudo no céu é perfeito, o que se traduz pelas formas perfeitas dos círculos e das esferas.

**Contra-argumentação de Galileu:** Apontando a luneta para a Lua, ele mostrou a existência de montanhas, vales e crateras. Como um corpo perfeito poderia ter imperfeições na superfície?

Desenho manuscrito de Galileu mostrando a existência de imperfeições (vales, montanhas e depressões) na superfície da Lua.

1610. Coleção particular. Foto: The Granger Collection/Otherimages



### Sobre o centro do Universo

**Afirmiação aristotélica:** Todos os corpos no céu descrevem círculos em torno da Terra, que é o centro do Universo.

**Contra-argumentação de Galileu:** Novamente com o uso da luneta, ele mostrou que existiam luas girando em torno de Júpiter. Como poderia haver dois centros para o Universo?

Detalhe do desenho original de Galileu Galilei, de 1610, mostrando o movimento das luas de Júpiter em torno do planeta, referente a seis noites de observação.



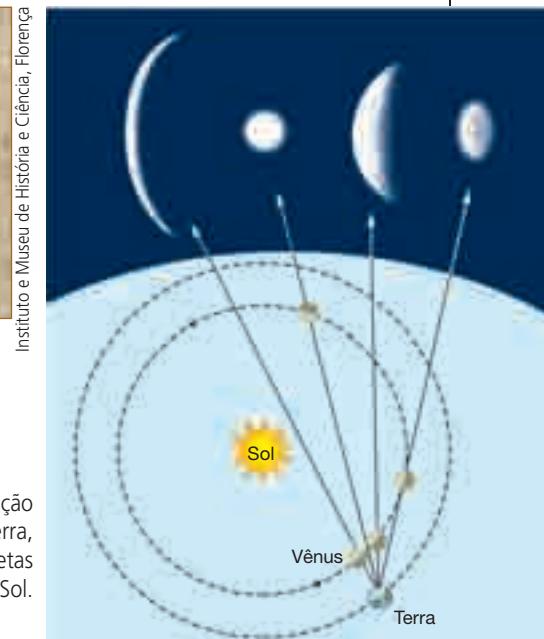
## Sobre o movimento da Terra

**Afirmiação aristotélica:** A Terra está parada no centro do Universo, pois esse é seu estado natural, com todos os outros corpos celestes se movendo ao seu redor.

**Contra-argumentação de Galileu:** Observando Vênus com uma luneta, Galileu percebeu que ocorriam variações na sua iluminação, ou seja, fases de Vênus assim como no caso das fases da Lua. Isso só poderia ser admitido se a Terra também estivesse em movimento entre o planeta e o Sol.



Gravura de Galileu mostrando as várias fases de Vênus, 1623.



Mario Pita

As fases de Vênus, mudança na iluminação do planeta vista por um observador na Terra, são explicadas pela dinâmica dos planetas ao redor do Sol.

**Afirmação aristotélica:** Estando a Terra em movimento, o ar, as nuvens, os pássaros e outros objetos não ligados à Terra deveriam ser deixados para trás. Quando um homem salta para o alto não deveria cair no mesmo lugar, visto que a Terra se movimentou. Tudo que está sobre a superfície da Terra deveria ser arremessado no espaço por causa do movimento girante.

**Contra-argumentação de Galileu:** Em um barco navegando por águas tranquilas, as coisas continuam a se mover como se ele estivesse parado! Uma pedra solta do mastro de um navio cairá sempre a seu pé, com o barco parado ou em movimento. O mesmo acontece com a Terra.

A analogia do barco utilizada por Galileu é facilmente transportável para o nosso cotidiano. Suponha que você esteja viajando bastante sonolento num ônibus com as janelas e as cortinas fechadas. Se a estrada for bem plana, sem buracos, e o ônibus tiver uma boa suspensão, ao acordar você pode saber, sem abrir a cortina, se o ônibus está em movimento? Essa tarefa pode ser bem complicada, já que o movimento do ônibus também é compartilhado por você. O que percebemos com facilidade é o movimento relativo. Por isso, olhamos para fora para nos certificar se o ônibus está em movimento.

Ao se opor às teorias aristotélicas, Galileu também estava se opondo às teorias aceitas pela Igreja Católica. Por isso, ele foi acusado de heresia pelo Tribunal do Santo Ofício e condenado a renunciar sua crença em um sistema heliocêntrico diante das autoridades do tribunal e à prisão domiciliar perpétua. Seus livros entram para o *Index* de livros proibidos. Conta uma lenda que ao sair do tribunal ele disse: *Eppur si muove*, ou seja, "Contudo, ela se move", referindo-se à Terra.

## Técnica e tecnologia



4

### Exercício resolvido

## A luneta de Galileu

As primeiras lunetas surgiram na Holanda por volta de 1600 e logo se espalharam pela Europa. Em 1609, quando viajava por Veneza, Galileu ficou sabendo que um artesão holandês havia inventado um equipamento que fazia os objetos parecerem maiores e mais próximos. A partir da descrição do instrumento desse artesão, Galileu construiu sua própria luneta, com poder de ampliação de nove vezes aproximadamente. Não contente com suas primeiras lunetas, Galileu conseguiu melhorar a técnica de confecção e passou a produzir lunetas que mostravam imagens mais nítidas, sem deformações e com ampliações de trinta vezes. Suas lunetas eram seis vezes mais potentes que as lunetas produzidas por outros artesões da época.

Pelas características desse equipamento, “ver melhor e mais longe”, Galileu não hesitou em apontar seu primeiro equipamento para o céu para buscar as respostas a suas indagações. Com esse instrumento de pesquisa, ele trouxe várias contribuições para a Astronomia. Além daquelas que você já pôde conhecer, destacamos outras:

- A faixa de aspecto leitoso que atravessa o céu, a Via Láctea, era formada por um sem-número de estrelas muito próximas entre si. Galileu conseguiu observar cada estrela separadamente, quando sem nenhum instrumento se observa apenas uma nebulosidade.
- Havia mais estrelas fixas do que era possível observar sem instrumento, isto é, quando o céu era observado pela luneta, “novas” estrelas apareciam.
- Saturno apresentava alterações, protuberâncias, na região do equador, que mudavam com o tempo. Atualmente sabemos que são os anéis vistos em perspectiva da Terra.
- Existem manchas escuras na superfície do Sol.



Colação particular. Foto: AKG-Images/LatinStock

A maior parte das descobertas astronômicas obtidas por meio da luneta foi reunida e publicada em 1610 em um livro de 24 páginas que recebeu o nome de *Sidereus Nuncius* [Mensageiro das estrelas]. Essa obra teve grande impacto e repercussão na Europa, principalmente depois da tradução para o italiano. Afinal, nela havia observações contrárias a algumas ideias de Aristóteles. O sucesso alcançado por Galileu o fez ser nomeado primeiro matemático e filósofo do grão-duque de Toscana e primeiro matemático da Universidade de Pisa.

A origem do telescópio provavelmente foi militar, pois com esse instrumento era possível fazer observações mais precisas a distâncias muito maiores. Porém, Galileu usou o equipamento com outra finalidade. Comente a importância desse ato para a história da Astronomia.

Galileu teve a sagacidade de utilizar o telescópio para fins científicos. Assim, as observações, que antes eram impossíveis, tornam-se elemento fundamental na pesquisa astronômica. Com o passar do tempo, os telescópios tornaram-se cada vez maiores, mudaram de refratores para refletores e surgiram instrumentos capazes de analisar a radiação na frequência de raios X, ultravioleta e ondas de rádio. Em 1999, foi criado o primeiro telescópio espacial, o Hubble.

**1)** Cite algumas contribuições de Galileu para a teoria heliocêntrica quando ele apontou a luneta para o céu. [Resposta no final do livro.](#)

**2)** A Lua observada por Galileu era formada de crateras, planícies, vales e montanhas que podiam chegar a 4 mil metros. Como essa constatação afetou a teoria de Aristóteles sobre os cinco elementos constituintes do Universo? [Resposta no final do livro.](#)

**3)** Em 2000, o Papa João Paulo II, em nome da Igreja Católica, desculpou-se publicamente pela atitude que tomou, no século XVI, perante as ideias de Galileu Galilei. Por que isso ocorreu? [Resposta no final do livro.](#)

## Exercícios propostos



## 5.2 Johannes Kepler

Muitas vezes temos a impressão de que o sistema heliocêntrico proposto por Copérnico era muito superior ao aristotélico. Por que então os seus contemporâneos não o aceitaram logo?

Em 1543, ano da publicação da obra de Copérnico, ainda existiam incompatibilidades entre os movimentos planetários observados e a teoria heliocêntrica. Colocar o Sol no centro e os planetas girando não permitia descrever precisamente o funcionamento do céu. Os dados das posições das estrelas e dos planetas utilizados por Copérnico eram provenientes das chamadas *tabelas alfonsinas*, que eram a revisão dos valores das tabelas de Ptolomeu encontradas no *Almagesto* feitas por astrônomos convocados pelo imperador do Sacro Império Romano, Afonso X.

Contemporâneo de Galileu, Johannes Kepler era um jovem estudante de Teologia quando teve contato com os trabalhos de Copérnico. A partir desse contato, ele decidiu estudar Matemática e Astronomia para tornar-se um defensor do modelo heliocêntrico. É importante ressaltar que essa formação eclética fez de Kepler também um defensor da astrologia, que acreditava haver nos céus indicações dos acontecimentos da Terra por meio da ação divina. Ele acreditava ainda em uma mente criadora e lógica do Universo, que poderia ser desvendada com a Matemática e a Geometria. Em seus estudos, Kepler descobriu haver erros nos dados observacionais das tabelas alfonsinas. Ele sabia que para a correta construção de um modelo de Universo precisaria ter em mãos dados mais precisos, e sabia também onde encontrar.

Na época, um famoso astrônomo dinamarquês, Tycho Brahe, que viveu de 1546 a 1601 (antes da invenção da luneta), tinha em mãos um dos maiores observatórios. Exímio observador do céu, ele melhorou e desenvolveu vários instrumentos astronômicos, coletando dados de excelente qualidade.

Em 1600, Kepler, então professor de Matemática e Astronomia na Universidade de Graz, na Áustria, entra em contato com Tycho Brahe para obter dados astronômicos. Este, sabendo do grande potencial matemático de Kepler, o convida para ser seu assistente no observatório. No entanto, a relação entre os dois é tensa e difícil, o que faz

Em Astronomi Instaurat Mechanica. 1598. Gravura. Biblioteca Britânica, Londres



Instrumento utilizado para a medida das posições das estrelas e dos planetas no observatório de Thyco Brahe, na Dinamarca.

Em Epistolarium  
Astronomicarum Libri,  
Uraniberg. 1596. Gravura.  
Coleção particular



Tycho Brahe (1546-1601) e Johannes Kepler (1571-1630).



Autor desconhecido. 1610. Gravura. Coleção particular

Brahe, que não acreditava no sistema heliocêntrico, não entregar nenhum de seus dados a Kepler. Em 1601, um ano após a chegada do jovem assistente, Tycho Brahe morre e então Kepler tem acesso aos preciosos dados de que precisa.

Kepler dedicou quase dez anos estudando e tentando compreender a trajetória irregular do planeta Marte. Inicialmente ele continuou trabalhando com as órbitas circulares e criou vários sistemas com círculos compostos sem resolver o mistério do movimento. Então ele começou a buscar outra figura geométrica para descrever a órbita do planeta. Embora no início tenha ficado um pouco relutante em abandonar os círculos, Kepler sabia que as observações, dados de excelente precisão para a época, não estavam erradas e exigiam mudanças na concepção das órbitas. Ele tentou utilizar várias formas ovais passando por diversas tentativas frustradas, pois os cálculos não coincidiam com os dados de Tycho, até que um dia chegou à **elipse**.

A introdução de uma órbita elíptica para descrever o movimento dos planetas foi sua primeira grande contribuição, permitindo que o sistema heliocêntrico se tornasse simples e preciso. Os longos anos de observação e os inúmeros dados coletados também permitiram a Kepler perceber que:

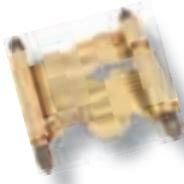
- A velocidade do planeta ao longo de sua órbita não é uniforme.
- Existe uma relação entre o período orbital do planeta e sua distância ao Sol, que é constante para todos os planetas.

No próximo capítulo, vamos analisar com mais profundidade as contribuições de Kepler, e você vai conhecer também as contribuições de Newton para a consolidação do sistema heliocêntrico.

Ver Orientação 30.

## 4

### O cientista no tempo e na história



### Johannes Kepler

No dia 27 de dezembro de 1571, em uma tranquila vila alemã, porém em uma conturbada família, nasceu Johannes Kepler. Filho de Heinrich Kepler, um soldado com temperamento agressivo e instável, e de Katherine, uma mulher fofoca e mal-humorada, que quase foi queimada viva na fogueira da Inquisição por ser acusada de bruxaria, Kepler teve seis irmãos, dos quais três morreram ainda crianças e um era epiléptico.

Quanto a ele, foi uma criança prematura que sofreu por toda a vida com os problemas físicos consequentes de um quase fatal ataque de varíola aos 4 anos de idade. Por causa de sua saúde frágil, a única perspectiva de carreira que se vislumbrava para o pequeno Kepler era a vida religiosa. Assim, aos 13 anos, ele foi estudar fora de sua cidade natal com uma bolsa de estudos financiada pela Igreja Protestante e, aos 17 anos, ingressou na Universidade de Tübingen, onde estudou Teologia, Filosofia, Matemática e Astronomia.

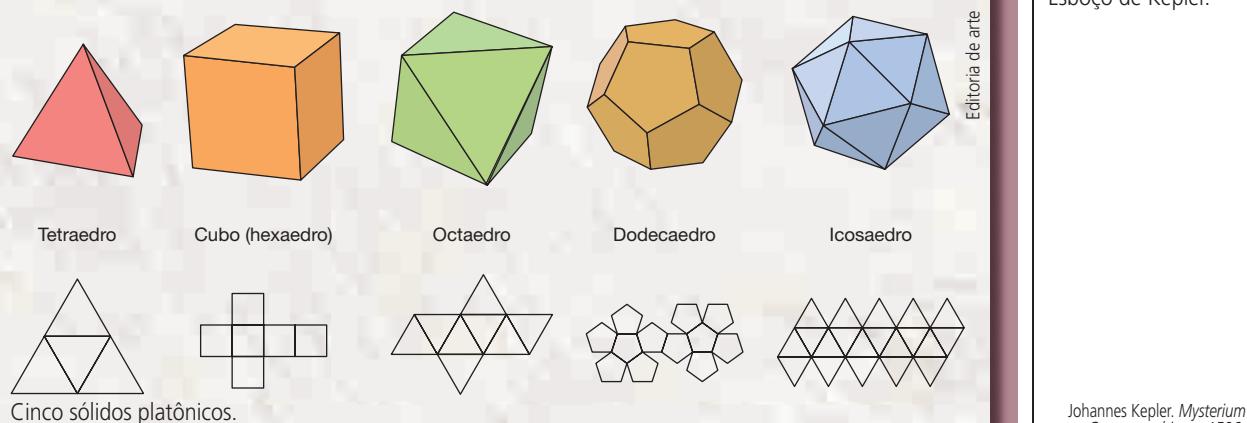
Seu objetivo era tornar-se sacerdote, mas em 1954 a oportunidade de ser docente de Matemática e Astronomia na Universidade Luterana de Graz,

na Áustria, fez seu caminho profissional tomar outros rumos. Apesar disso, nunca deixou de ser um homem religioso e acreditar que a harmonia matemática do Universo era uma manifestação divina.

Naquela época, ainda não havia distinção entre Astronomia e Astrologia; por isso, além de lecionar, uma das funções de Kepler era preparar o calendário astrológico anual. Seu primeiro trabalho fez tanto sucesso que sua popularidade como astrólogo acabou sendo maior que a de professor. Assim, para complementar sua renda, ele constantemente preparava horóscopos.

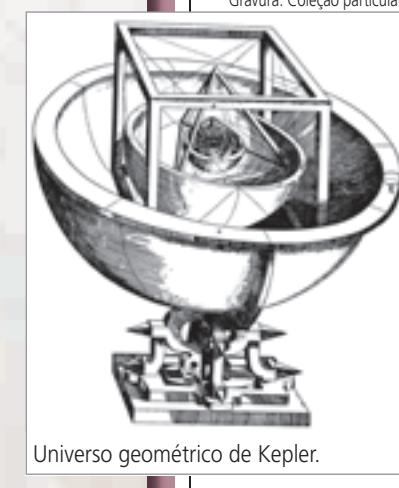
Outro evento marcante na vida do cientista também aconteceu em Graz. Durante uma aula de Geometria, ele desenhou na lousa um círculo com um triângulo equilátero em seu interior, depois outro círculo circunscrito no triângulo, e percebeu que a razão entre as duas circunferências era equivalente à razão entre as órbitas de Saturno e Júpiter. Nesse momento de epifania, julgou ter encontrado a explicação para o universo heliocêntrico.

Kepler conhecia os cinco sólidos platônicos – considerados sólidos perfeitos, nos quais todas as faces são idênticas e figuras geométricas regulares – e sabia que era possível colocar uma esfera no interior e outra no exterior de cada sólido. Para o cientista, cada esfera representava uma órbita planetária e os sólidos, que se encaixavam entre elas, indicavam as distâncias entre cada planeta.



Além disso, os cinco sólidos justificavam a existência de apenas seis planetas no Sistema Solar (naquela época eram conhecidos somente: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno), com cinco espaços entre suas órbitas.

Depois de trabalhar incansavelmente por alguns meses na sua teoria geométrica que explicaria o universo heliocêntrico, Kepler apresenta sua primeira obra, *Mistérios cosmográficos*, 53 anos após a publicação de *Revolutionibus* de Copérnico. Mas foi somente em 1609, 13 anos depois de seu primeiro livro, que publicou *Astronomia nova*, no qual utiliza os dados das observações astronômicas realizadas por Tycho Brahe para concluir que as órbitas dos planetas são elipses. Depois de mais de nove anos de muito estudo e dedicação, Kepler publica *Harmonia dos mundos*, em que apresenta

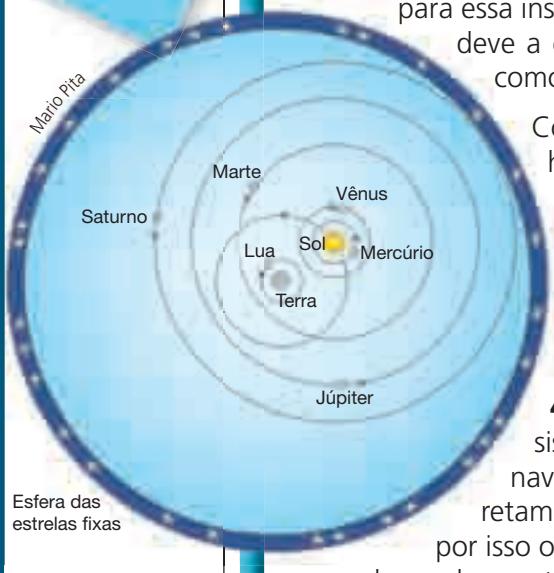




## Exercício resolvido

## Exercícios propostos

*é fácil*



outras descobertas sobre os movimentos planetários que serão decisivas para a elaboração da teoria da Gravitação Universal e a definitiva consolidação do sistema heliocêntrico, apresentada no próximo capítulo.

A busca pela perfeição e pela exatidão celeste parecia trazer alento ao cientista, cuja vida pessoal na fase adulta não foi muito diferente da turbulenta infância. Seus dois primeiros filhos morreram ainda crianças e seu infeliz casamento com Barbara Müller acabou depois de 14 anos, quando a esposa e outro filho faleceram de tifo. Dois anos depois, ele se casou com Susanna Reuttinger e, dos sete filhos do casal, apenas dois sobreviveram.

Sua jornada terminou aos 58 anos, por causa de uma febre repentina, em 15 de novembro de 1630, sem que suas contribuições à Ciência fossem completamente reconhecidas em vida. Em seu epitáfio, de autoria própria, encontramos as seguintes palavras: "Eu costumava medir o céu: agora devo medir as sombras da Terra. Apesar de minha alma ser do céu, a sombra de meu corpo descansa aqui".

Quais foram as contribuições de Tycho e Kepler para o fazer científico?

Tycho Brahe desenvolveu vários instrumentos de observação astronômica, trabalhando sempre de forma muito rigorosa com a coleta dos dados. Johannes Kepler contribuiu na utilização da Matemática como ferramenta fundamental para as ciências físicas.

**1)** Em 1572, Tycho Brahe observou o surgimento de uma brilhante "estrela nova" (uma supernova) na constelação de Cassiopeia. Nos meses seguintes, seu brilho desvaneceu gradualmente, até desaparecer completamente em 1574. Após analisar cuidadosamente seus dados, percebeu que a "estrela" estava além da Lua. Utilize esse dado contra a teoria de Aristóteles.

*Resposta no final do livro.*

**2)** Como vimos, apesar de ter convidado Kepler para ser seu assistente, Tycho Brahe não forneceu seus dados observacionais ao matemático. Um dos motivos para essa insegurança de Brahe em mostrar seus dados para Kepler deve a ele querer provar sua concepção particular de Universo, como ilustra a figura ao lado.

Como você descreveria esse modelo? Ele é geocêntrico ou heliocêntrico?

*Resposta no final do livro.*

**3)** Como a observação da órbita irregular do planeta Marte e a posterior teoria das órbitas elípticas de Kepler se opõe ao "culto das esferas" e do movimento celeste uniforme da Antiguidade grega? *Resposta no final do livro.*

**4)** Kepler acreditava que o movimento dos planetas no sistema heliocêntrico era causado por um poder que emanava do Sol, chamado *anima motrix*. Esse poder estava diretamente relacionado à distância do planeta ao astro central, por isso os planetas se moviam com velocidades variáveis. Você conhece alguma teoria científica que tenha alguma semelhança com essa?

*Resposta pessoal.*

## Exercícios propostos

**Exercícios correspondentes ao universo geocêntrico dos gregos.**

Pense  
um pouco  
mais!

**1)** Por que o movimento circular dos planetas era considerado perfeito e imutável? [Resposta no final do livro.](#)

**2)** Os gregos conheciam todos os planetas do Sistema Solar? Por quê? [Resposta no final do livro.](#)

**Exercícios correspondentes às ideias de Aristóteles.**

**3)** Para Aristóteles, o céu era perfeito e a Terra era imperfeita. A que se deve essa crença? [Resposta no final do livro.](#)

**4)** Você chuta uma bola e observa que depois de certo tempo ela para. Discuta a dinâmica envolvida nessa situação a partir da teoria de Aristóteles e depois a partir das ideias de Newton, estudadas nos Capítulos 7 e 9. [Exercícios correspondentes ao período medieval.](#)

**5)** Compare as universidades medievais com as atuais. [Resposta no final do livro.](#)

**6)** Compare a hierarquia social e religiosa da Idade Média com a Astronomia desse período. [Exercícios correspondentes a Copérnico e ao modelo heliocêntrico.](#)

**7)** Qual a relação das grandes navegações do século XV com o desenvolvimento da Astronomia? [Resposta no final do livro.](#)

**8)** Na sua opinião, qual é o sentido do termo *revoluções* no título do livro de Copérnico? [Resposta pessoal.](#)

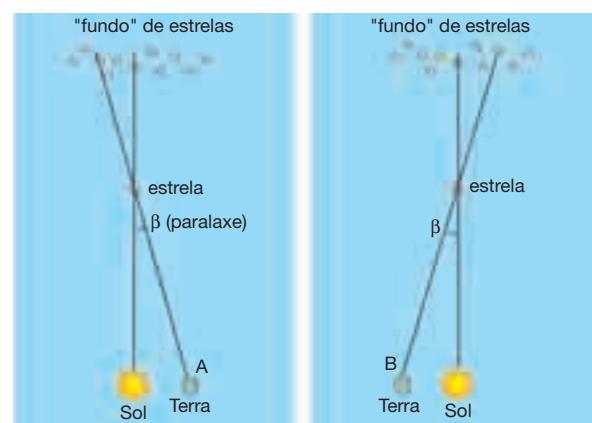
**9)** (OBA) Em Astronomia, os objetos de estudo estão sempre muito distantes. Quase sempre os astrônomos precisam obter informações sobre os astros sem poder tocá-los ou colher amostras para realizar experimentos, o que tem sido feito de forma limitada somente muito recentemente em corpos relativamente próximos como a Lua e Marte. Há ainda a possibilidade de análise de meteoritos caídos na Terra. Mas isto é muito pouco! Os astrônomos conseguiram desenvolver muitos métodos para obter informações sobre os corpos celestes, analisando a luz que recebemos deles. Alguns exemplos de grandezas que podem ser obtidas desta forma são: velocidade, distância, temperatura, massa, idade, a presença de elementos químicos e suas respectivas quantidades, e outras mais.

Uma das informações mais importantes que se pode obter sobre um corpo é a distância a que ele está da Terra. Há vários métodos para fazer isso. Um deles, talvez o mais simples, é através da medida do ângulo de **paralaxe**.

(...)

Quando olhamos para o céu, em seu conjunto, a distância das estrelas é tão grande que perdemos a noção de profundidade, num primeiro momento. Todas as estrelas parecem então estar à mesma distância, coladas numa grande esfera, a Esfera Celeste. Mas, na verdade, sabemos que elas não estão à mesma distância, sendo o método de paralaxe usado para medir algumas destas distâncias. Para entendê-lo, olhe a figura abaixo. Quando a Terra está na posição A, na figura da esquerda, vemos uma estrela que está relativamente próxima, se considerarmos as demais (bem mais distantes, formando um "fundo" de estrelas).

Já na posição B, algum tempo depois, a Terra está em outra posição, e vemos a estrela em outra posição em relação às estrelas de fundo. Na prática, através da observação da estrela nas posições A e B, os astrônomos são capazes de medir o ângulo  $\beta$  mostrado na figura, que se chama paralaxe. Com esse ângulo e trigonometria, pode-se determinar a distância da estrela.



Mario Pita

a) Quanto tempo a Terra levou para se mover da posição A para a posição B? Justifique.

[Seis meses, metade de um ano.](#)

**No livro original existem mais duas páginas de exercícios que complementam esta seção.**

# Outras ATIVIDADES



**Experimento**  
*Investigue  
você  
mesmo*

**4**

## Observando o movimento do céu

### Material

- suas mãos esticadas em direção ao céu
- dia sem nuvens
- noite sem nuvens e, preferencialmente, um local com pouca iluminação pública

### Roteiro e questões

#### Como acompanhar a passagem das horas sem um relógio mecânico?

Observe na figura a seguir a equivalência de algumas partes da mão (quando você mantém seu braço esticado) com medidas em graus. Por definição,  $1^\circ = 60 \text{ min}$  e  $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$ .



Em uma noite sem nuvens, é possível marcar a passagem do tempo acompanhando o “movimento do céu”.

- Primeiramente, escolha um ponto de referência para sua observação; pode ser uma árvore ou uma casa, por exemplo.
- Escolha depois um objeto celeste que seja fácil de localizar. (Nesse momento, você pode começar a entender uma das necessidades de “construir” constelações no céu).

- De períodos em períodos, acompanhe o deslocamento a partir do ponto de referência.

Em seguida, responda:

- 1)** Qual foi o ponto de referência escolhido?
- 2)** Você acompanhou o movimento de alguma constelação? Qual?
- 3)** Quanto tempo durou a sua observação?

Em seguida, veja num calendário em que noite haverá Lua cheia e acompanhe o aparecimento dela no horizonte. Isso deve ser feito por volta das 18 h.

■ Meça o tamanho angular da Lua. Como seu indicador, mantendo os braços esticados, será maior que a Lua, tente utilizar um pedaço de papel para realizar a medida.

- Espere passar duas horas e proceda novamente com a medida.
- Espere mais duas horas, depois da segunda medida, e faça uma terceira avaliação do tamanho do disco lunar.

Responda então às seguintes perguntas em seu caderno:

- 4)** O tamanho angular da Lua muda conforme sua posição no céu? A sua observação concorda com os valores obtidos?
- 5)** O Sol tem o mesmo tamanho angular que a Lua. Você conhece algum fenômeno astronômico que justifique essa afirmação? Qual?
- 6)** Na questão anterior, afirmou-se que o Sol e a Lua possuem o mesmo tamanho angular. Isso significa que eles têm o mesmo tamanho?

## Giordano Bruno

Utilizando bons sites da internet, revistas de divulgação científica e os livros da biblioteca da sua escola, pesquise sobre este assunto sugerido. A seguir, são apresentadas algumas questões com o objetivo de orientar sua busca. Depois de encontrar os itens propostos, redija um texto e selecione imagens para elaborar um painel apresentando a vida e a obra de Giordano Bruno para os outros alunos da sua escola.

### A Inquisição se deve à Ciência ou à religião?

- 1)** Quem foi Giordano Bruno?
- 2)** Qual sua contribuição para a teoria heliocêntrica?
- 3)** Por que ele foi perseguido e preso pela Inquisição? Qual foi a acusação feita? O que aconteceu após o julgamento?



Autor desconhecido. Gravura particular

**Pesquise,  
proponha  
e debata**

**Foi assim...**  
Investigue  
com o  
pesquisador

Autor desconhecido.  
Séc XVI. Óleo sobre tela.  
Museu Nicolau Copérnico,  
Polônia



4



## *De Revolutionibus Orbium Coelestium*

Desde a Antiguidade Clássica, alguns pensadores gregos, como Aristarco de Samos, já especulavam sobre um sistema de mundo com o Sol no centro. Mas foi apenas no Renascimento que uma obra propondo a teoria heliocêntrica, com observações cuidadosas do céu, cálculos matemáticos das posições dos astros e diagramas elaborados sobre o movimento celeste, foi publicada: *De Revolutionibus Orbium Coelestium* [Das revoluções das esferas celestes], de Nicolau Copérnico.

O livro é dividido em seis partes: a primeira estabelece o sistema heliocêntrico, a segunda trata o movimento das estrelas e dos planetas (em alguns momentos, ele também usou os epiciclos), a terceira parte discute o movimento de precessão da Terra, como resultado da revolução do planeta ao redor de seu próprio eixo, e as outras partes discutem o movimento dos planetas e da Lua.

A seguir, apresentamos o prefácio do livro escrito pelo teólogo luterano Andreas Osiander, amigo de Copérnico que se empenhou na publicação da obra.

### **Ao Leitor, sobre as Hipóteses desta Obra**

Considerando-se que a novidade das hipóteses desta obra — a qual coloca a Terra em movimento e põe um Sol imóvel no centro do universo — já foi tornada bastante pública, não tenho a menor dúvida de que certos sábios ficaram seriamente indignados e acham errado causar qualquer perturbação entre disciplinas liberais há muito bem estabelecidas. No entanto, caso eles estejam dispostos a examinar o assunto com cuidado, verão que o autor desta obra nada fez que mereça reprovação. Pois é tarefa do astrônomo fazer uso da observação criteriosa e hábil, ao coligir a história dos movimentos celestes, e então — já que por nenhuma linha de raciocínio pode chegar às causas verdadeiras desses movimentos — imaginar ou construir as causas ou hipóteses que lhe aprouverem, de modo que, presumindo-se tais causas, aqueles mesmos movimentos possam ser calculados, a partir de princípios de geometria, para o passado, mas também para o futuro. Esse artista é notadamente bem-sucedido nas duas tarefas: pois não é necessário que essas hipóteses sejam verdadeiras, ou mesmo que haja grande probabilidade de que o sejam; basta que elas forneçam um cálculo adequado às observações — a menos que haja alguém tão ignorante em geometria e óptica a ponto de considerar o epiciclo de Vênus provável e acreditar ser essa uma razão pela qual Vênus alternadamente precede o Sol e a ele se segue, a uma distância angular de até  $40^\circ$  ou mais. Pois quem não vê que, admitido isso, daí necessariamente se seguiria que o diâmetro do planeta, em seu perigeu, pareceria mais de quatro vezes maior, e o corpo do planeta mais de dezesseis vezes maior, do que em seu apogeu? Não obstante, a experiência de todos os tempos a isso se opõe. Há ainda outras coisas nessa disciplina que são simplesmente absurdas, mas não é necessário examiná-las agora. Pois está bastante claro que essa arte ignora total e inteiramente as causas dos movi-

mentos irregulares aparentes. Mas, se ela constrói e inventa causas — e por certo inventou muitas —, não o faz, contudo, para persuadir quem quer que seja de sua verdade, mas apenas a fim de que elas possam fornecer uma base correta de cálculo. Mas, uma vez que, para um único e mesmo movimento, as hipóteses propostas variam de tempos em tempos, como no caso da excentricidade ou do epicílio para o movimento do Sol, o astrônomo prefere adotar a que for de mais fácil compreensão. Talvez o filósofo exija, antes, probabilidade; mas nenhum deles compreenderá ou ensinará nada de certo, a menos que isso lhe haja sido revelado por Deus. Portanto, deixemos que essas novas hipóteses se deem a conhecer publicamente em meio às antigas, as quais, por sua vez, não são mais prováveis, especialmente considerando-se que são maravilhosas e fáceis e trazem consigo todo um vasto repertório de observações doutas. E, em se tratando de hipóteses, que ninguém espere da astronomia nada da ordem da certeza — já que a astronomia não nos pode oferecer nada de certo —, sob o risco de que aquele que porventura tome por verdadeiro o que foi concebido com outro fim, deixe essa disciplina ainda mais néscio do que ao dela se aproximar. Por ora, é tudo.

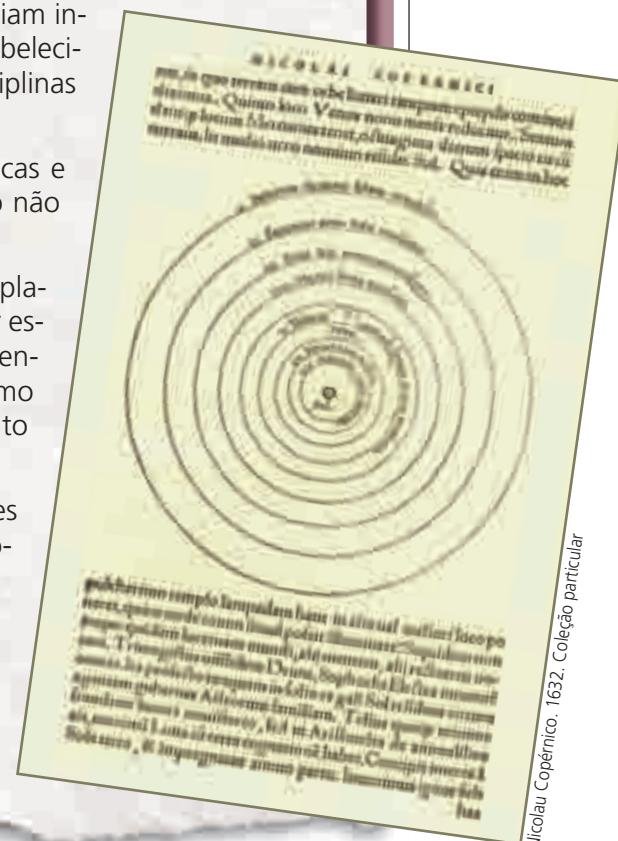
In: HAWKING, Stephen. *Os gênios da Ciência: sobre os ombros de gigantes*. Rio de Janeiro: Campus, 2005. p. 9-10.

Responda agora às questões em seu caderno.

### Questões

- 1)** Tanto no título quanto ao longo do prefácio, Andreas Osiander trata o novo sistema de mundo como hipótese, não como teoria verdadeira. Quais razões podem ter motivado a escolha desse termo?
- 2)** Quem são os sábios que certamente ficariam indignados com a mudança no conhecimento estabelecido? A que se refere o autor quando cita as “disciplinas liberais há muito bem estabelecidas”?
- 3)** Apesar de contradizer as crenças científicas e religiosas vigentes, por que a obra de Copérnico não merece reprovação, segundo Osiander?
- 4)** Osiander contrapõe observações reais do planeta Vênus com as observações que deveriam ser esperadas no sistema aristotélico-ptolomaico. Comente um dos argumentos apresentados por ele como exemplo dos absurdos das “disciplinas há muito bem estabelecidas”.
- 5)** Quais movimentos irregulares aparentes têm suas causas ignoradas pela nova “arte” copernicana?

Modelo heliocêntrico proposto por Copérnico em sua obra de 1543.



Nicolaus Copérnico. 1543. Coleção particular

# CAPÍTULO 11

Professor, as sugestões ou orientações para o encaminhamento de atividades e outras discussões foram numeradas sequencialmente no *Caderno de orientações*, que se encontra no final deste volume.

**Neste capítulo,  
você conhecerá  
a teoria da  
Gravitação  
de Newton e  
compreenderá  
por que ela foi  
importante na  
consolidação  
do sistema de  
Copérnico. Mas  
antes analisaremos  
com mais  
profundidade  
as descobertas  
de Kepler que  
resultaram na  
proposição de  
três leis.**

4

# GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

## 1. As leis de Kepler

Os trabalhos de Galileu e Kepler permitiram que a disputa entre aristotélicos e copernicanos empatasse. Mas ainda havia questões importantes a esclarecer:

- O que faz os planetas girarem em torno do Sol?
- Por que a Lua gira em torno da Terra e não em torno do Sol?
- Por que as luas de Júpiter giram em torno dele?
- Por que os corpos na superfície da Terra caem em direção ao centro do planeta?

Solucionar essas questões era, em parte, completar a revolução da maneira de conceber o Universo iniciada por Copérnico e continuada por Galileu e Kepler. Podemos dizer que os trabalhos deles foram mais descriptivos e que faltava ainda uma explicação sobre a natureza e a causa das características do Universo.

Foi Isaac Newton, o físico britânico que já conhecemos na unidade anterior, quem encontrou a resposta para essas perguntas. Com a elaboração da teoria da Gravitação Universal, ele forneceu os últimos argumentos que faltavam para a consolidação do sistema heliocêntrico, iniciado havia muito tempo por outros cientistas. Mas, por ora, vamos entender melhor as leis que descrevem o movimento planetário determinadas por Kepler.

Em seu trabalho com os dados astronômicos das posições dos planetas, particularmente do planeta Marte, Kepler percebeu que havia três características importantes que descreviam os movimentos dos planetas ao redor do Sol. Essas características foram posteriormente definidas como três leis que levam seu nome.

## 1.1 Primeira lei de Kepler ou lei das órbitas

**As órbitas descritas pelos planetas em torno do Sol são representadas por elipses, onde o Sol ocupa um dos focos.**

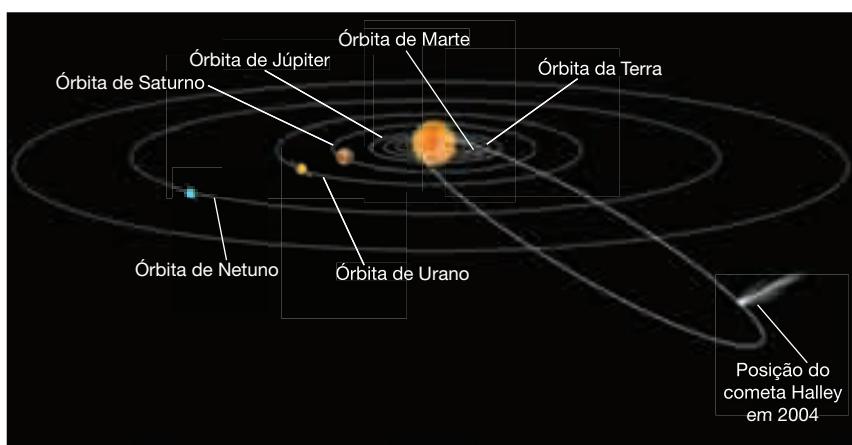
Note que, pelo fato de o movimento não ser circular, a distância entre o Sol e o planeta varia com o ponto da trajetória. Isso significa que ora o planeta se encontra mais perto do Sol, ora se encontra mais longe. Entretanto, é importante salientar que as órbitas planetárias são elipses pouco excêntricas, em outras palavras, “atenuadas”, quase circulares. Para você ter uma ideia de quão excêntrica é a órbita terrestre, observe os dados da tabela a seguir com as distâncias entre o Sol e a Terra em alguns pontos de sua órbita:

menor distância (km)	147 100 000	$1,471 \cdot 10^8$
distância média (km)	149 597 890	$1,4959789 \cdot 10^8$
maior distância (km)	152 100 000	$1,521 \cdot 10^8$

Valor das distâncias da Terra ao Sol. O ponto da órbita de maior aproximação entre um planeta e o Sol é chamado perílio e o ponto de maior distanciamento é denominado afélio. Fonte de pesquisa: <<http://sse.jpl.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Earth&Display= Facts&System=Metric>>. Acesso em: 22 jul. 2009.

Pelos valores, vemos que a distância entre o Sol e a Terra não varia mais do que 2% em relação ao valor médio. Você já deve ter visto diversas ilustrações com órbitas planetárias muito excêntricas (achatadas). Esse é um recurso utilizado para inserir perspectiva no desenho, portanto não deve ser tomado como referência.

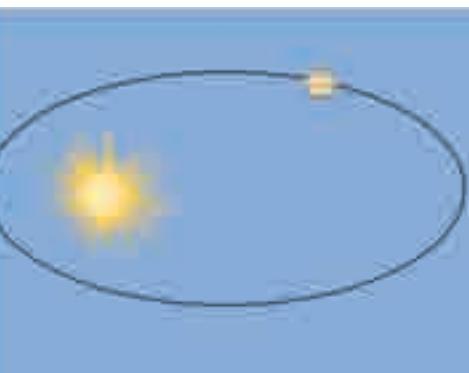
Em geral, somente os cometas possuem órbitas com grande excentricidade, mas também podemos citar alguns planetas anões e meteoroides, além da órbita de Netuno. No caso dos cometas, eles podem apresentar órbitas de diferentes extensões e períodos de translação. Por exemplo, o cometa Hencke tem período de 3,3 anos e sua órbita se encontra inserida na órbita de Júpiter. Em contrapartida, o cometa Halley tem período de cerca de 76 anos e sua órbita se estende ao limite da órbita de Netuno.



Luis Moura  
As imagens estão fora da escala de tamanho.  
As cores são ilustrativas. Não correspondem aos tons reais.

Photodisc/Getty Images

O cometa Halley (no detalhe), cuja órbita foi determinada por Edmund Halley (1656-1742), foi o primeiro cometa a ser reconhecido como periódico. O período desse cometa é de cerca de 76 anos. Estima-se que a próxima aproximação máxima com o Sol ocorra no fim de julho de 2061.



Mario Pita  
Trajetória elíptica descrita por um planeta em torno do Sol. A figura não está em escala, a forma elíptica da órbita do planeta está exagerada.

## Explorando a situação

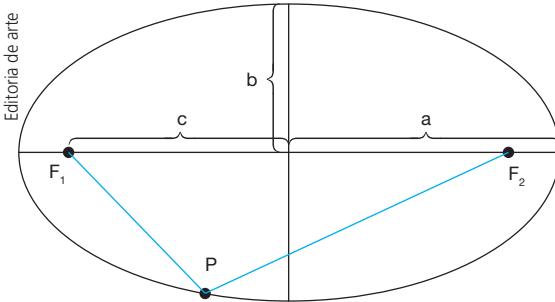


## Elipses

Professor, nesta seção exploramos uma situação próxima ao cotidiano do aluno, relacionada com o conteúdo trabalhado anteriormente e aprofundando-o com alguns detalhes.

A inclusão de órbitas elípticas na descrição do movimento dos planetas tornou o sistema heliocêntrico mais preciso na conciliação dos dados observacionais com a teoria, eliminando definitivamente a necessidade de deferentes e epiciclos.

Vamos entender um pouco mais essa figura geométrica? Primeiramente, vamos conhecer alguns de seus elementos:



$F_1$ : foco 1

$F_2$ : foco 2

$a$ : semieixo maior

$b$ : semieixo menor

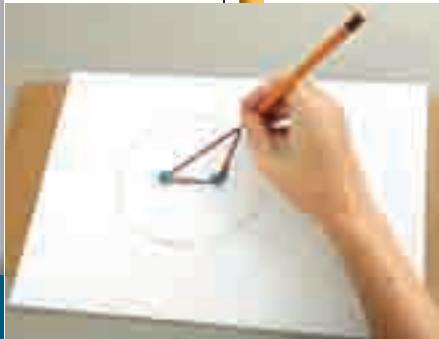
$c$ : distância focal

Essa figura geométrica é definida de maneira que a soma das distâncias entre qualquer ponto  $P$  da elipse e os focos seja constante e igual a  $2a$ .

Para construir uma elipse, arrume uma folha de sulfite, um pedaço de papelão (do mesmo tamanho da folha), um pedaço de barbante, duas tachinhas e uma caneta e proceda como indicado a seguir.

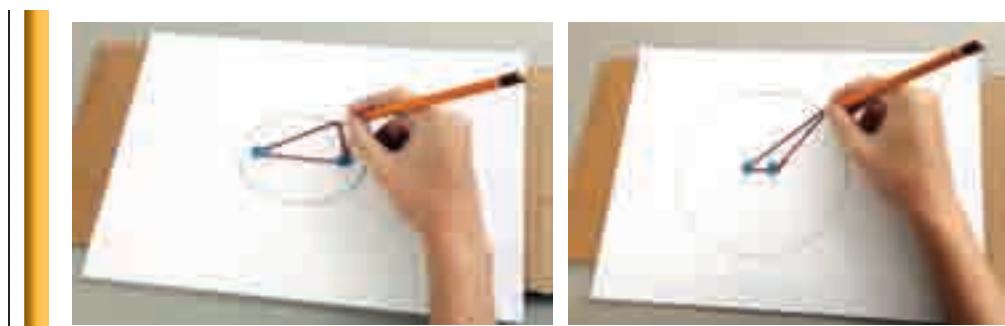
Apoie a folha de sulfite no papelão. Em seguida, fixe sobre eles as duas tachinhas separadas, por exemplo, por 5 centímetros, elas representam os focos da elipse. Corte um pedaço de barbante, não muito grande, com no máximo 16 centímetros de comprimento, e amarre suas pontas de maneira que forme um anel. Encaixe esse anel nas tachinhas e na caneta, como mostrado na foto ao lado. Isso garantirá que a soma das distâncias entre a caneta e as tachinhas se mantenha constante. Trace a sua elipse.

Vamos agora investigar o que acontece quando mudamos os elementos de uma elipse. Por exemplo, vamos diminuir a distância entre os focos (tachinhas) da elipse. Diminua primeiro essa distância para a metade e trace a nova elipse. O que acontece? Diminua ainda mais a distância entre os focos, deixando-os praticamente lado a lado e trace novamente a nova elipse.



4

O papelão sob a folha de papel servirá de suporte para fixar as tachinhas.



Fotos: Sérgio Dotta Jr/The Next

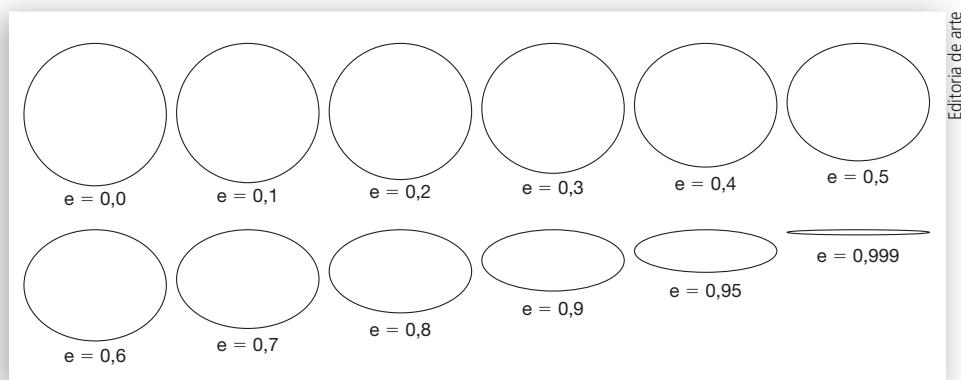
Você vai perceber que a primeira elipse tem uma excentricidade mais acentuada que a segunda. Pode observar também que a terceira elipse desenhada é muito parecida com uma circunferência, não sendo muito excêntrica. A propósito, **excentricidade** é o conceito geométrico que vamos discutir agora.

Ao produzir as três figuras geométricas, você pode constatar que à medida que os focos se aproximam, o formato da elipse muda, ficando cada vez mais parecido com uma circunferência. Essa variação no “achatamento” pode ser medida por meio da excentricidade:

$$e = \frac{c}{a}$$

A excentricidade é igual a zero quando  $c = 0$ , nesse caso, os focos se superpõem e temos somente um centro para a figura geométrica, característica da circunferência. Para valores maiores que zero, as elipses apresentam figuras cada vez mais “achatadas”, ditas excêntricas. Para o caso-limite, quando a distância focal tende ao infinito,  $c \rightarrow \infty$ , a figura geométrica formada é uma reta.

Veja, na figura a seguir, variações no formato de elipses de diferentes excentricidades.



Professor, é importante salientar para os alunos que os desenhos apresentados, neste e em outros livros, principalmente para ilustrar as leis de Kepler, têm elipses mais exageradas que as situações reais com o intuito de facilitar a visualização e a compreensão dos conceitos.

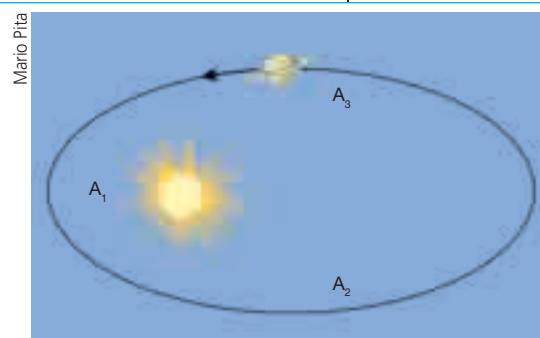
Confira no texto Alguns parâmetros físicos e orbitais dos planetas do Sistema Solar, que será apresentado neste capítulo, a tabela com a excentricidade dos planetas do Sistema Solar e compare-os com o desenho acima. Podemos perceber que os valores para a excentricidade orbital dos planetas são pouco acentuados, o que indica que a distância em relação ao Sol muda muito pouco durante o movimento de translação. Por isso, utiliza-se o valor da distância (raio) média  $r$  para calcular a distância dos planetas ao Sol. Veja a tabela novamente. A distância média é dada pelo semieixo maior da elipse  $r = a$ .

## 1.2 Segunda lei de Kepler ou lei das áreas

A velocidade dos planetas varia ao longo de sua órbita, de modo que a linha imaginária que une o planeta ao Sol cubra áreas iguais em intervalos de tempos iguais.

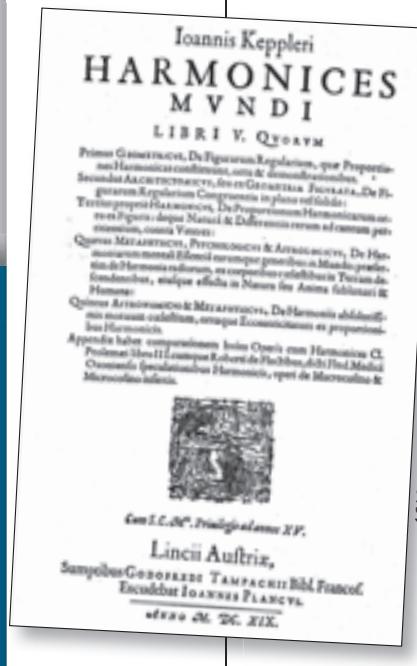
Algebraicamente, temos:

$$\frac{A_1}{\Delta t_1} = \frac{A_2}{\Delta t_2} = \frac{A_3}{\Delta t_3} = \text{constante} = k$$



Note que, nessa ilustração, as três áreas indicadas têm o mesmo tamanho, e o tempo para percorrê-las é o mesmo. Essa lei de Kepler indica que a velocidade do planeta muda ao longo de sua órbita. Pode-se chegar a

Trajetória elíptica descrita por um planeta em torno do Sol. Nos intervalos de tempo  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  e  $\Delta t_3$ , o planeta percorre determinados trechos em sua órbita que descrevem as áreas  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ , respectivamente.



1619. Coleção particular. Foto: The Granger Collection/Otherimages

essa conclusão analisando os arcos da elipse descritos pelo planeta, pois o planeta percorre distâncias diferentes em intervalos de tempo iguais. Ou seja, o movimento não é uniforme, a velocidade muda a cada instante. No periélio, posição da órbita mais próxima do Sol, o planeta se desloca mais rapidamente, com maior velocidade; no afélio, ponto da órbita mais distante do Sol, ao contrário, sua velocidade diminui. Veja na tabela a seguir alguns valores para a velocidade orbital da Terra em torno do Sol em diferentes pontos de sua órbita. Atente para os valores dessas velocidades, da ordem de 100 000 km/h, e para a pouca diferença relativa entre os valores máximos e mínimos, menos de 1%.

Valor da velocidade orbital da Terra em torno do Sol. No ponto de maior aproximação a velocidade é maior.

maior velocidade	108 137 km/h	30,03 km/s
velocidade média	107 229 km/h	29,78 km/s
menor velocidade	106 344 km/h	29,52 km/s

Fonte: <<http://sse.jpl.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Earth&Display= Facts & System=Metric>>. Acesso em: 22 jul. 2009.

### 1.3 Terceira lei de Kepler ou lei dos períodos

A razão entre o quadrado do período de translação do planeta e o cubo da sua distância média ao Sol é constante para todos os planetas.

Algebricamente:

$$\frac{T_{\text{Mercúrio}}^2}{r_{\text{Mercúrio}}^3} = \frac{T_{\text{Vênus}}^2}{r_{\text{Vênus}}^3} = \frac{T_{\text{Terra}}^2}{r_{\text{Terra}}^3} = \dots = \frac{T_{\text{Netuno}}^2}{r_{\text{Netuno}}^3} = \text{constante} = k$$

em que **T** é o período de translação (ou revolução) e **r** é o raio (distância) médio.

Dessa razão constante, vemos que, quanto mais distante um planeta estiver do Sol, maior será seu período de revolução e menor será sua velocidade orbital, conclusão essa obtida também pela segunda lei. Por outro lado, quanto mais perto do Sol o planeta estiver, menor será seu período de revolução. Isso explica, além da variação da velocidade de um planeta ao longo da órbita, o fato de os planetas mais distantes do Sol serem sempre mais lentos em relação aos mais próximos.

#### Comentário

A primeira e a segunda lei de Kepler determinam leis que servem para planetas específicos em suas órbitas específicas, pois cada planeta percorre uma órbita com características determinadas. No entanto, a terceira lei estabelece uma relação constante para todos os planetas, apontando uma regularidade nunca antes percebida em um sistema dinâmico. Kepler acreditava que a natureza exprimia regularidades matemáticas simples, e que era tarefa dos cientistas descobrir a harmonia matemática do céu.

#### Lembrete

Apesar de Kepler ter determinado suas leis com os dados de alguns planetas do Sistema Solar, elas não valem somente para eles. São leis de caráter universal e válidas para outros sistemas dinâmicos regidos pela força gravitacional, quando um dos corpos tem massa muito maior que a dos outros. É o caso, por exemplo, dos satélites naturais em torno dos planetas ou dos satélites artificiais em torno da Terra.

Professor, é importante promover uma discussão entre os alunos antes de apresentar a resposta ou a solução do exercício. Pode-se pedir que alguns alunos respondam à pergunta oralmente e que outros alunos a avaliem.

**1)** A área varrida pelo vetor posição da Terra em torno do Sol é de  $706,5 \cdot 10^{14} \text{ km}^2$  durante um ano. Determine a área varrida pelo vetor posição em um mês.

Como tais áreas são diretamente proporcionais aos tempos gastos durante a trajetória (segunda lei de Kepler), é só dividirmos a área dada por 12:

$$\frac{A}{12} = \frac{706,5 \cdot 10^{14}}{12} \Rightarrow A = 58,8 \cdot 10^{14} \text{ km}^2$$

**2)** A Terra demora 365 dias para completar uma volta em torno do Sol. Mercúrio fica 2,5 vezes mais próximo do Sol do que a Terra. Quantos dias terrestres dura o ano de Mercúrio?

A terceira lei de Kepler estabelece a relação entre a duração do ano (período de translação) dos planetas com os respectivos raios médios de suas órbitas.

$$\frac{T_T^2}{R_T^3} = \frac{T_M^2}{R_M^3} \Rightarrow T_M^2 = T_T^2 \frac{R_M^3}{R_T^3} \Rightarrow T_M^2 = 365^2 \frac{R^3}{(2,5R)^3}$$

$$T_M = 365 \sqrt{\frac{R^3}{15,625R^3}} = \frac{365}{3,95} = 92,33 \text{ dias}$$

Portanto, Mercúrio demora cerca de três meses terrestres para completar uma volta em torno do Sol.

**1)** O planeta Vênus varre uma área aproximada de  $36,6 \cdot 10^{12} \text{ km}^2$  durante seu ano de 224 dias terrestres. Em quanto tempo deve varrer uma área de  $1,89 \cdot 10^{12} \text{ km}^2$ ? **11,6 dias terrestres**

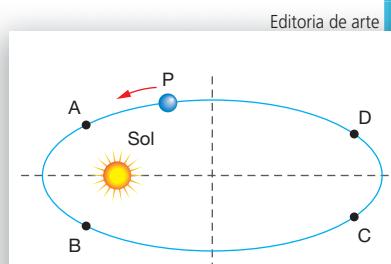
**2)** Marte está uma vez e meia mais afastado do Sol do que a Terra. Qual é, em anos terrestres, a duração de seu ano? **1,8 ano terrestre**

**3)** Um satélite de Saturno, localizado a  $2 \cdot 10^5 \text{ km}$  de seu centro, demora uma semana terrestre para contorná-lo. Outro satélite de Saturno demora oito semanas terrestres para efetuar o mesmo contorno. Determine a distância desse segundo satélite até o centro do planeta.  **$8 \cdot 10^5 \text{ km}$**

**4)** (UFBA) A figura mostra a órbita de um planeta (P) em torno do Sol.

Se os arcos AB e CD são percorridos em tempos iguais, em relação ao movimento do planeta, pode-se afirmar que:

- a) a velocidade linear aumenta no trecho BC.
- b) a velocidade linear diminui no trecho DA.
- c) possui maior velocidade média no trecho AB.
- d) possui velocidade de módulo constante.
- e) não há aceleração centrípeta.



Editoria de arte

## Exercícios resolvidos

## Exercícios propostos



## Alguns parâmetros físicos e orbitais dos planetas do Sistema Solar

Apresentamos na tabela a seguir alguns parâmetros físicos (período de rotação, raio, massa e aceleração) e orbitais (excentricidade, distância média e período de revolução) para os planetas que compõem o Sistema Solar.

## Ordem de grandeza



# 4

Planeta	Origem do nome na mitologia greco-romana	Excentricidade da órbita	Distância média do Sol ( $10^6$ km)	Período de revolução (em anos terrestres)	Período de rotação	Raio médio (km)	Massa (kg)	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )	Número de satélites naturais
1 Mercúrio	Mensageiro dos deuses	0,200	57,9	0,24 (88 dias terrestres)	58,6 dias terrestres	2 439	$3,30 \cdot 10^{23}$	3,7	0
2 Vênus	Deusa do amor e da beleza	0,007	108	0,62 (225 dias terrestres)	243 dias terrestres	6 052	$4,86 \cdot 10^{24}$	8,9	0
3 Terra	Deusa do solo fértil	0,017	150	1	23,94 h	6 378	$5,98 \cdot 10^{24}$	9,76	1
4 Marte	Deus da guerra	0,093	228	1,88	24,62 h	3 397	$6,42 \cdot 10^{23}$	3,7	2
5 Júpiter	Senhor dos deuses	0,048	778	11,86	9,93 h	71 492	$1,90 \cdot 10^{27}$	20,1	62
6 Saturno	Senhor do tempo	0,054	1 427	29,4	10,66 h	60 268	$5,68 \cdot 10^{26}$	10,4	61
7 Urano	Deus do céu	0,047	2 871	84,0	17,24 h	25 559	$8,69 \cdot 10^{25}$	8,43	27
8 Netuno	Deus do mar	0,009	4 499	164,8	16,11 h	24 764	$1,02 \cdot 10^{26}$	10,71	13

Fonte de pesquisa: <<http://solarsystem.nasa.gov/planets/index.cfm>>. Acesso em: 23 jul. 2009.

Créditos: ① Johns Hopkins University Applied Physics ② ⑥ ⑧ Photodisc/Getty Images ③ ④ Digital Vision/Getty Images ⑤ ESA/A. Simon-Miller (Goddard Space Flight Center), I. de Pater, M. Wong (UC Berkeley)/NASA ⑦ L. Sromovsky and P. Fry (University of Wisconsin), H. Hammel (Space Science Institute), and K. Rages (SETI Institute)/ESA/NASA

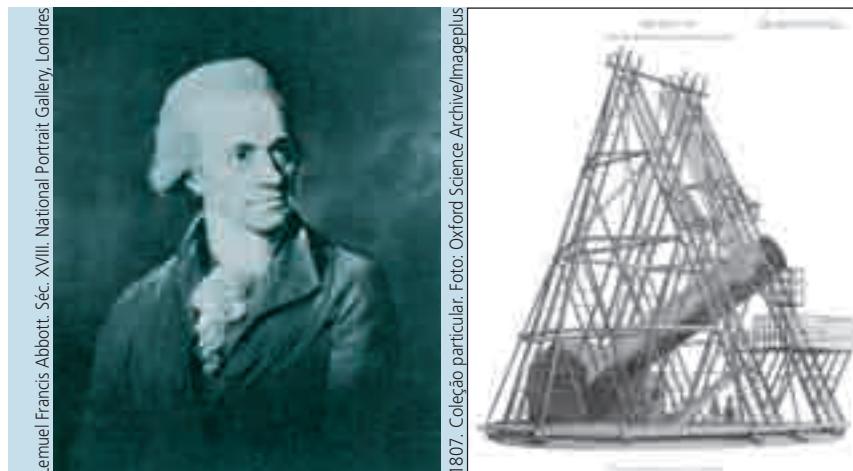
## A descoberta dos planetas Urano e Netuno

A ideia que costumeiramente temos do processo de uma descoberta científica muitas vezes vem de nosso imaginário e nem sempre é correta de acordo com a história da ciência. Acreditamos que o cientista, tendo em mãos instrumentos poderosos, aponta-os numa direção ou realiza algum procedimento e pronto: algo novo é descoberto! Será?

Os planetas Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno são visíveis sem ajuda de equipamentos, à vista desarmada, e por isso são conhecidos desde os tempos pré-históricos. Mas os planetas Urano e Netuno precisaram, além da evolução dos telescópios, de muito tempo de investigação e muita matemática para serem encontrados.

O músico e astrônomo alemão William Frederick Herschel (1738-1822) passou boa parte da vida observando os céus da Inglaterra com sua irmã Caroline. Ambos construíam seus instrumentos de observação e passavam as noites catalogando estrelas, cometas e nebulosas.

### Técnica e tecnologia



Telescópio construído por Herschel e sua irmã Caroline, com financiamento do rei da Inglaterra George III. Após a descoberta do planeta Urano, o cientista ganhou notoriedade e conseguiu financiamento para construir telescópios mais sofisticados. O mais famoso tem abertura de 1,2 m e comprimento de 12,19 m, o maior de sua época.

Certo dia, em 1781, Herschel observou no céu um novo objeto nebuloso e de brilho fraco. Após alguns dias seguidos de observação, percebeu que o astro se movia e acreditou ser um novo cometa. Divulgou sua descoberta, e outros astrônomos com equipamentos mais sofisticados puderam constatar que na verdade se tratava do sétimo planeta orbitando o nosso Sol. Ele foi batizado de Urano.

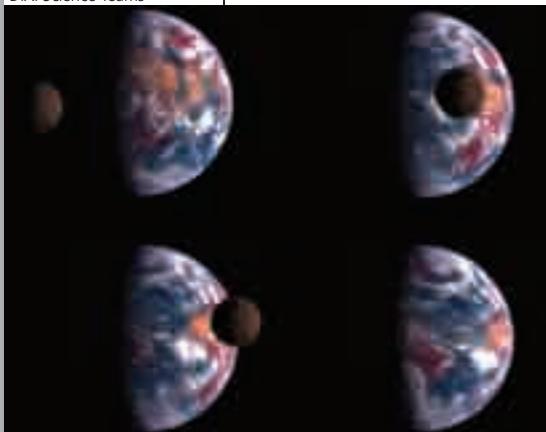
Vários astrônomos do fim do século XVIII e início do século XIX começaram a estudar o novo planeta e cerca de 50 anos depois da primeira observação foram notadas perturbações na órbita de Urano. Em alguns pontos de sua órbita, que tem um período equivalente a 84 anos terrestres, as posições observadas não concordavam com os dados calculados. Isso levou alguns deles a acreditar que as leis de Newton estavam erradas ou então que não eram válidas para astros muito distantes. Porém, outros desconfiaram que um oitavo planeta poderia ser o responsável pelos desvios na órbita de Urano. Apontar o telescópio para o céu e investigar cada pedacinho dele em busca de um minúsculo pontinho errante não era uma tarefa razoável, por isso, usando os dados obtidos nas observações celestes e a física newtoniana, astrônomos e matemáticos começaram sua caçada ao novo astro por meio da Matemática.

Só que, naquela época, tudo tinha de ser “feito à mão”, portanto a investigação era lenta e complexa. Depois de muito trabalho, dois cientistas, de maneira independente, puderam prever a massa e a posição aproximada do outro planeta. Foram eles o inglês John Adams e o francês Urbain Le Verrier. Em 1846, o astrônomo alemão Johann Galle apontou o telescópio do observatório de Berlim para o local do céu previsto pelos cálculos e lá estava o oitavo planeta, batizado de Netuno.

A descoberta de Netuno fortaleceu enormemente a teoria newtoniana da gravitação. Ela não só era capaz de explicar o que já se conhecia do Sistema Solar, mas podia prever o que ainda estava por ser observado.

Professor, retome a questão sobre a *anima motrix* de Johannes Kepler no Capítulo 10.

Donald J. Lindler/Sigma Space Corporation/GSFC/Univ. Maryland, EPOCH/DIXI Science Teams



A força gravitacional é a responsável por manter a Lua em órbita na Terra.

## 2. Newton e a consolidação do sistema heliocêntrico

Muito antes de Newton, pensadores já tinham proposto que seria necessária a existência de um “poder atrativo” no Sol para garantir a órbita dos planetas. Esse poder deveria existir, em menor escala, também na Terra, para garantir a órbita da Lua. Mas como seria esse “poder atrativo”?

Com base nas pesquisas de seus predecessores, Newton deu um grande salto qualitativo e conceitual no conhecimento da Física. Ele respondeu a essa questão propondo a ação de uma força atrativa agindo entre os corpos com massa. Essa força atrativa foi denominada força gravitacional ou lei da Gravitação Universal.

4



### Explorando o assunto

Professor, as respostas e outras orientações sobre a(s) questão(ões) do Explorando o assunto encontram-se no Caderno de orientações.

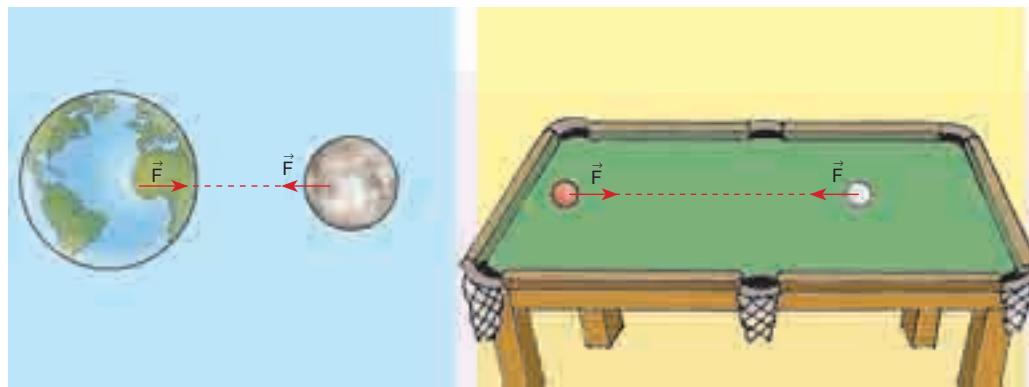
*“Se vi mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes.”*

Essa é uma das mais célebres frases de Isaac Newton, geralmente usada para ilustrar o desenvolvimento do conhecimento como um processo, sendo comumente citada no contexto das descobertas da mecânica newtoniana, sobretudo da Gravitação Universal, em que os gigantes são relacionados a Copérnico, Galileu e Kepler. Realmente, Newton reconheceu as contribuições desses seus predecessores, porém não com essas palavras!

A frase é citada originalmente em uma carta a Robert Hooke, cujo contexto era a óptica (estudo da luz). Os gigantes na verdade eram Descartes e o próprio Hooke.

Para você, a Ciência é fruto da interação das ideias e da pesquisa árdua de diversos cientistas ao longo da história ou é produto de poucas e raras mentes brilhantes que surgem de tempos em tempos?

Essa força não existe apenas entre planetas, estrelas e satélites. A atração gravitacional ocorre em todos os corpos que têm massa.



Ilustrações: Mário Pita

Há força gravitacional entre a Terra e a Lua e também entre as bolas de bilhar sobre a mesa. Apesar de não estar indicado, lembre-se de que, na segunda situação, existe ainda a força gravitacional entre as bolas e a Terra.

A intensidade da força gravitacional entre dois corpos depende, ao menos de uma constante, do valor de suas massas e da distância entre eles. Ou seja:

$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$

em que **M** é a massa de um corpo, **m** é a massa do outro corpo, **d** é a distância entre os corpos, medida a partir de seus centros, e **G** é uma constante universal que vale  $6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$

Segundo a lenda, Newton estava sentado sob uma macieira quando subitamente uma fruta caiu sobre sua cabeça. Ao olhar para cima, ele vislumbrou a Lua, por entre os galhos da árvore, e pensou que tanto a fruta quanto o astro são atraídos pela Terra por uma força de mesma natureza. Independentemente da veracidade do mito, o fato é que Newton forneceu uma explicação para um problema astronômico de 2 mil anos. Com a força de atração gravitacional, foi possível consolidar de vez a teoria heliocêntrica de Copérnico.

### Comentários

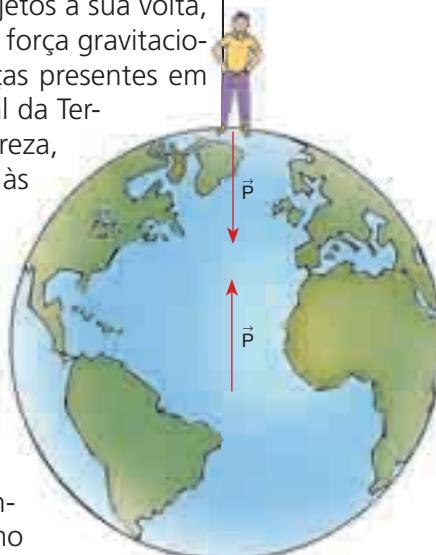
Podemos notar mais algumas características importantes da força gravitacional:

- Você não percebe, mas está sendo atraído por todos os objetos à sua volta, como mesas, cadeiras, paredes. Isso acontece porque, em geral, a força gravitacional é de intensidade pequena quando comparada às outras forças presentes em determinada situação. Em nosso cotidiano, a atração gravitacional da Terra é muito maior que qualquer força gravitacional de outra natureza, principalmente por ela ter uma grande massa (quando comparada às nossas) e estarmos sobre sua superfície.

- A atração gravitacional atua sempre nos dois corpos, com mesma intensidade, mesma direção e sentido oposto, respeitando assim a lei de ação e reação.

- Nada pode bloquear a ação da gravidade. Se você se tranca num quarto com piso, teto e paredes de chumbo, ainda assim será atraído pela Terra.

- A força gravitacional age mesmo em distâncias muito grandes. Mesmo as estrelas mais distantes estão nos atraindo. Mas como a intensidade da força diminui com o quadrado da distância, esse valor se torna muito pequeno.



A interação gravitacional atua sempre em par ação-reação.

## Explorando a situação



Ver Orientação 31.

Sérgio Dotta Jr/The Next

## Por dentro do conceito



4



Ver Orientação 32.

Fábio Colombini



Fábio Colombini

## Marés

A elevação e a descida do mar é um fenômeno bem conhecido de todos que já passaram algumas horas na praia. Muitas vezes, procuramos saber se a maré vai subir ou descer para nos instalarmos na praia. Em alguns portos, isso também é importante para os barcos zarparem. Os mais atentos podem perceber que a maré sobe duas vezes ao dia.

Até a época de Newton, a subida da maré era um fenômeno sem explicação. Galileu, por exemplo, desenvolveu uma teoria que explicava as marés pelo movimento de rotação e translação da Terra. Desde a Antiguidade, muitos sábios já observaram a relação entre as marés e a Lua. Um deles,

grego Seleuco (365-283 a.C.), que morava nas margens do Mar Vermelho, escreveu sobre a coincidência entre o período das marés e o período da Lua. No entanto, faltava, para esses sábios, uma teoria que explicasse a causa desse fenômeno.

Foi Newton quem mostrou que a atração da Lua era a principal responsável pela subida das águas (a atração do Sol também contribui para o fenômeno, porém em escala menor). Ele pôde inclusive prever os horários de subida das marés nas diversas localidades do mundo.

A atração da Lua faz a massa de água sobre a Terra se alongar em sua direção. Isso, apesar de não intuitivo, gera duas marés altas em porções opostas do globo.

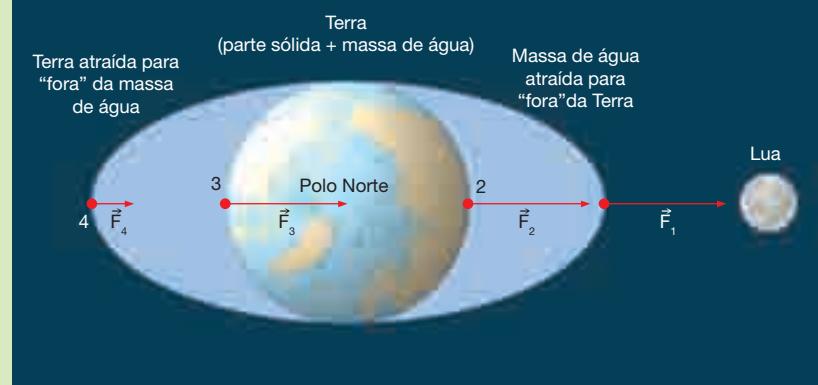
Como a atração gravitacional é proporcional ao inverso do quadrado da distância, os pontos da Terra mais próximos da Lua sofrem uma atração maior do que os pontos mais distantes. Assim, a força sobre a superfície da água no ponto 1 é mais forte que a força de atração no ponto 2, sobre a superfície do planeta. Essa diferença de força e o fato de a água ser um fluido justificam o fato de existir essa protuberância na face voltada para a Lua. Do lado oposto, temos que a força atrativa sobre o ponto 3 é maior que no ponto 4. Sendo a superfície da água menos atraída do que a superfície terrestre, temos também a formação de uma protuberância desse lado.

A cada dia existem duas marés altas. Note por exemplo que, por causa do movimento de rotação de nosso planeta, o ponto 3 passa duas vezes pelas protuberâncias de água ao longo de um dia.

Duas vezes por mês, nas chamadas fases de lua cheia e lua nova, os três astros em questão, Sol, Terra e Lua, se alinham e produzem marés mais intensas. Falar em marés mais intensas significa que, nessa época, as marés mais altas de um dia são as mais altas do mês. Essas marés recebem o nome de *marés vivas*. Nas situações de lua quarto crescente e quarto minguante, o efeito dos astros não é somado e as marés são menos intensas. Nesse caso, as marés mais altas de um dia são as menores do mês.

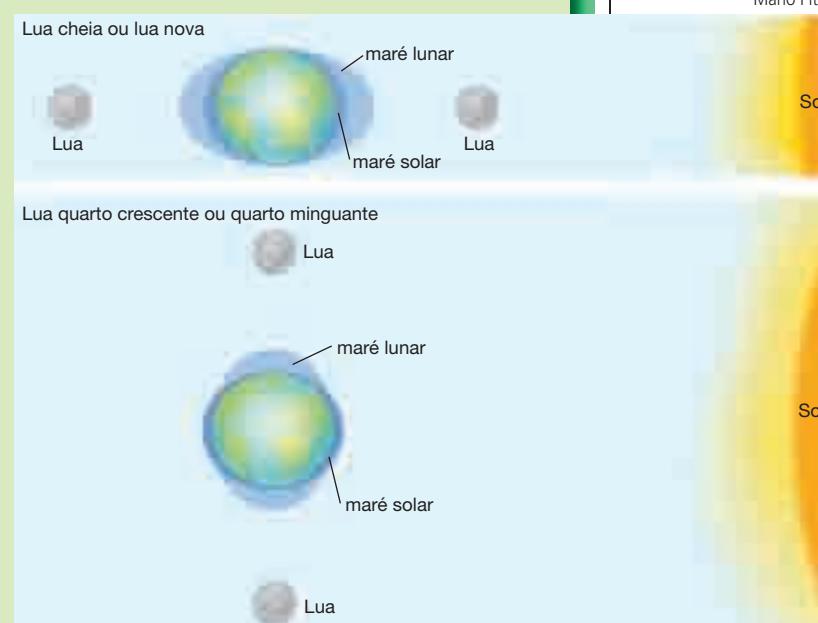
Para consultar os horários das marés nas praias próximas a sua cidade, consulte o site: <[www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm](http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm)>. Acesso em: 23 jul. 2009.

Editoria de arte



Nessa perspectiva exagerada, ilustramos a Terra vista a partir de seu Polo Norte, com a parte sólida e fluida (água) separadas.

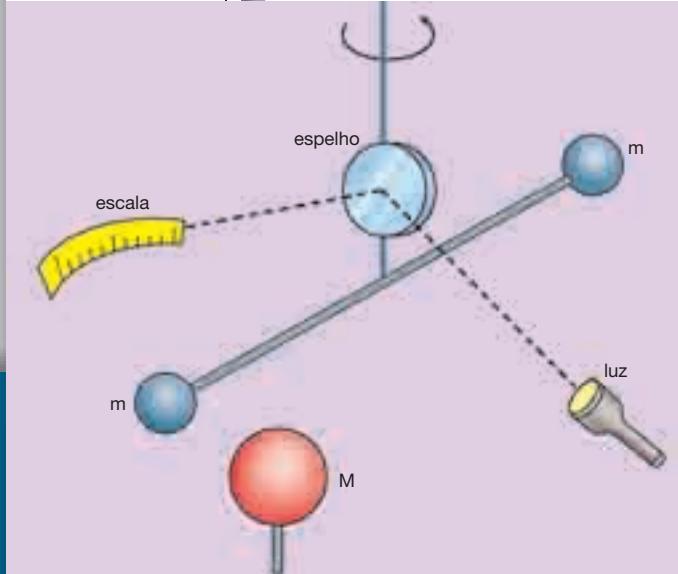
Mario Pita



## Técnica e tecnologia



Mario Pita



4

## Pesando a Terra e a constante gravitacional

A força gravitacional torna-se relevante quando os corpos envolvidos têm massas muito grandes, como as estrelas e os planetas. A atração gravitacional entre duas pessoas de massa 70 kg que estão a 1 metro de distância uma da outra é da ordem de  $0,0000003\text{ N}$  (ou  $3 \cdot 10^{-7}\text{ N}$ ). Esse valor é mais de 2 bilhões de vezes menor que o peso da mesma pessoa, na superfície da Terra, cerca de 700 N. É por isso que a força de atração entre os corpos em nosso cotidiano não é percebida.

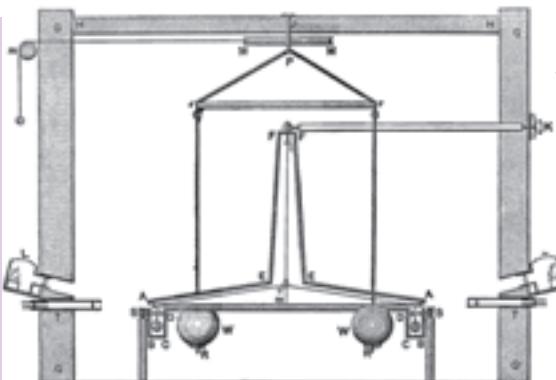
A primeira determinação experimental em laboratório da força gravitacional foi feita em 1798, pelo físico e químico britânico Henry Cavendish.

Por meio de suas medidas, foi possível determinar o valor da constante gravitacional **G** e melhorar a precisão no valor da massa da Terra, tanto que Cavendish chamou seu trabalho de *Experimentos para determinar a densidade da Terra*. Para realizar essas medidas, ele utilizou um arranjo experimental que constava basicamente de uma balança de torção.



Henry Cavendish (1731-1810).

Em Experiments to determine the Density of the Earth. 1798.  
Coleção particular



À esquerda, um esquema ilustrativo e simplificado do experimento de Cavendish com uma balança de torção. À direita, uma gravura do trabalho original de Cavendish que mostra a seção vertical do aparato. Para garantir que não ocorressem efeitos secundários, o cientista isolou todo o instrumento e realizava as observações de fora do prédio por meio de uma luneta.

Em cada extremidade de uma haste rígida de madeira, foi colocada uma esfera de chumbo de 5,08 cm (2 polegadas) de diâmetro e 0,730 kg (1,61 libra) de massa. Essa haste foi suspensa por um fio, onde também é fixado um espelho que reflete um feixe de luz sobre uma escala. Duas esferas bem maiores, também de chumbo e com diâmetros de 30,48 cm (12 polegadas) e 157,6 kg (348 libras) de massa, são colocadas a 22,86 cm (9 polegadas) das esferas menores. Nesse experimento, foi possível medir a ínfima força gravitacional entre as esferas porque a ação da força das esferas torceu o sistema, que por sua vez moveu o espelho e fez o feixe luminoso se deslocar ao longo da escala. Isso possibilitou a determinação da força exercida no sistema.

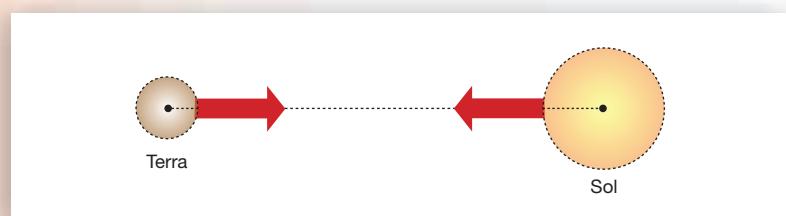
Para resolver as próximas séries de exercícios, sempre que necessário, utilize:

$$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2; M_{\text{Sol}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg};$$

$$M_{\text{Terra}} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}; M_{\text{Lua}} = 7,3 \cdot 10^{22} \text{ kg};$$

$$d_{\text{Sol-Terra}} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}; d_{\text{Terra-Lua}} = 3,8 \cdot 10^8 \text{ m} \text{ e } R_{\text{Terra}} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}.$$

- 1)** Determine a intensidade da força com que o Sol atrai a Terra e da força com que a Terra atrai o Sol.



Como as forças em questão constituem um par ação-reação, suas intensidades são iguais:

$$F_{\text{Sol-Terra}} = F_{\text{Terra-Sol}} = \frac{GM_{\text{Sol}}m_{\text{Terra}}}{d^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{(1,5 \cdot 10^{11})^2} = 3,6 \cdot 10^{22} \text{ N}$$

- 2)** Na superfície da Terra, um corpo apresenta peso  $P$ . Qual seria, em função de  $P$ , o peso desse corpo se fosse levado para um planeta cuja massa é quatro vezes maior do que a da Terra e cujo raio superficial é a metade do terrestre?

Na superfície da Terra, o peso do corpo é dado pela lei da Gravitação Universal:

$$P = \frac{GMm}{R^2}$$

em que  $M$  é a massa da Terra,  $m$  a massa do corpo e  $R$  o raio superficial da Terra. No suposto planeta, o peso seria dado por:

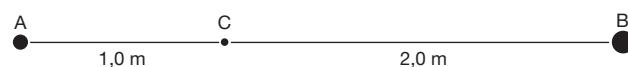
$$P' = \frac{GM'm}{R'^2}$$

em que  $M' = 4M$  e  $R' = \frac{R}{2}$ . Substituindo essas relações na expressão de  $P'$ , temos:

$$P' = \frac{G \cdot 4M \cdot m}{\left(\frac{R}{2}\right)^2} = 4 \frac{GMm}{\frac{R^2}{4}} = 16 \frac{GMm}{R^2} = 16P$$

Portanto, o peso do corpo aumentaria 16 vezes.

- 3)** Determine a intensidade e o sentido da força resultante sobre o corpo C, de massa  $m_C = 1,0 \text{ kg}$ , da figura a seguir. As massas dos outros corpos são  $m_A = 4,0 \text{ kg}$  e  $m_B = 6,0 \text{ kg}$ .



As forças entre os corpos A e C e entre B e C são as seguintes:

$$F_{AC} = \frac{Gm_A m_C}{d^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 4 \cdot 1}{1^2} = 26,8 \cdot 10^{-11} \text{ N}$$

$$F_{BC} = \frac{Gm_B m_C}{d^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 1 \cdot 6}{2^2} = 10,5 \cdot 10^{-11} \text{ N}$$

Como as forças  $\vec{F}_{AC}$  e  $\vec{F}_{BC}$  que atuam sobre o corpo C possuem sentidos opostos, a resultante é dada pela diferença das intensidades dessas forças:

$$F_R = 16,3 \cdot 10^{-11} = 1,63 \cdot 10^{-10} \text{ N} \text{ (horizontal, para a esquerda)}$$

## Exercícios resolvidos

## Exercícios propostos

é fácil

1) Calcule a força de atração gravitacional entre duas laranjas que estão encostadas, uma na outra, dentro de uma cesta. A massa de uma laranja é de aproximadamente 30 g e seu raio é de 5 cm.  $6,0 \cdot 10^{-12}$  N

2) Com que intensidade a Terra atrai a Lua?  $2,0 \cdot 10^{20}$  N

3) No esquema a seguir, as massas dos corpos A, B e C são, respectivamente,  $m_A = 2,0$  kg,  $m_B = 9,0$  kg e  $m_C = 2,0$  kg. As distâncias entre os pontos em que estão os corpos são  $AC = 2,0$  m e  $CB = 1,0$  m. Determine a intensidade e o sentido da força resultante sobre o corpo A.  $2,0 \cdot 10^{-10}$  N (horizontal para a direita)



4) A distância entre dois corpos de massas iguais é de 20 m. Onde deverá ser colocado um terceiro corpo que permaneça em equilíbrio por causa das ações exclusivas dos dois corpos citados?

*Na metade do segmento de reta que une os dois primeiros corpos, ou seja, a 10 m de cada.*

5) Um corpo A tem massa  $m_A = 2,0$  kg e está a 5,0 m de um corpo B de massa  $m_B = 8,0$  kg. Ambos estão fixos. Determine a que distância de A, sobre a reta que liga A a B, deve ser colocado um terceiro corpo C para que este permaneça em equilíbrio por causa das ações exclusivas de A e B. (Sugestão:  $F_{AC} = F_{BC}$ .)  $1,67$  m

6) Por que a lei da Gravitação é chamada Universal? [Resposta no final do livro.](#)

## 3. Satélites naturais e artificiais

Photodisc/Getty Images



4

A Lua é o nosso satélite natural. Além dela, existem inúmeros satélites artificiais que orbitam nosso planeta e foram colocados lá por foguetes ou ônibus espaciais.

Mas o que faz que um corpo fique orbitando um planeta?

Essa pergunta é importante não apenas para entender o movimento dos satélites, mas também para calcular o lançamento desses objetos, que deve ser muito preciso para que eles não saiam da órbita da Terra.

Podemos questionar também como é garantido o movimento do satélite, já que ele não possui um motor como os aviões, por exemplo.

A velocidade orbital que cada satélite atinge determina a sua órbita (e define se ele entrará em órbita). Podemos calcular essa velocidade usando os conceitos de força gravitacional e de força centrípeta.

Vimos que a força gravitacional aplicada pela Terra no satélite é:

$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$

em que, nesse caso específico, **M** é a massa da Terra, **m** é a massa do satélite e **d** é a distância do satélite ao centro do planeta.

Como essa força sempre aponta para o centro da órbita do satélite, trata-se de uma força centrípeta, ou seja,  $F_g = F_{cp}$ . Nesse caso, vale lembrar que:

$$F_{cp} = ma_{cp} = m \frac{v^2}{r}$$

em que **m** é a massa do satélite, **v** é a velocidade do satélite, que chamaremos velocidade orbital, e **r** é o raio da trajetória circular, que chamaremos raio orbital.

Observe que a distância **d** entre o satélite e o planeta é igual ao raio orbital **r**. Então, temos que:

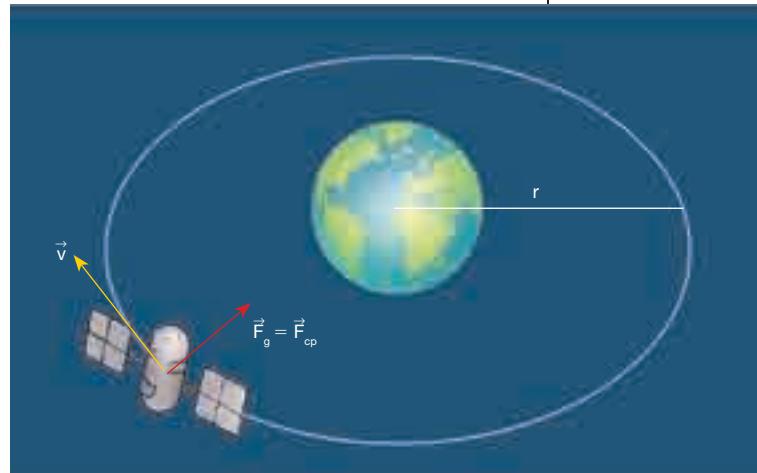
$$F_g = F_{cp}$$

$$\frac{GMm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{GM}{r} = v^2$$

Portanto:

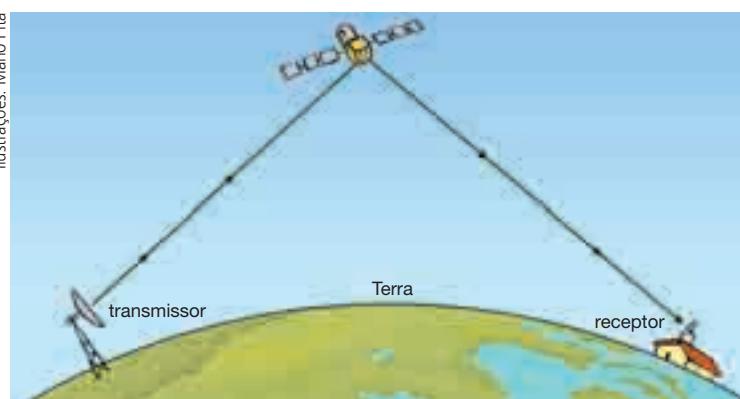
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



Essa expressão indica uma relação entre a velocidade **v** e o raio da órbita **r** do satélite. A princípio, qualquer corpo lançado da Terra pode entrar em órbita, sendo necessário apenas que a expressão acima seja respeitada.

As comunicações telefônicas e de televisão valem-se hoje do uso desse recurso. Uma antena no solo é responsável por enviar sinais na forma de ondas eletromagnéticas que são recebidas e reemitidas pelos satélites. Esses satélites encontram-se em órbitas chamadas **geoestacionárias**, pois completam uma volta em torno da Terra no período de 24 horas. Dessa maneira, eles não apresentam movimento em relação a um ponto na superfície da Terra.

Ilustrações: Mario Pita



Photodisc/Getty Images



Photodisc/Getty Images



CBERS/NPE



Para captar e enviar informações, esses satélites devem permanecer parados em relação à superfície terrestre, por isso sua velocidade angular deve ser igual à da Terra, fazendo que eles acompanhem o giro do planeta.

## Exercícios propostos



Dissemos que a velocidade orbital do satélite determina a sua órbita. Podemos analisar essa relação com base na equação anterior, em que está explícita a relação entre a velocidade  $v$  e o raio orbital  $r$ . Para sabermos a altura do satélite com relação à superfície da Terra, temos de descontar os 6 400 km do raio terrestre. Dessa expressão, podemos notar que, quanto maior a altitude do satélite, menor a sua velocidade orbital. Apresentamos, a seguir, alguns valores que mostram a variação da altura com a velocidade orbital e o respectivo período.

<b><math>h</math> (km)</b>	<b><math>v</math> (km/h)</b>	<b>Período</b>
1	28547	1h24min30s
100	28238	1h26min
300	27813	1h30min
35 786	11 069	23h56min4s
380 000	3 650	654 h ≈ 27,5 dias

Dados calculados supondo a existência de satélites a determinadas alturas a partir do solo.

Da tabela ao lado, os dois primeiros valores não representam nenhum satélite real, pois a baixa altitude causaria problemas em sua trajetória, afinal a 1 km de altitude teríamos montanhas e a 100 km a atmosfera causaria grande atrito. Os satélites de monitoramento são colocados, em geral, em órbitas com 300 a 600 km de altura. Entre 300 e 400 km, encontra-se a estação espacial internacional, a 35 786 km estão os satélites geostacionários, com período igual à Terra, e a 380 000 km de distância encontra-se a Lua.

## Exercícios resolvidos

- 1) Determine a velocidade com que a Lua gira ao redor da Terra.

Podemos considerar que o centro de giro é o centro da Terra e, sendo ela a agente da força centrípeta sobre a Lua, temos que:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 6,0 \cdot 10^{24}}{3,8 \cdot 10^8}} = \sqrt{10,6 \cdot 10^5} = 10 \cdot 10^3 \text{ m/s} = 10\,000 \text{ m/s}$$

- 2) Considere um satélite em órbita estável ao redor da Terra com uma velocidade  $v$  e uma distância  $R$  de seu centro. Determine, em função de  $v$ , a velocidade com que esse satélite orbitaria ao redor de outro planeta de massa oito vezes maior que a da Terra e a uma distância  $2R$  do centro dele.

A velocidade orbital do satélite ao redor da Terra é dada por:  $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ .

Ao redor do outro planeta, sua velocidade orbital será dada por:  $v' = \sqrt{\frac{GM'}{R'}}$ .

Sendo  $M' = 8M$  e  $R' = 2R$ , podemos substituir esses valores na primeira expressão:

$$v' = \sqrt{\frac{GM'}{R'}} = \sqrt{\frac{G \cdot 8M}{2R}} = \sqrt{\frac{4GM}{R}} = 2\sqrt{\frac{GM}{R}} = 2v$$

Portanto, sua velocidade será duas vezes maior.

- 1) Determine a velocidade com que a Terra gira ao redor do Sol.  $3,0 \cdot 10^4 \text{ m/s}$

- 2) Se Netuno está 30 vezes mais distante do Sol do que a Terra, qual é sua velocidade orbital ao redor do Sol? (Sugestão: use a velocidade encontrada no exercício anterior.)  $5,5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$

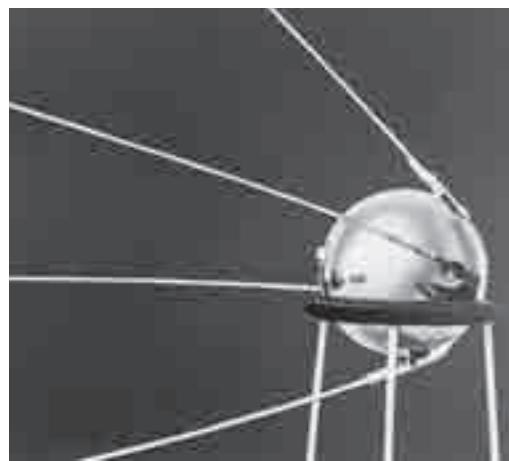
- 3) Uma estação espacial orbita, de maneira estável, a uma distância  $d$  do centro da Terra, com velocidade  $v$ . Determine, em função de  $v$ , a velocidade com que ela deve orbitar a uma distância  $3d$  do centro de outro planeta de massa 12 vezes maior do que a da Terra.  $2v$

## Um pouco da história da Astronáutica

A ex-União Soviética foi a pioneira nas pesquisas espaciais, lançando o primeiro satélite artificial, chamado *Sputnik I*, em 4 de outubro de 1957. Tratava-se de uma esfera de aproximadamente 58 cm de diâmetro e 83 kg, cuja função era emitir um sinal de rádio que poderia ser captado até por radioamadores na superfície terrestre. O sinal foi emitido por 22 dias, quando se esgotaram as baterias e o satélite orbitou o planeta ainda por mais cinco meses antes de cair. No mesmo ano, a Rússia enviou ao espaço a sonda *Sputnik II*, contendo o primeiro ser vivo a deixar a Terra, a cadela de nome Kudriavka, da raça laika, que morreu durante a missão. A era das sondas espaciais teve início logo na sequência, em 1959, com o lançamento russo da *Luna 1*, que passou a 6 000 km da Lua.

A primeira viagem tripulada também foi lançada pela antiga União Soviética, que, em 1961, enviou o astronauta Iuri Gagarin ao espaço. A bordo da cápsula espacial *Vostok I*, o primeiro homem no espaço completou uma volta ao redor da Terra em apenas 48 minutos.

Apesar da hegemonia soviética, os Estados Unidos também investiram muita pesquisa e dinheiro na corrida espacial, tanto que, em resposta ao lançamento do *Sputnik I*, os norte-americanos lançaram, quatro meses depois, em 31 de janeiro de 1958 seu primeiro satélite, o *Explorer I*, e a partir de 1964 lançaram as primeiras sondas com o objetivo de investigar os planetas Mercúrio, Vênus e Marte: as *Mariner 1* e *2*.



Sputnik I.

Bettmann/Corbis/Latinstock

## Técnica e tecnologia



RIA Novosti/TopFoto/Keystone



NASA/JPL/USP/Latinstock

A *Mariner 1* foi acidentalmente destruída antes de completar seus objetivos, e a *Mariner 2* conseguiu dados sobre a atmosfera de Vênus.

Iuri Gagarin foi quem pronunciou a célebre frase: "A Terra é azul".



Photodisc/Getty Images

Neil Armstrong também disse uma frase que ficou marcada na história: "Este é um pequeno passo para um homem, mas um enorme salto para a humanidade".



Spacephotos/Keystone

Nesse disco de ouro, colocado na *Voyager 1*, estão gravadas informações sobre a Terra, com 115 imagens, 35 sons naturais e 55 saudações em línguas diferentes.

4



NASA

Marcos César Pontes.

No dia 20 de julho de 1969, aconteceu um dos momentos mais marcantes na história da humanidade: o módulo lunar *Eagle*, após se separar do módulo de comando *Columbia*, pousou na superfície de nosso satélite natural, permitindo que o primeiro homem pisasse na Lua. Essa missão recebeu o nome de Apolo 11 e foi comandada pelos astronautas norte-americanos Neil Armstrong, Edwin Aldrin e Michael Collins.

Em 1973 e 1977, são lançadas, respectivamente, as sondas norte-americanas *Pioneer 1* e *2*, que investigaram Júpiter e Saturno, e as *Voyager 1* e *2*, que conseguiram dados importantes de Urano e Netuno e hoje se encontram nos confins do Sistema Solar. Essas sondas são os primeiros objetos construídos pelo homem a vagarem pelo espaço carregando informações sobre o nosso planeta, como músicas, mensagens e imagens da Terra, na esperança de encontrar outra civilização inteligente pelo espaço interestelar.

Depois de 25 anos de o primeiro homem vislumbrar a Terra do espaço, os russos constroem a primeira estação espacial permanente. Batizada de MIR, foi lançada em 1986 e ficou no espaço até 2001. Sua sucessora é a Estação Espacial Internacional, ISS (sigla em inglês para International Space Station), cuja construção teve início em 1998, a partir de um consórcio entre 15 países: Estados Unidos, Rússia, Canadá, Japão, Bélgica, Dinamarca, França, Alemanha, Itália, Holanda, Noruega, Espanha, Suécia, Suíça e Inglaterra.



STS-117 Shuttle Crew/NASA

Estação Espacial Internacional em sua versão mais atual.

Atualmente nosso país também faz parte desse consórcio. Em 2006, Marcos César Pontes, o primeiro astronauta brasileiro, viajou para além das fronteiras do nosso planeta azul e permaneceu dez dias a bordo da ISS.

## 4. Campo gravitacional e aceleração da gravidade

Uma característica importante da força gravitacional é o fato de ela ter ação a distância, ou seja, não é necessário o contato entre os corpos para que aconteça a interação.

Mas, se não há contato, como é mediada a interação entre os corpos?

Nesse caso, a interação é mediada pelo que chamamos **campo gravitacional**. Da interação da Lua com o campo gravitacional da Terra manifesta-se a força gravitacional; da mesma maneira, a Terra interage com o campo gravitacional da Lua e, por isso, sofre a ação da mesma força. Qualquer massa é fonte de um campo gravitacional ao seu redor.

Nos capítulos anteriores, vimos que a força peso, uma força de natureza gravitacional, foi apresentada como:

$$P = mg$$

Neste capítulo, entretanto, aprendemos que essa força também pode ser calculada como resultado da atração entre quaisquer dois corpos:

$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$

Se igualarmos as duas forças,  $F_g = P$ , teremos que:

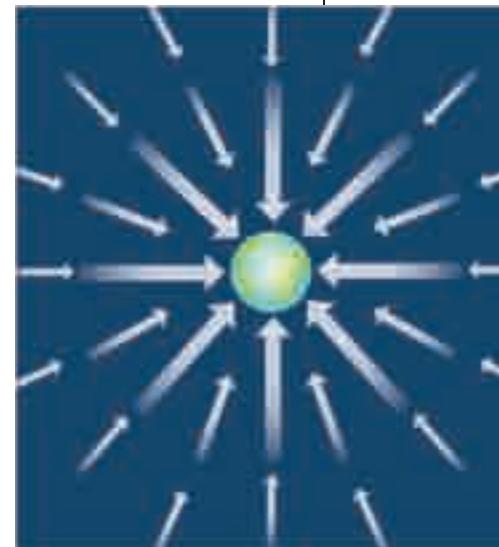
$$\frac{GMm}{d^2} = mg$$

$$g = \frac{GM}{d^2}$$

Assim definimos o campo gravitacional  $\vec{g}$  como um vetor que aponta para o centro do planeta e cuja intensidade diminui com o quadrado da distância. Fisicamente falando,  $\vec{g}$  indica a maneira como um corpo é atraído pela Terra.

Para compreender a variação do campo gravitacional com a distância, imagine o “campo de perfume” de uma flor. Quanto mais próximo estivermos dela, mais forte será seu perfume, e, quanto mais distante, mais fraco ficará. Próximo da superfície da Terra, o campo gravitacional é de 9,8 N/kg, a 2 500 km da superfície é de 5,06 N/kg, e a 10 000 km decresce para 1,49 N/kg. Isso significa dizer que um corpo com massa de 1 kg sobre a superfície da Terra sofre uma força de atração com intensidade de quase 10 N, já a uma distância de 10 000 km a intensidade dessa força cai para quase 1,5 N.

Para finalizar, é muito importante saber que, embora expressos pelo mesmo símbolo, a letra **g**, o campo gravitacional e a aceleração da gravidade são conceitos diferentes. O campo gravitacional é uma característica da Terra: sua propriedade de atrair outros corpos. A aceleração da gravidade, por sua vez, informa o efeito dessa atração nos corpos na sua vizinhança, ou seja, o fato de, quando em queda livre, a velocidade do corpo variar 10 m/s a cada segundo. Portanto, um corpo nas proximidades da superfície terrestre sempre estará submetido ao campo gravitacional do planeta, mas só terá aceleração da gravidade em situações de queda livre.



Mario Pita

## Por dentro do conceito



Bettmann/Corbis/Latinstock



## Gravitação de Einstein

Na teoria da Relatividade Geral, Albert Einstein (1879-1955) propõe uma explicação para a gravitação diferente da ideia de atração mútua dos corpos elaborada por Newton. Para compreender sua nova proposição, precisamos, inicialmente, entender a concepção de espaço e de tempo na relatividade.

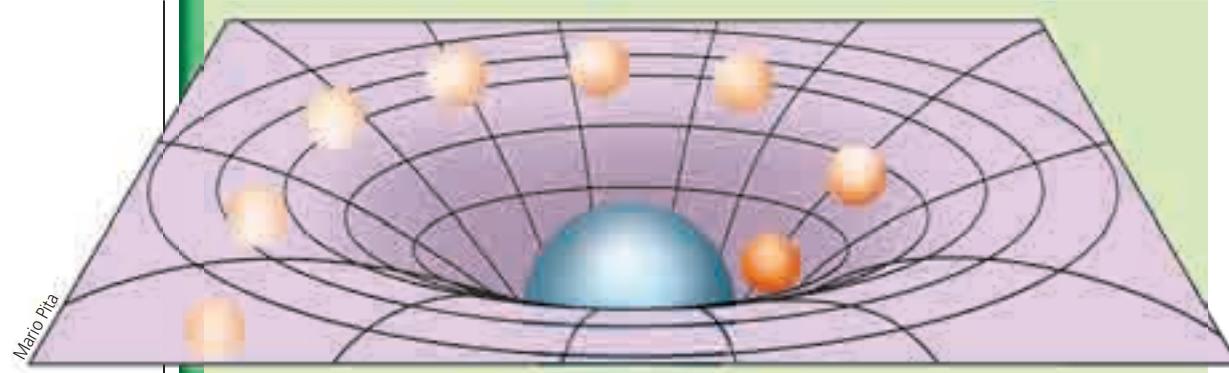
Em capítulos anteriores, você aprendeu que o espaço é uma grandeza tridimensional (a localização de qualquer ponto no espaço depende das coordenadas de altura, largura e profundidade) e o tempo uma grandeza unidimensional. Essas duas grandes eram usadas de forma independente até que Hermann Minkowski, um dos professores de Matemática de Einstein no Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, propôs que as três dimensões do espaço estivessem unidas com o tempo, formando um todo quadridimensional, denominado espaço-tempo.

Agora vamos entender a gravitação de Einstein por meio de uma analogia, em que uma cama elástica representará o espaço-tempo, uma bola de boliche, o Sol e uma bolinha de gude, a Terra.

O que acontecerá se uma bolinha de gude rolar sobre uma cama elástica bem esticada? Ele descreverá um caminho retilíneo sem alterar a superfície. E se a bolinha for substituída por uma bola de boliche? A superfície será curvada pela presença do corpo maciço. O que será observado se, em seguida, colocarmos a bolinha de gude novamente em movimento sobre essa superfície de borracha? Ela vai rolar em direção à região curva e descreverá uma trajetória circular ao redor da bola de boliche.

Hermann Minkowski (1864-1909).

4



Para os fenômenos de nosso cotidiano, é mais conveniente utilizar a teoria newtoniana; já para corpos muito maciços, como estrelas e buracos negros, a teoria de Einstein é mais adequada.

## Vida de astronauta

Quem nunca imaginou como deve ser maravilhosa a sensação de “flutuar” em um ambiente sem gravidade ou de imponderabilidade? Isso por algum tempo pode ser muito divertido, mas, para os astronautas, que passam longos períodos no espaço, existem sérios problemas.

Como nosso corpo reage a essas condições extremas?

Em um ambiente sem gravidade, ou de imponderabilidade, nosso organismo fica sujeito a vários danos:

- Por causa da falta de atividade física, os músculos começam a atrofiar e há perda de densidade óssea, tornando os ossos mais suscetíveis a fraturas. A diminuição da calcificação se deve à falta de pressão nas extremidades dos ossos.
- O senso de equilíbrio é comprometido, por causa da falta de uma posição estável, causando náuseas e desorientação.
- A pressão sanguínea é alterada. Na Terra, a pressão arterial é maior no pé do que na cabeça; já no espaço, o sangue é redistribuído pelo organismo, fazendo que a pressão seja a mesma ao longo de todo o corpo. Isso causa dor de cabeça e inchaço na parte superior do corpo.
- Ocorre a anemia espacial. A mudança de pressão arterial também causa maior produção de urina. Assim, os rins acabam eliminando uma quantidade maior de hormônios responsáveis pelo estímulo da produção de glóbulos vermelhos.

Por esses motivos, é indicado que o tempo máximo de permanência no espaço seja de seis meses, já que um tempo maior que esse pode causar danos irreversíveis. O recorde de permanência ininterrupta no espaço é do astronauta russo Valeri Poliakov, que ficou 437 dias a bordo da estação espacial MIR. Se levarmos em conta o tempo no espaço em diferentes missões, o recorde é do também russo Sergei Krikalyov, que atualmente tem mais de 803 dias contabilizados em seis missões entre a MIR e a ISS. Quando voltam para a Terra, os astronautas são submetidos a uma série de exames para avaliar o estado de saúde físico e mental.



## Técnica e tecnologia





## Exercícios resolvidos

Para os próximos exercícios, considere os dados a seguir:  
 $M_{Lua} = 7,4 \cdot 10^{22} \text{ kg}$  e  $R_{Lua} = 1,7 \cdot 10^6 \text{ m}$ , além dos outros indicados anteriormente.

- 1) Qual a intensidade do campo gravitacional na superfície da Lua?  
Usando a expressão do campo gravitacional, temos:

$$g = \frac{GM}{R^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 7,4 \cdot 10^{22}}{(1,7 \cdot 10^6)^2} = 17,15 \cdot 10^{-1} = 1,7 \text{ m/s}^2$$

- 2) Na superfície da Terra, a aceleração da gravidade vale cerca de  $10 \text{ m/s}^2$ . Qual o valor da aceleração da gravidade na superfície de Marte, cuja massa é dez vezes menor que a da Terra e cujo raio é a metade do terrestre?

Na superfície da Terra, temos:

$$g = \frac{GM}{R^2} = 10 \text{ m/s}^2$$

Na superfície de Marte, teremos:

$$g = \frac{GM'}{R'^2} = \frac{G \cdot \frac{M}{10}}{\left(\frac{R}{2}\right)^2} = \frac{4}{10} \cdot \frac{GM}{R^2} = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ m/s}^2$$

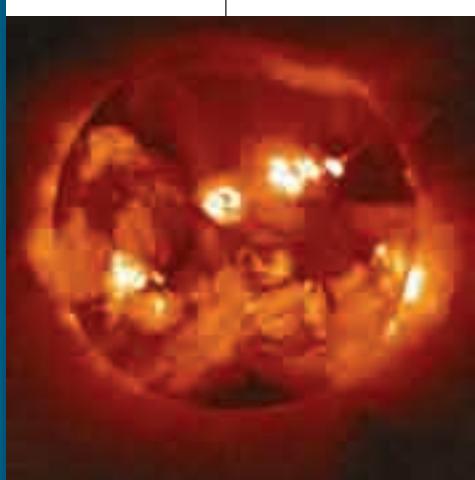


## Exercícios propostos

- 1) Calcule o campo gravitacional da Terra à altitude de 13 600 km. **1,0 N/kg**
- 2) Calcule o campo gravitacional na superfície de um planeta de massa oito vezes maior que a da Terra e raio superficial quatro vezes o terrestre. **5,0 N/kg**
- 3) Suponha que toda a massa da Terra fosse compactada num raio duas vezes menor do que o atual. Como variaria o campo gravitacional terrestre?  
*Seria quatro vezes mais intenso.*

## 5. A vida das estrelas

4



PhotoDisc/Getty Images

Acabamos de estudar a força de atração gravitacional. É por causa dela que o Sistema Solar mantém a sua organização há alguns bilhões de anos. No centro encontramos o Sol, com oito planetas realizando órbitas a seu redor.\*

Diante de tanta beleza, podemos nos perguntar se o Sol sempre esteve no céu? Ou ainda se ele continuará a brilhar para sempre?

No Capítulo 1, falamos sobre a origem do Universo e sobre o evento que ficou conhecido como *Big Bang*. De acordo com essa teoria, toda matéria que existe hoje, prótons, elétrons e nêutrons, foi formada durante o primeiro segundo de vida do Universo. Da ligação entre prótons e nêutrons, formaram-se os núcleos dos átomos de hidrogênio e hélio nos três

\* Quando um, dois ou mais corpos formam um sistema gravitacionalmente fechado de forma que possam descrever órbitas, estas são realizadas em torno do centro de massa do sistema. No caso de nosso sistema planetário, como mais de 99% de toda a massa do sistema se encontra no Sol, o centro de massa está localizado em seu interior.

minutos após o início da expansão. A formação dos átomos propriamente dita, pela ligação do elétron ao núcleo atômico, ocorreu por volta dos 300 mil anos de idade do Universo. À medida que o Universo foi esfriando, formaram-se imensas nuvens de gás compostas basicamente de hidrogênio, o elemento mais simples. Estima-se que esse estágio, a formação de estrelas e galáxias, ocorreu após 1 bilhão de anos.

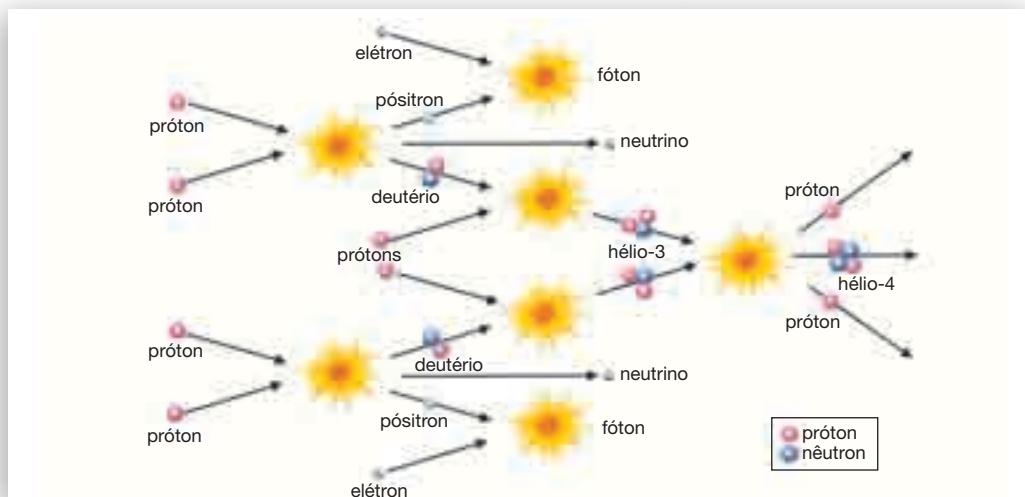
A formação das estrelas se deu a partir das nuvens moleculares de hidrogênio ( $H_2$ ). Como essas nuvens são mais densas em alguns pontos e mais rarefeitas em outros, pela força gravitacional, partes das nuvens começaram a se contrair, formando então as estrelas.

Nascimento de uma estrela (também chamada protoestrela).



Ilustrações: Luís Moura

À medida que essa nuvem se contrai para formar uma estrela, a temperatura em seu centro aumenta drasticamente, sobretudo por causa do atrito entre átomos e moléculas. A gravidade faz essa matéria se contrair ainda mais, até o ponto em que a temperatura atinge milhões de graus Celsius, o que permite o início da **fusão nuclear**. Nesse processo, prótons colidem e formam núcleos mais complexos. Inicialmente, o processo de fusão nuclear estelar, em termos líquidos, produz um núcleo de hélio a partir de quatro núcleos de hidrogênio (prótons), liberando uma quantidade enorme de energia. Por isso, as estrelas brilham, emitindo luz para o espaço.



A reação da fusão nuclear estelar é mais complexa do que a reação líquida explicada no texto. Para gerar o núcleo do átomo de hélio e energia, a reação completa é composta de reações menores que geram e/ou produzem outras partículas como o pósitron, o neutrino e o deutério. O fóton é a partícula que carrega energia.

Podemos dizer que o Sol é uma estrela típica. A única diferença é que ele está muito próximo de nós, enquanto as outras estrelas, de tão longe, parecem que são muito pequenas e estáticas. A temperatura da superfície solar é cerca de 5 800 °C e seu campo gravitacional de 275 N/kg é cerca de 28 vezes maior do que o terrestre. Ele é composto basicamente de hidrogênio, que é transformado ininterruptamente em hélio.

No entanto, as estrelas não são eternas. Elas estão sujeitas a um ciclo natural, em que, no fim de sua existência, algumas de suas características são brutalmente modificadas. De maneira mais simples, toda estrela nasce, vive e morre, e o Sol infelizmente viverá por mais cerca de 4,5 bilhões de anos. Pouco menos dos 5,5 bilhões que ele já viveu! O que acontecerá?

Fotos: The Granger Collection/Otherimages



Ejnar Hertzsprung (1873-1967) e Henry Norris Russell (1877-1957).

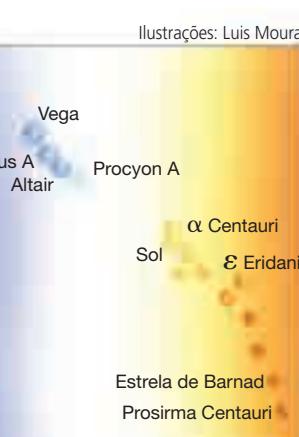


Diagrama HR com destaque da sequência principal, região onde se localiza a maior parte das estrelas por ser o estágio de maior duração e estabilidade do ciclo de uma estrela.

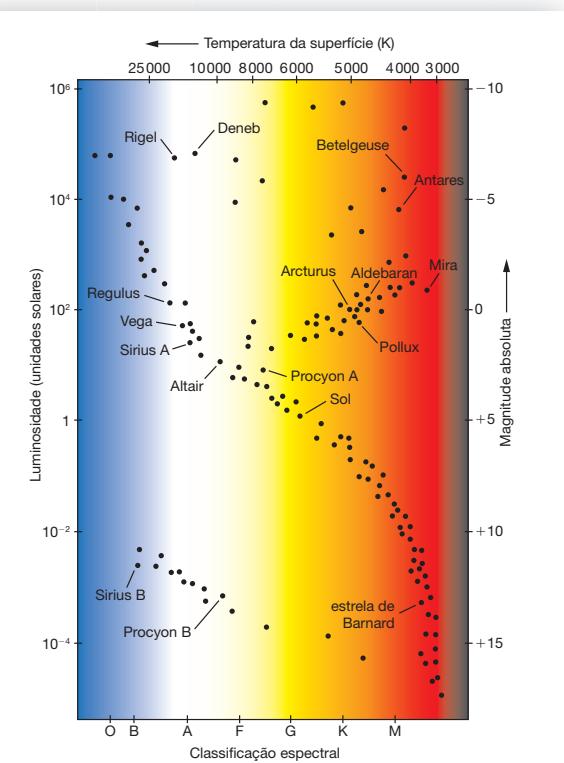


Diagrama HR com destaque para os outros grupos importantes de estrelas, gigantes, supergigantes e anãs brancas. Às vezes, os grupos também podem receber o nome de gigante vermelha ou supergigante vermelha.

O ciclo de vida das estrelas pode ser representado por uma tabela ou diagrama que relaciona o logaritmo da luminosidade (ou magnitude) com o logaritmo da temperatura superficial (ou tipo espectral). Essa representação ficou conhecida como diagrama de Hertzsprung-Russell, ou simplesmente diagrama HR, cujo nome se deve aos cientistas que descobriram essa relação, o dinamarquês Ejnar Hertzsprung e o americano Henry Norris Russell.

Nesse tipo de diagrama, a temperatura aumenta no sentido contrário ao convencional, isto é, as estrelas com temperaturas maiores estão à esquerda. Os cientistas perceberam que a distribuição das estrelas não era uniforme, havendo aglomerações em determinadas regiões no diagrama. Verificou-se que grande parte das estrelas, cerca de 80%, se distribui em uma “linha preferencial”, chamada **sequência principal**, que se estende da parte superior esquerda do gráfico à inferior direita.

No diagrama ao lado, apresentamos a posição de algumas estrelas, inclusive o Sol. Note, por exemplo, que a estrela α centauri (alfa do Centauro) tem luminosidade e temperatura muito próximas do Sol. Já a Sirius é mais quente e mais luminosa.

Nesse diagrama também foi possível observar uma relação entre as cores das estrelas e a temperatura em sua superfície. Você já reparou que as estrelas possuem cores? Se você olhar atentamente para o céu noturno, poderá observar que algumas estrelas azuis parecem mais esbranquiçadas, enquanto outras são bem avermelhadas. Na tabela a seguir, mostramos a relação entre a temperatura superficial e a cor de uma estrela.

Temperatura (K)	Cor
35 000 - 20 000	azul
20 000 - 10 000	branco-azulada
10 000 - 7 500	branca
7 500 - 7 000	branco-amareizada
7 000 - 5 000	amarela
5 000 - 3 500	alaranjada
3 500 - 3 000	vermelha

Fonte de pesquisa: OLIVEIRA, Kepler de; SARAIVA, Maria de Fátima. *Astronomia e Astrofísica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

O principal fator que determina a temperatura de uma estrela é sua massa. Quanto maior a massa da estrela, mais quente e luminosa ela será.

Falamos que a maioria das estrelas se encontra na sequência principal, mas como estão distribuídas as estrelas restantes? Simplificadamente, em três grupos: **gigantes, supergigantes e anãs brancas**.

[Ver Orientação 33.](#)

Dizemos que uma estrela nasce quando a temperatura no interior da protostrela é alta o suficiente para iniciar a fusão do hidrogênio em hélio. A partir desse instante, a estrela já possui uma posição definida no diagrama HR na sequência principal. Assim, podemos perguntar por que “aparecem” essas outras estrelas em regiões diferentes da sequência principal.

Elas “aparecem” nessas regiões por causa das grandes mudanças que ocorrem em suas características físicas (temperatura, raio e luminosidade) no fim de seu ciclo de existência. O fator determinante na evolução estelar é sua massa; basicamente, podemos ter três diferentes cenários para o estágio final de uma estrela.

Em geral, as estrelas ficam a maior parte do tempo estáveis na sequência principal e, quando o principal combustível da fusão nuclear, o hidrogênio, começa a se esgotar no centro da estrela, ela inicia uma “rápida” evolução para os estágios finais de vida. Falamos “rápida” entre aspas porque, para a escala de tempo de um ciclo de vida estelar, isso significa milhares de anos. Fazendo uma comparação superficial, estrelas de baixa massa, como o Sol, podem viver cerca de 10 bilhões de anos; estrelas de grande massa vivem bem menos, algumas centenas de milhões de anos. Vamos dar uma olhada nos momentos finais das estrelas, que como já dissemos dependem de sua massa inicial.

Nas estrelas com massa entre 0,8 e 10 vezes a massa solar, conforme a maior parte do hidrogênio é consumida, seu núcleo se contrai ficando mais denso e quente. Essa maior produção de energia faz que as camadas mais exteriores se expandam e o raio aumente. No ápice dessa expansão, o Sol, por exemplo, se transformará em uma gigante vermelha, e seu raio poderá ultrapassar a órbita de Vênus e da Terra. Em determinadas condições, o núcleo estelar atinge temperaturas tão elevadas que permitem a fusão nuclear do hélio, que por algumas reações é transformado em carbono. Depois desse estágio, a estrela passa por instabilidades que provocam a ejeção de parte de suas camadas. Segundo esse cenário, no centro resta uma pequena estrela (sobra do núcleo da estrela inicial) e em torno dele uma nuvem de gases (resultado da ejeção das camadas exteriores). Essa fase é conhecida como **nebulosa planetária**. Em alguns milhares de anos, a nuvem se dissipará e a estrela no centro, que não possui mais fusão nuclear, receberá o nome de **anã branca** e resfriará gradativamente.

Essas mudanças fazem a estrela, originalmente na sequência principal no diagrama HR, mudar de lugar, ascendendo ao ramo das gigantes e posteriormente à região das anãs brancas. Observe o diagrama HR apresentado anteriormente e veja que, nessas estrelas (gigantes e anãs brancas), a relação entre luminosidade e temperatura é muito diferente das estrelas presentes na sequência principal.

As estrelas menores, ou seja, abaixo de 0,8 da massa solar, após consumirem o hidrogênio, passam diretamente para a fase de anãs brancas. Às vezes, após alguns milhões de anos, quando a anã branca se resfria totalmente, ela pode receber o nome de anã negra, mas esse objeto é de difícil identificação por não produzir mais energia em seu núcleo.

Já as estrelas com massa muito maior que o Sol, ao saírem da sequência principal, tornam-se super-gigantes vermelhas. Enquanto as estrelas menores apenas transformam o hidrogênio em hélio, as estrelas maiores podem, por meio de outras reações, gerar todos os elementos da tabela periódica, do hélio ao ferro.

The Hubble Helix Nebula Team, M. Meixner (STScI), and T. A. Rector (NRAO)/ESA/NOAO/NASA



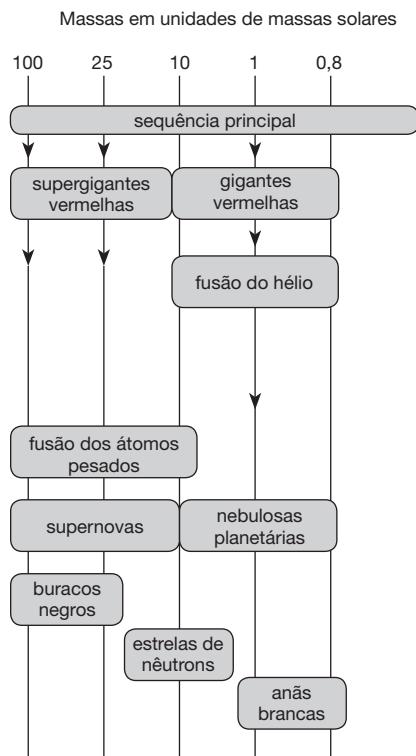
A camada de gases é originada a partir da ejeção das camadas de uma estrela de massa baixa ou intermediária. No centro, há uma estrela que recebe o nome de anã branca.

J. Hester and A. Loll (Arizona State University/ESA/NASA)



No centro, há uma estrela de nêutrons e, ao seu redor, os restos da supernova. Esse objeto também recebe o nome de remanescente de supernova.

Editoria de arte



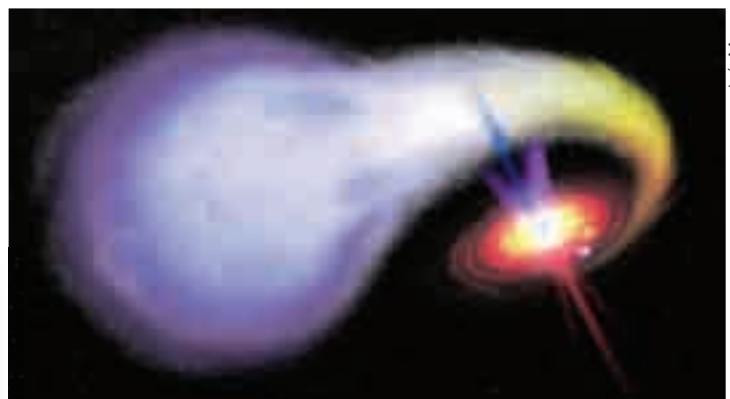
4

UNIDADE 4 ASTRONOMIA

Como o núcleo composto de elementos mais pesados, a estrela passa por instabilidades mais intensas, entra em colapso e explode (ou de certa maneira implode) em um evento extremamente energético chamado **supernova**. Foi um evento similar a esse que Tycho Brahe observou no céu em 1572, na constelação de Cassiopeia. Uma supernova tem sua luminosidade comparada com a de toda uma galáxia durante alguns dias. Após a explosão, grande parte da matéria é ejetada para o espaço. O núcleo restante só pode ser analisado com a Física Quântica e a Relatividade Geral; portanto, é de difícil descrição e explicação para nossos estudos. Mas no centro podemos ter a formação do que chamamos **estrela de nêutrons** ou **buraco negro**, dependendo de sua massa inicial.

Para estrelas que têm entre 10 e 25 massas solares, o resultado final é uma estrela de nêutrons. Durante o intenso colapso gravitacional, forma-se uma esfera de matéria muito concentrada, com apenas algumas dezenas de quilômetros. Com isso os espaços intra-atômicos deixam de existir e os prótons e os elétrons são obrigados a se combinar originando nêutrons.

Quando as estrelas têm acima de 25 massas solares, o colapso gravitacional é ainda mais intenso. A violentíssima contração resulta em um corpo muito denso, os buracos negros.



Luis Moura

Representação artística de um buraco negro com disco de acreção.

Não enxergamos os buracos negros, uma vez que toda a luz é capturada pela imensa atração gravitacional. No entanto, podemos estudar alterações que um buraco negro provoca ao seu redor. Por exemplo, a matéria atraída pelo buraco negro muitas vezes forma um disco que gira ao seu redor com velocidade próxima à velocidade da luz. Nesse movimento, pode emitir muita energia, na forma de raio X, e formar jatos perpendiculares ao disco. Outra forma de detectá-lo é estudar a sua influência gravitacional nos objetos próximos, ou, ainda, verificar o desvio ou a distorção que a luz de outros objetos sofre ao passar nas imediações de um buraco negro. Chamamos esse efeito de lente gravitacional.

Para resumir todos os cenários de evolução estelar, apresentamos no quadro ao lado um resumo com os estágios finais separados conforme a massa inicial da estrela.

**1)** As estrelas podem ser consideradas fábricas de elementos químicos?

Sim, pois elementos mais pesados, como hélio, carbono, oxigênio, entre outros, são formados a partir da fusão do hidrogênio. Os elementos mais pesados que o ferro são formados a partir de eventos mais energéticos como a explosão de supernova.

**2)** Em que região do diagrama HR, as estrelas passam a maior parte da vida?

Na sequência principal, em que as estrelas produzem energia por meio da fusão do hidrogênio de maneira bem estável. As regiões das anãs brancas e negras e a região das gigantes e supergigantes são os estágios finais da evolução estelar e perduram por pouco tempo em relação ao tempo na sequência principal.

**3)** Como os buracos negros podem ser detectados se eles não são vistos?

Os buracos negros são descobertos e analisados indiretamente, observando-se as alterações que provocam na região ao seu redor, como a interação gravitacional com outros corpos ou nuvens de gás e poeira (neste caso há emissão de raios X) ou o desvio da luz na sua vizinhança.

**1)** Por que alguns astrônomos dizem que “somos filhos das estrelas”?

*Resposta no final do livro.*

**2)** Quando estrelas com massas maiores que a do Sol saem da sequência principal passam a ocupar que região de estágio evolutivo do diagrama HR?

*Resposta no final do livro.*

**3)** Localize as estrelas a seguir no diagrama HR da página 360 e, em seu caderno, complete a tabela com o seu estágio evolutivo.

Estrelas	Estágio evolutivo
$\alpha$ do Centauro A (constelação do Centauro) <i>sequência principal</i>	
Antares (constelação de Escorpião) <i>supergigante</i>	
Aldebaran (constelação de Touro) <i>gigante</i>	
Betelgeuse (constelação de Órion) <i>supergigante</i>	
Procyon B (constelação do Cão Maior) <i>anã branca</i>	
Rigel (constelação de Órion) <i>supergigante</i>	
Sirius A (constelação do Cão Maior) <i>sequência principal</i>	
Sirius B (constelação do Cão Maior) <i>anã branca</i>	
Sol <i>sequência principal</i>	

**4)** Ao passar as férias na fazenda da avó, um rapaz ficou surpreso ao observar um conjunto de sete estrelas chamadas Plêiades. Sabendo que as magnitudes visuais das estrelas estão entre 2,8 e 5, explique por que na capital o rapaz enxerga um céu diferente do céu do interior. *Resposta do final do livro.*

**5)** Explique a origem do adjetivo “negro” no nome “buraco negro”. Faz sentido atribuir uma “cor” a esse corpo celeste? *Resposta do final do livro.*

## Exercícios resolvidos

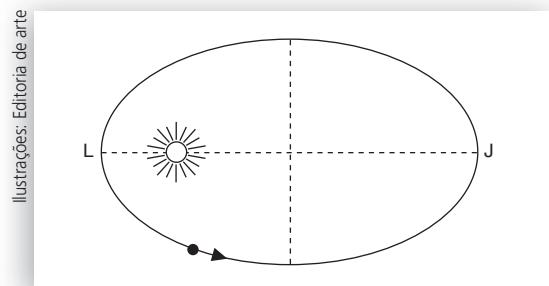
## Exercícios propostos



## Exercícios propostos

**Exercícios correspondentes às leis de Kepler.**

- 1)** (UFMG) A figura a seguir representa a órbita elíptica de um cometa em torno do Sol. Com relação aos módulos das velocidades desse cometa nos pontos  $L$  e  $J$ ,  $v_L$  e  $v_J$ , e aos módulos das acelerações nesses mesmos pontos,  $a_L$  e  $a_J$ , pode-se afirmar que:



- Ilustrações: Editoria de arte
- a)  $v_L < v_J$  e  $a_L < a_J$
  - b)  $v_L < v_J$  e  $a_L > a_J$
  - c)  $v_L = v_J$  e  $a_L = a_J$
  - d)  $v_L > v_J$  e  $a_L < a_J$
  - x e)  $v_L > v_J$  e  $a_L > a_J$

- 2)** (ITA-SP) Estima-se que, em alguns bilhões de anos, o raio médio da órbita da Lua estará 50% maior do que é atualmente. Naquela época, seu período, que hoje é de 27,3 dias, seria:

- a) 14,1 dias.
- b) 18,2 dias.
- c) 27,3 dias.
- d) 41,0 dias.
- x e) 50,2 dias.

- 3)** (F. M. ABC-SP) Se a Lua tivesse o triplo da massa que tem e se sua órbita fosse a mesma, o seu período de revolução em torno da Terra teria

- a) o triplo do valor atual.
- b)  $\frac{1}{3}$  do valor atual.
- c) 9 vezes o valor atual.
- d)  $\frac{1}{9}$  do valor atual.
- x e) o mesmo valor atual.

- 4)** (Fuvest-SP) Considere um satélite artificial em órbita circular. Duplicando a massa do satélite sem alterar o seu período de revolução, o raio da órbita será:

Pense  
um pouco  
mais!

- a) duplicado.
- b) quadruplicado.
- c) reduzido à metade.
- d) reduzido à quarta parte.
- x e) o mesmo.

- 5)** (UECE) Se  $R$  é o raio médio da órbita de um planeta  $X$ , e  $T$  é o período de revolução em torno do Sol, a 3<sup>a</sup> lei de Kepler estabelece que  $T^2 = C \cdot R^3$ , onde  $C$  é uma constante de proporcionalidade, válida para todos os planetas de nosso Sistema Solar. Suponha que a distância média do planeta  $X$  ao Sol é 4 vezes a distância média da Terra ao Sol. Podemos concluir que o período do planeta  $X$  é, em anos:

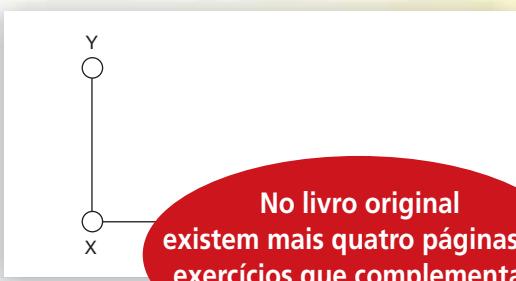
- a) 2
- b) 4
- x c) 8
- d) 16

- 6)** (Cesgranrio-RJ) O raio médio da órbita de Marte em torno do Sol é aproximadamente quatro vezes maior do que o raio médio da órbita de Mercúrio em torno do Sol. Assim, a razão entre os períodos de revolução,  $T_1$  e  $T_2$ , de Marte e de Mercúrio, respectivamente, vale aproximadamente:

- a)  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{4}$
- d)  $\frac{T_1}{T_2} = 4$
- b)  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{2}$
- x e)  $\frac{T_1}{T_2} = 8$
- c)  $\frac{T_1}{T_2} = 2$

**Exercícios correspondentes à lei da Gravitação Universal.**

- 7)** Na figura a seguir, o corpo  $X$  atrai o corpo  $Y$  com uma força de intensidade  $4,0 \cdot 10^{-7}$  N e atrai o corpo  $Z$  com uma força de intensidade  $3,0 \cdot 10^{-7}$  N.



No livro original  
existem mais quatro páginas de  
exercícios que complementam  
essa seção.

# Outras ATIVIDADES

## Dimensões do Sistema Solar

As ilustrações do Sistema Solar que você encontrou neste livro e as que você já viu em outros livros, em revistas e na internet não representam as proporções reais de distância e tamanho. Você já se questionou a razão desse fato? Esta atividade vai ajudá-lo a encontrar a resposta para essa questão.

### Materiais

- fita métrica
  - giz de lousa
  - 10 cartolinhas amarelas
  - cola ou fita adesiva
  - folhas de papel de diferentes cores
  - rolo de papel *kraft* ou bobina de papel (calculadora)
  - tesoura
  - régua
  - compasso
- folhas de revistas já lidas ou retalhos de papel colorido também podem ser utilizados

### Roteiro e questões

#### Parte 1 – Elaborando uma escala de distâncias

Será que as distâncias dos planetas ao Sol são proporcionais?

A distância Terra-Sol, definida como uma unidade astronômica (UA), tem cerca de 150 milhões de quilômetros ( $1,4960 \cdot 10^8$  km). Com essas duas informações, podemos converter a distância **d** (em km) de todos os planetas ao Sol para unidades astronômicas, por uma simples regra de três:

$$150 \cdot 10^6 \text{ km} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1 \text{ UA}$$

$$d_{\text{planeta-Sol}} \text{ (km)} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad x$$

Por exemplo, para a distância de Saturno ao Sol, que é de aproximadamente 1427000000 km, teremos:

$$150 \cdot 10^6 \text{ km} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 1 \text{ UA}$$

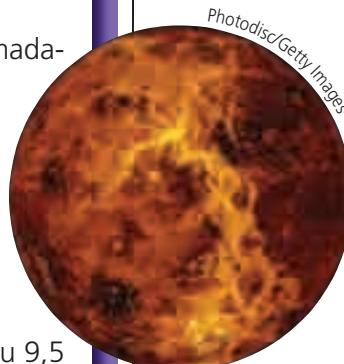
$$1,427 \cdot 10^9 \text{ km} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad x$$

Assim,

$$x = \frac{1,427 \cdot 10^9}{150 \cdot 10^6} \approx 9,5 \text{ UA}$$

Saturno fica, portanto, cerca de 9,5 unidades astronômicas do Sol ou 9,5 vezes mais distante do Sol do que a Terra.

O próximo passo é **escolher uma escala** para a construção do seu modelo. Isso significa que deve ser atribuído um valor (geralmente em cm) à unidade padrão (nesse caso, equivale escolher quantos centímetros valem 1 UA). Caso você decida que 1 UA = 10 cm, a distância Terra-Sol será de 10 cm. Para encontrar a escala equivalente às distâncias dos outros planetas, é só realizar a mesma regra de proporção discutida anteriormente:





Photodisc/Getty Images

$$1 \text{ UA} \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad 10 \text{ cm}$$

$$d_{\text{planeta-Sol}} (\text{UA}) \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad x$$

No caso de Saturno, teremos:

$$1 \text{ UA} \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad 10 \text{ cm}$$

$$9,5 \text{ UA} \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad x$$

Assim,

$$x = \frac{9,5 \cdot 10}{1} = 95 \text{ cm}$$

Portanto, a distância Saturno-Sol em nosso modelo, escalado em 1 UA = 10 cm, é de 95 cm.

■ Agora elabore em seu caderno uma tabela na qual cada planeta do Sistema Solar esteja relacionado com sua distância ao Sol em km (consulte a tabela da página 342), em UA (obtenha a conversão) e em escala (realize a conversão). Utilize valores aproximados.

■ Depois de terminar os cálculos, utilize giz de lousa e fita métrica para desenhar, no rolo de papel, os planetas em ordem de distância ao Sol com a escala correta. Utilizando setas, indique a localização do Sol e dos planetas.

### Parte 2 – Elaborando uma escala de tamanhos

Será que o tamanho dos planetas é semelhante ao tamanho do Sol?

Na segunda parte da atividade, você vai investigar o raio médio **R** de cada planeta e compará-los com a Terra. O procedimento é análogo ao anterior, vamos somente mudar a nossa escala, definindo como unidade padrão o raio terrestre (6 400 km) e o tamanho da escala de 1 cm:

$$6,4 \cdot 10^3 \text{ km} \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad 1 \text{ cm}$$

$$R_{\text{planeta}} (\text{km}) \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad x$$

Por exemplo, o raio médio de Saturno é de aproximadamente 60 300 km, portanto:

$$6,4 \cdot 10^3 \text{ km} \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad 1 \text{ cm}$$

$$6,0 \cdot 10^4 \text{ km} \quad \underline{\hspace{1cm}} \quad x$$

Assim:

$$x = \frac{6,0 \cdot 10^4}{6,4 \cdot 10^3} = 0,94 \cdot 10 = 9,4 \text{ cm}$$

Nessa escala, o raio de Saturno é de 9,4 cm.

■ Agora, elabore em seu caderno mais uma tabela na qual o Sol e todos os planetas do Sistema Solar devem estar relacionados com seus raios médios em km (consulte a tabela da página 342) e seus raios em escala (realize a conversão). Utilize valores aproximados.

■ Depois de terminar os cálculos, é o momento de elaborar discos de cartolina e papel que representarão o Sol e os planetas em escala de diâmetro. Utilize régua, compasso, tesoura e as cartolinhas amarelas para fazer o Sol. Com as folhas coloridas faça os planetas. Não se esqueça de colocar o nome dos astros.

### Questões

**1)** Você compreendeu por que as imagens que representam o Sistema Solar não utilizam escalas de distância e tamanho? *Resposta pessoal*.

**2)** Seria possível construir uma maquete do Sistema Solar utilizando uma única escala para o tamanho dos planetas e suas distâncias? *Resposta pessoal*.

## 2001: uma odisseia no espaço

O filme *2001: uma odisseia no espaço* é um dos clássicos da ficção científica. O roteiro foi elaborado pelo escritor Arthur C. Clarke e dirigido pelo cineasta Stanley Kubrick.

Produzido nos Estados Unidos, em 1968, conta uma história futurista para a época, mas que já é passado para nós. Algumas previsões aconteceram, outras ainda fazem parte do nosso imaginário e são metas futuras da Ciência.

A seguir apresentamos um roteiro de trabalho para que você, com seus colegas, possa discutir algumas cenas do filme do ponto de vista da Física. Neste roteiro, separamos algumas cenas, com detalhes específicos para serem observados, e questões problematizadas em cima delas. Responda-as em seu caderno.



Filme de Stanley Kubrick, 2001: uma odisseia no espaço.  
1968. EUA. Foto: Everett Collection/Keystone

**Pesquise,  
proponha  
e debata**

### 2001: uma odisseia no espaço – Análise física de algumas cenas

Cena		Observar	Questões
[1]	19'53"	Satélite em órbita	
[2]	20'51"	Estação espacial	Rotação da estação, localização dos pisos <b>1)</b> Qual a finalidade da rotação da estação espacial?
[3]	21'21"	Ônibus espacial	
[4]	21'42"	Interior do ônibus	Caneta e braço flutuando <b>2)</b> Em que local da estação as pessoas estão e em que posição?
[5]	22'16"	Comissária de bordo	Sapatos aderentes <b>3)</b> Por que a caneta flutua? <b>4)</b> Os sapatos aderentes substituem a gravidade? Por quê?
[6]	22'57"	Aproximação	Movimentos do ônibus e da estação <b>5)</b> Qual é o referencial adotado nesta cena? O que se observa?
[7]	23'34"	Janela do ônibus	Céu estrelado e movimento da estação <b>6)</b> Qual é o referencial adotado nesta cena? O que se observa?
[8]	23'51"	Entrada da estação	Céu estrelado e movimento do ônibus <b>7)</b> Qual é o referencial adotado nesta cena? O que se observa?
[9]	24'07"	Entrada da estação (zoom out)	Salas com pessoas no piso e no teto <b>8)</b> Como se explica as pessoas de ponta-cabeça?
[10]	24'36"	Acoplamento	Movimento do ônibus <b>9)</b> O que mudou nesta cena em relação à cena 6? Por quê?
[11]	24'56"	Janela do ônibus espacial	Céu estrelado e movimento da estação <b>10)</b> O que mudou nesta cena em relação à cena 7? Por quê?
[12]	25'52"	Recepção	Janela da estação
[13]	26'13"	Esquema na parede	Planta da estação espacial
[14]	26'53"	Corredor	Curvatura do piso e do teto <b>11)</b> Relacione a curvatura do piso com a cena 3.
[15]	27'37"	Cabine videofônica	Movimento da Terra <b>12)</b> Explique o movimento observado na janela da cabine.
[16]	33'48"	Nave lunar	Motores <b>13)</b> Esses motores estão ligados? Explique.
[17]	34'00"	Sala de passageiros	Formato da sala e das janelas
[18]	35'22"	Copa	Subindo pelas paredes <b>14)</b> Explique esta cena.
[19]	36'00"	Sala de controle	Janelas
[20]	36'08"	Externa da nave	Janelas e formato da nave <b>15)</b> Descreva a disposição da sala de estar e da de controle.
[21]	36'35"	Floyd e o comandante	Bandeja flutuando <b>16)</b> É possível a bandeja flutuar assim? Por quê?
[22]	36'39"	Zero Gravity Toilet	

Fonte: Secretaria da Educação do Estado de São Paulo. Caderno do professor: Física, ensino médio – 1ª série, 4º bimestre/Secretaria da Educação. São Paulo: SEE, 2008. p. 18-9.

## Problema aberto

### B612

*Le Petit Prince*, conhecido como *O Pequeno Príncipe* no Brasil, é um romance de Antoine de Saint-Exupéry publicado em 1943 nos Estados Unidos. Conta a história de um príncipe que mora num planeta, mais precisamente um asteroide, chamado B612. Selecionei um extrato do livro para você conhecer um pouco sobre o lugar onde vive esse menino que já conquistou pessoas de diversas idades no mundo todo.

*Assim eu comecei a compreender, pouco a pouco, meu pequeno principezinho, a tua vidiinha melancólica. Muito tempo não tiveste outra distração que a doçura do pôr do sol. Aprendi esse novo detalhe quando me disseste, na manhã do quarto dia:*

— Gosto muito do pôr do sol. Vamos ver um...

— Mas é preciso esperar...

— Esperar o quê?

— Esperar que o sol se ponha.

Tu fizeste um ar de surpresa, e, logo depois, riste de ti mesmo. Disseste-me:

— Eu imagino sempre estar em casa!

De fato. Quando é meio-dia nos Estados Unidos, o sol, todo mundo sabe, está se deitando na França. Bastaria ir à França num minuto para assistir ao pôr do sol. Infelizmente, a França é longe demais. Mas, no teu pequeno planeta, bastava apenas recuar um pouco a cadeira. E contemplavas o crepúsculo todas as vezes que desejas...

— Um dia eu vi o sol se pôr quarenta e três vezes!

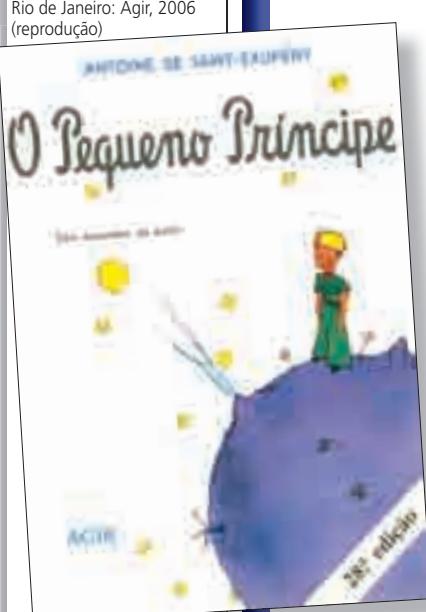
E um pouco mais tarde acrescentaste:

— Quando a gente está triste demais, gosta do pôr do sol...

— Estavas tão triste assim no dia dos quarenta e três?

Mas o principezinho não respondeu.

Antoine de Saint-Exupéry. *O Pequeno Príncipe*.  
28. ed. Rio de Janeiro: Agir, 1989. p. 26-7.



Capa do livro  
*O Pequeno Príncipe*.

4

Em nosso Sistema Solar, podemos dividir os planetas em dois tipos básicos: quatro – Mercúrio, Vênus, Terra e Marte – são denominados Terrestres; e quatro – Júpiter, Saturno, Urano e Netuno – são os Jovianos. Observem as características desses grupos no quadro abaixo, elas serão úteis para a resolução desta atividade.

Características	Terrestres	Jovianos
massa	pequena ( $< 1 M_{Terra}$ )	grande ( $> 10 M_{Terra}$ )
tamanho	pequeno ( $< 1 R_{Terra}$ )	grande ( $> 4 R_{Terra}$ )
densidade	grande ( $\approx 5 \text{ g/cm}^3$ )	pequena ( $\approx 1 \text{ g/cm}^3$ )
distância do Sol	pequena	grande
composição	rochas, silicatos, metais	H e He
número de satélites	poucos ou nenhum	muitos

Fonte: OLIVEIRA, Kepler de; SARAIVA, Maria de Fátima. *Astronomia e Astrofísica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

Para esta atividade, você precisará recorrer a alguns conceitos trabalhados nesta unidade. Se necessário, consulte a tabela com os dados dos planetas de nosso Sistema Solar. Também será útil relembrar alguns conceitos da Geometria, como o volume de uma esfera,  $V = \left(\frac{4}{3}\right)\pi R^3$ , e a relação do arco de uma circunferência  $C$  com o ângulo central  $\theta$  (em radianos):  $C = \theta R$ .

Começaremos agora uma investigação sobre o planeta B612.

### Questões

**1)** No B612, é possível recuar um pouco a cadeira para ver várias vezes o pôr do sol. Como podemos a partir dessa informação estimar seu tamanho?

**2)** Como o príncipezinho está sobre o planeta, podemos supor que este é semelhante à Terra em termos de suas características rochosas e densidade. Sendo assim, qual seria a massa do B612?

**3)** Se num dia o Pequeno Príncipe pode ver o Sol se pôr 43 vezes, quanto duraria o dia no B612?

**4)** O que acontece com uma pedra abandonada pelo Pequeno Príncipe da altura de seu peito?

**5)** Abandonada dessa mesma altura, que pedra chega primeiro ao solo, a abandonada na Terra ou a abandonada no B612?

**6)** Em certo ponto do B612, existe uma rosa como a ilustrada na figura. Se o Pequeno Príncipe decidisse correr para apanhar a rosa, qual poderia ser sua velocidade máxima? (Sugestão: pense na velocidade necessária para um corpo entrar em órbita.)

**7)** Dada essa velocidade máxima e o tamanho que estimou para o planeta, quanto tempo o príncipezinho levaria para dar uma volta completa em seu planeta?

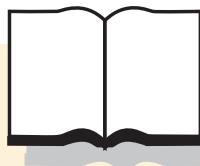
**8)** Já sabemos muitas coisas sobre o B612. Com tudo o que você estimou, discutiu e calculou, avalie a possibilidade de esse planeta existir e de haver vida nele.



Ilustrações: Mario Pita

Da estante  
Para ler e assistir

## Para ler



**Título:** *Contato*

**Autor:** Carl Sagan

**Editora:** Companhia das Letras

**Edição:** 1ª edição 1997

**Resenha:** Contato com extraterrestres não é sinônimo de homenzinhos verdes desembarcando de um disco voador. É muito mais: sinais captados num radiotelescópio podem conter mensagens capazes de nos fazer repensar toda a nossa concepção da vida e do Universo. Esse é o ponto de partida de Carl Sagan, que, aliando as tensões da melhor literatura ao conhecimento científico mais avançado, compõe um romance que pode provocar em nós todas as reações – menos indiferença. Em *Contato*, o que está em jogo é o mundo tal como o conhecemos.



Carl Sagan. *Contato*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997 (reprodução)

## Para assistir

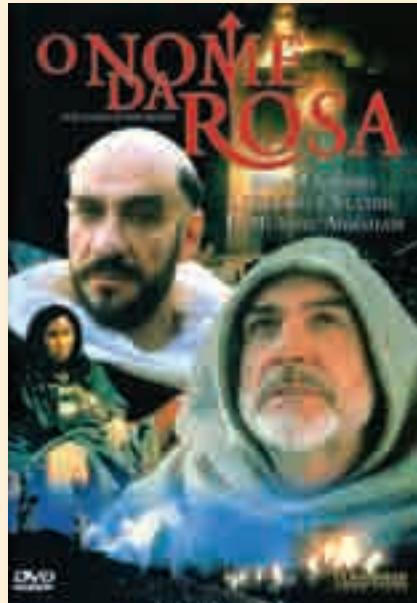
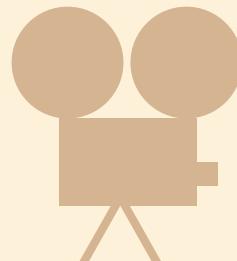
**Filme:** *O nome da rosa*

**Diretor:** Jean-Jacques Annaud

**Ano:** 1986

**País:** Estados Unidos

**Sinopse:** Neste filme, baseado na obra de Umberto Eco, estranhas mortes começam a ocorrer em um mosteiro da Idade Média, onde poucos monges têm acesso às publicações sacras e profanas da enorme biblioteca. As vítimas aparecem sempre com os dedos e a língua roxos. Um monge franciscano é incumbido de investigar os crimes.



Filme de Jean-Jacques Annaud. *O nome da rosa*. 1986. EUA (reprodução)

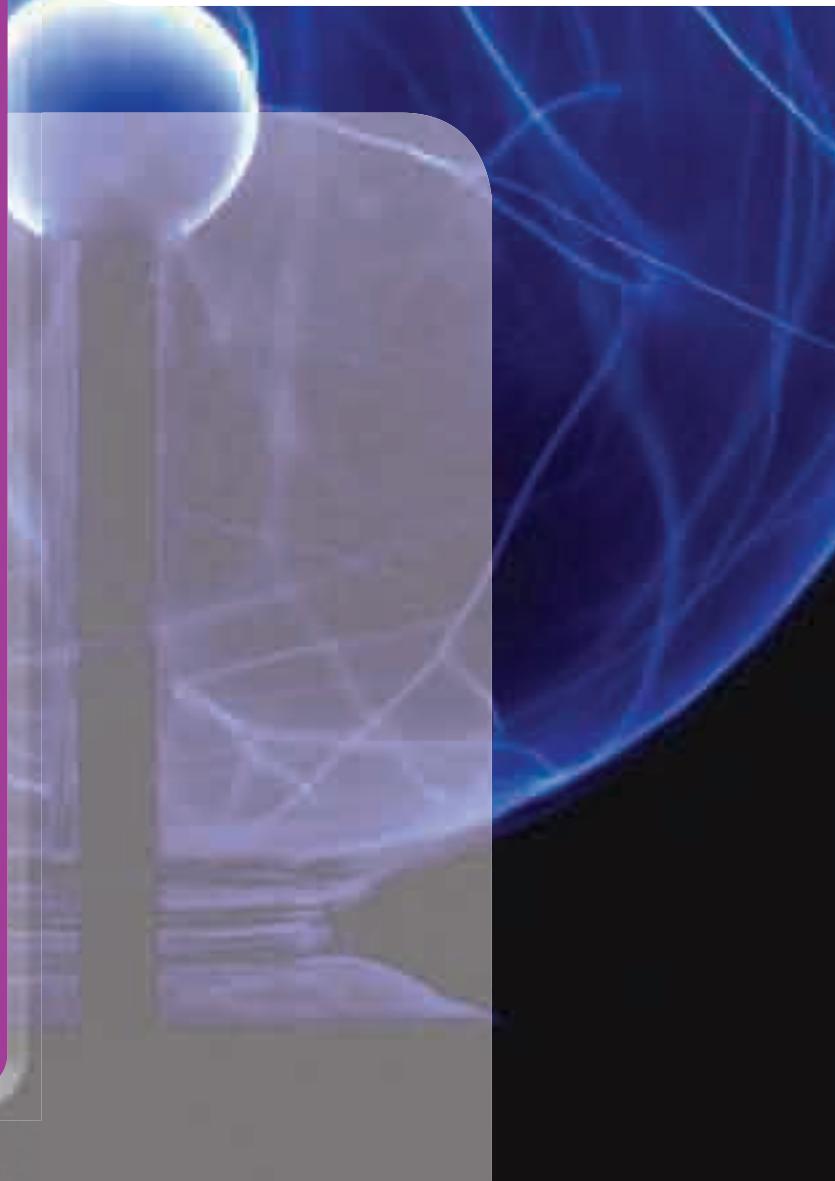
# *Unidade 3*

Luis Moura

## **Radiação e matéria**

Clive Streeter/Dorling Kirdersley/Getty Images

**N**a Unidade 2, afirmamos que a visão é o sentido que mais contribui para formar nossa concepção de mundo. Mas o conhecimento da existência de ondas eletromagnéticas, muitas das quais não conseguimos enxergar, mostrou que o mundo é bem mais amplo e nos ajudou a aumentar ainda mais a nossa concepção de mundo. Será que a luz pode ser sempre bem representada como uma onda? E um elétron, é certo pensar que ele se prende ao átomo da mesma forma que a Terra ao Sol? A radiação é uma coisa que devemos temer? As respostas a essas perguntas desafiam nosso entendimento, pois precisam ser tratadas com base em ideias que fogem à nossa percepção imediata. Veremos que um elétron num átomo não pode ser visto como um planeta orbitando o Sol, pois se submete a níveis de energia discretos. A luz tem aspectos ondulatórios, mas também se comporta como uma partícula. E a radiação, que pode matar, é também responsável pela vida, pois sem ela não haveria como aproveitar a energia do Sol. Nesta Unidade, fecharemos nosso curso apresentando a Física moderna, que nos últimos 120 anos trouxe uma nova maneira de conceber o mundo.



## Justificativa da escolha do capítulo

A unidade *Radiação e Matéria* é composta por três capítulos e discorre principalmente sobre a Física Contemporânea. Esse assunto em geral é pouco abordado no Ensino Médio e muito menos discutido com profundidade. Diversos esforços foram feitos para conseguir adequar esse conjunto de conhecimentos para a Física do Ensino Médio.

Os dois primeiros capítulos da unidade, *A natureza da luz* e *Estrutura da matéria*, versam sobre a teoria da Relatividade e alguns conceitos da Física Quântica.

O capítulo escolhido para ser apresentado neste material é o terceiro (e último) que compõe a unidade e tem o nome *Partículas elementares*. A abordagem do tema privilegia os aspectos mais intuitivos na busca do entendimento da estrutura da matéria. No caso, o mundo microscópico é apresentado de modo a se constituir um palco para a expressão da curiosidade epistemológica e uso da imaginação científica do ser humano. A diferença percebida entre o mundo das partículas e o nosso mundo cotidiano é apresentada como fonte de desafio aos estudantes. As atividades propostas buscam aproximar os estudantes do fazer científico nos grandes laboratórios, utilizando, por exemplo, fotografias de câmeras de bolhas/nuvens, e destacam algumas contribuições da Ciência brasileira nesse campo. A atividade *Pesquisa, proponha e debata – Um “cíclotron” pelos aceleradores* sugere a comparação dos diversos aceleradores de partículas existentes, conteúdo detalhado no capítulo.

# CAPÍTULO 14

**Quando estudamos os constituintes da matéria no capítulo anterior, deparamos com algumas partículas que agora ganharão o devido destaque e uma grande família. Vamos atingir o nível das partículas ( $10^{-16}$  m) e descrever como a matéria e a energia se comportam no nível subatômico.**

**Como as pesquisas sobre partículas precisam de altas energias, estudaremos os famosos aceleradores e detectores de partículas, que revelam as estruturas mais elementares do átomo conhecidas atualmente, assim como algumas reações e decaimentos.**

Professor, as sugestões ou orientações para o encaminhamento de atividades e outras discussões foram numeradas sequencialmente no Caderno de orientações, que se encontra no final deste volume.

# PARTÍCULAS ELEMENTARES

## 1. O mundo das partículas

No Capítulo 13, mostramos o esforço engenhoso e criativo dos cientistas na busca dos constituintes da matéria. Ao longo desse capítulo, analisamos o conceito de átomo em sua versão moderna e como as diversas propriedades da matéria podem ser explicadas a partir dele. Constatamos que o átomo não pode ser considerado a menor parte da matéria, pois em seu interior existe uma estrutura mais fina composta de um núcleo e uma eletrósfera. Com base nesse modelo, falamos de elétrons, prótons, nêutrons, fôtons, neutrinos, pósitrons, entre outras partículas. Naquele momento, não destacamos a existência dessas várias partículas, mas agora cabe a pergunta: será que todas elas existem? Se são ainda menores que o átomo, quais foram os meios usados para detectá-las? Existe uma maneira de organizá-las, em um tipo de “tabela periódica” de partículas?

O objetivo deste capítulo é responder a essas perguntas e alimentar a constante curiosidade dos seres humanos de saber como funciona o Universo e do que as coisas são feitas. Vale salientar, de início, que a área de estudos que trata das partículas é muito vasta, viva e dinâmica; composta de uma grande comunidade de cientistas que trabalham em rede em todo o mundo. Dessa forma, faremos apenas uma introdução ao tema, fornecendo material para aprofundamentos futuros.

Ainda hoje são descobertas novas partículas a cada dia, sendo centenas delas já conhecidas, como o elétron. Essa partícula elementar foi descoberta em 1887 por Thomson, com o auxílio de um tubo de Crookes, e forneceu a primeira indicação de que o átomo não poderia ser considerado indivisível. Há também o fôton, segunda partícula elementar a ser descoberta, que foi prevista teoricamente por Einstein em 1905 e 17 anos depois confirmada na experiência do efeito Compton. Apresentamos ainda algumas propriedades destas partículas, como o próton, descoberto por Rutherford em 1919, com massa aproximadamente 2 mil vezes maior do que a massa do elétron.

Na Física Moderna, muitas previsões teóricas da existência de partículas anteciparam resultados de experimentos; 103 anos foram necessários para descobrir e classificar essas partículas que vamos estudar e que reservam grandes dificuldades teóricas e experimentais.

Ver Orientação 47.

Na tabela a seguir, apresentamos algumas das partículas já citadas ao longo desta unidade e algumas de suas propriedades.

Natureza da partícula	Nome (símbolo)	Ano da descoberta	Carga elétrica	Spin	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	Vida média (s)
elementar	fóton ( $\gamma$ )	1923*	0	1	0	estável
elementar	elétron ( $e^-$ )	1897	-1	$\frac{1}{2}$	0,511	estável
elementar	pósitron ( $e^+$ )	1931	+1	$\frac{1}{2}$	0,511	estável
elementar	neutrino ( $\nu$ )	1930	0	$\frac{1}{2}$	$\sim 0$	estável
	próton (p)	1919	+1	$\frac{1}{2}$	938,26	estável
	nêutron (n)	1932	0	$\frac{1}{2}$	939,55	900**

CLOSE, F.; MARTEN, M.; SUTTON, C. *The particle odyssey: a journey to the heart of matter*. New York: Oxford University Press, 2002.

\* A descoberta teórica do fóton foi em 1905.

\*\* Este é o tempo de vida média do nêutron livre. Embora não seja estável no sentido lato, 900 segundos é um tempo de vida muito longo para uma partícula. Por isso, podemos considerá-la estável para nossos fins. Quando está no núcleo, o nêutron é estável.

Algumas das propriedades dessas partículas serão discutidas neste capítulo. São as partículas mais estáveis, e o mundo percebido por nós é basicamente composto delas.

Antes de começarmos nossa visita ao mundo das partículas, é necessário esclarecer que nosso estudo tem o objetivo de descrever como a matéria e a energia se comportam em nível subatômico. Para isso, vamos apresentar e discutir algumas das principais propriedades das partículas.

### Elementar ou não elementar?

Uma classificação simples que pode ser feita é considerar a natureza das partículas, isto é, elas podem inicialmente ser separadas em elementares e não elementares.

Definir de modo preciso o que são as partículas elementares não é nada fácil, já que, muitas vezes, elas são pensadas como menores que o átomo (subatômicas). O próton, o nêutron e o elétron são partículas subatômicas, mas apenas o elétron é uma partícula elementar. Isso porque os prótons e os nêutrons podem ser divididos, "quebrados", em outras partículas.

Neste capítulo, vamos nos referir de modo intuitivo às partículas elementares, mas não podemos nos esquecer de que elas são objetos físicos extremamente complexos.

Toda partícula que pode ser dividida não é elementar, enquanto toda partícula que não possui um constituinte é considerada elementar.

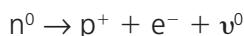
A definição de elementar como aquilo que não pode ser dividido parece boa; no entanto, implementá-la na Física teórica e experimental não é algo fácil. Podem aparecer dificuldades relacionadas aos limites intrínsecos à observação e à concepção dos modelos teóricos que descrevem o comportamento da matéria. Do ponto de vista teórico, o conceito que define uma partícula elementar é sua função de onda; é um conceito abstrato e definido matematicamente.

### Estável ou não estável?

Outra maneira importante de caracterizar as partículas é tratar de sua estabilidade. Abordamos esse conceito no Capítulo 13, quando falamos de radioatividade,

decaimentos e meia-vida dos átomos. Vimos que o decaimento se refere à transformação de partículas em outras partículas, e a meia-vida é o tempo necessário para que metade de uma amostra de partículas decaia (se transforme) espontaneamente em outras.

O decaimento das partículas é diferente do decaimento dos núcleos atômicos, porque o produto final não é uma parte menor da partícula inicial, mas são partículas totalmente novas. Veja um exemplo para o decaimento do nêutron e o aparecimento de três outras partículas, um próton, um elétron e um neutrino:



### ***Carregadas ou não carregadas eletricamente?***

As partículas podem se apresentar com carga positiva ou negativa, ou podem ser neutras. As partículas mais conhecidas, o elétron e o próton, têm carga elétrica. O elétron é negativo e o próton é positivo. Existem outras partículas que também tem carga elétrica, como o pósitron, que tem carga positiva. O mais interessante é que o valor da carga elétrica em todos esses exemplos é o mesmo:  $1,6 \cdot 10^{-19} C$ .

O nêutron, por sua vez, tem carga elétrica zero, assim como o neutrino. O que significa que não é carregado eletricamente.

Outro fato importante relacionado ao mundo das partículas é que existem outros tipos de carga além da elétrica, como a carga-cor, que trataremos adiante.

### ***Spin***

O *spin* é uma propriedade difícil de ser interpretada fora do domínio da teoria quântica. Já nos referimos brevemente a ele nos estudos sobre as leis de Ampère e de Faraday, no Capítulo 6, e talvez você também já o tenha conhecido no curso de Química. O *spin* de uma partícula foi usado para explicar orientações diferentes de elétrons na presença de campos magnéticos. Por isso, muitas vezes ele é associado à rotação de cargas elétricas. De maneira formal, o *spin* está associado ao momento angular intrínseco de cada partícula. No caso do elétron, o *spin* é  $\frac{1}{2}$  ou  $-\frac{1}{2}$ , mas existem outros valores de *spin*:  $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}, \dots$  todos múltiplos de  $\frac{1}{2}$ .

### ***Energia e quantidade de movimento das partículas***

É importante também tratar da energia e da quantidade de movimento associadas a cada partícula. Mas aqui vale um lembrete! Apesar de as partículas não poderem ser pensadas como pequenos corpos, algumas relações usadas para a descrição dos corpos macroscópicos podem ser aplicadas a elas, como os conceitos de energia, em particular a energia cinética, e de quantidade de movimento.

Vimos que, para corpos em movimento, definimos essas grandezas da seguinte forma:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \text{ e } \vec{Q} = m\vec{v}$$

Em várias situações, as relações para essas grandezas podem ser usadas para tratar fisicamente o comportamento das partículas. Assim, se conhecermos a massa e a velocidade de uma partícula, poderemos determinar sua energia cinética e a quantidade de movimento. Para partículas sem massa, essas grandezas são dadas por outras relações, como vimos no capítulo anterior.

## Por dentro do conceito



Editoria de arte

Os prótons estão provavelmente aqui ... → P  
ou poderiam estar aqui ... →  
ou ainda aui ... →

## Partículas ondulatórias

Neste capítulo, vamos tratar das partículas subatômicas como se realmente fossem partículas, ou seja, objetos com posição e velocidade definidas. Mas o comportamento das partículas pode ser descrito segundo grandezas probabilísticas. A Mecânica Quântica é o ramo da Física que explica o comportamento dessas partículas em termos matemáticos e probabilísticos.

No Capítulo 12, vimos brevemente o conceito da dualidade onda-partícula. No caso das partículas, temos situações e descrições desse tipo. Embora de início tenhamos a impressão de que os objetos subatômicos são partículas, todos têm propriedades ondulatórias. A figura a seguir tenta representar esse comportamento em que o próton apresenta uma densidade de probabilidade para sua posição.

Como as partículas também têm comportamento ondulatório, é impossível saber, ao mesmo tempo, sua posição e sua velocidade. Segundo a Física Quântica, é um engano pensar as partículas, por exemplo, os prótons e os nêutrons, como esferas pequenas e definidas. Elas são mais bem exemplificadas como regiões onde se tem maior ou menor probabilidade de determinar a posição da partícula.

### Caráter relativístico

É importante dizer que, em geral, as partículas se deslocam em alta velocidade, próximo à velocidade da luz. Portanto, precisam ser tratadas relativisticamente.

**Espaço e tempo:** em situações de movimento com velocidade próxima à velocidade da luz, tanto o espaço quanto o tempo são relativos, sendo preciso considerar suas variações. Assim, para partículas de altas velocidades, temos:

$$t = t_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad t = \gamma t_0$$

$$x = x_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad x = \gamma x_0$$

**Massa:** a massa é uma grandeza relativística. Ela é expressa da seguinte forma:

$$m = m_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad m = \gamma m_0$$

**Quantidade de movimento:** pelo fato de a massa ser relativística, somente a velocidade por si não caracteriza o estado de movimento de partículas relativísticas. Assim, o melhor é tratá-la por meio da quantidade de movimento. Na forma relativística, basta substituir a expressão da massa relativística na expressão da quantidade de movimento e teremos:

$$Q = m_0 v \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad Q = \gamma m_0 v$$

Ver Orientação 48.

**Energia:** como massa e energia estão associadas, uma partícula relativística tem sua energia associada apenas à massa relativística da seguinte forma:

$$E = mc^2$$

$$E = m_0 c^2 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou} \quad E = \gamma m_0 c^2$$

Em algumas situações, é conveniente escrever a energia total em função da quantidade de movimento:  $E = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (Qc)^2}$

Você já parou para pensar que o televisor de sua casa poderia ser uma fonte para estudos de partículas relativísticas? Nos televisores tradicionais (com exceção dos de plasma), existe um tubo de raios catódicos que aceleram elétrons em direção à tela, que é revestida de três diferentes sais de fósforo. Cada um desses sais pode ser excitado pelo choque dos elétrons acelerados com a energia apropriada e correspondentes às cores primárias de luz: azul, vermelho e verde. A energia com que os elétrons chegam à tela pode excitar um, dois ou até mesmo os três diferentes sais. As diferentes cores que vemos nas imagens da televisão, inclusive o branco, correspondem às emissões simultâneas de fótons por diferentes sais.



SSPL/Getty Images



Luis Moura

## Explorando a situação



Para saber se esses elétrons acelerados chegam a velocidades próximas à velocidade da luz, em que os efeitos relativísticos passam a ser considerados, temos de fazer algumas contas... que envolvem sua energia cinética.

Assim como na Física Nuclear, na Física de Partículas se utiliza com muita frequência a energia medida em elétron-volt. Um elétron-volt é definido como a energia ganha por um elétron, de carga elétrica  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , que se move no vácuo submetido a uma diferença de potencial (ddp) de 1 V.

$$E = qU$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Por exemplo, se a diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo do tubo de raios catódicos de uma televisão é de 2 000 V, quando um elétron é emitido pelo cátodo e passa pelo tubo acelerador, ele ganha a quantidade de energia equivalente a:

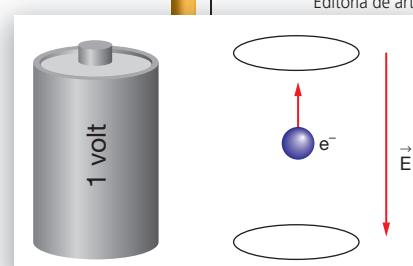
$$E = qU$$

$$E = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 000 = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ J} \text{ ou simplesmente } 2 000 \text{ eV}$$

Desse modo, quando esse elétron chega à tela da televisão sua velocidade é:

$$E_c = qU \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = qU \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot 9,0 \cdot 10^{-31} \cdot v^2 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 000$$

$$v = 2,65 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$





PhotoJof/Getty Images

## 1.1 Partículas... onde?

Vivemos cercados pelas partículas! Subprodutos dos raios cósmicos e extremamente energéticas, algumas partículas se chocam com núcleos atômicos ao penetrarem a atmosfera da Terra e produzem muitas outras partículas e radiação que chegam ao solo terrestre a todo instante. Agora mesmo, estamos sendo bombardeados por várias partículas que atravessam nosso corpo a cada segundo.

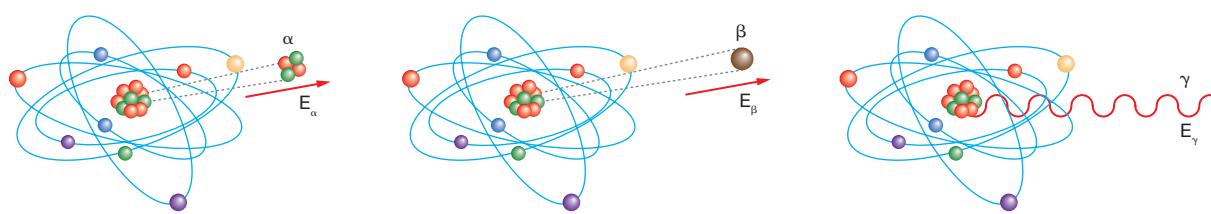
Por que vivemos como se a maioria delas não existisse?

Isso acontece porque nem todas as partículas interagem com o corpo humano. Por exemplo, os neutrinos passam por nosso corpo sem nenhuma interação com ele. Assim como a luz, que quase não interage com o vidro ao atravessá-lo, nosso corpo é transparente para algumas partículas. Isso indica que as interações envolvendo partículas dependem de condições específicas.

A estrutura atômico-molecular de determinado corpo define quais partículas interagem com ele. Embora não identifiquemos a passagem dos neutrinos, podemos notar a presença de algumas poucas partículas, como os fôtons, que atingem e sensibilizam nossa retina.

Um dos fatores mais importantes para considerar a interação de uma partícula é a sua energia. Para que se evidencie uma partícula, ela deve interagir, direta ou indiretamente, por meio de radiação, com a matéria que compõe um detector. Mas, para isso, é necessária uma elevada quantidade de energia. A maioria das partículas subatômicas só pode ser obtida por meio de experimentos que envolvem altas energias. Para entender de que ordem de grandeza da energia estamos falando, basta saber que em uma reação química, que envolve apenas átomos, temos cerca 5 eV de energia. Para evidenciar partículas subatômicas, precisamos de 1 milhão de vezes mais energia!

- O decaimento (tipo  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$ ) de um átomo radiativo envolve energias da ordem de 1 MeV ( $10^6$  eV) e pode evidenciar elétrons, pósitrons e neutrinos.



As energias envolvidas nos decaimentos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  evidenciam somente algumas partículas.

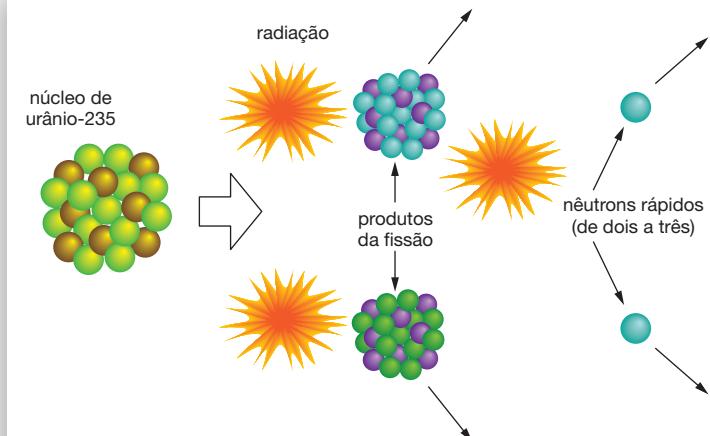
Editoria de arte

- Uma fissão nuclear envolve energia da ordem de 200 MeV e, como vimos, libera nêutrons, elétrons e outras partículas.

Por conta do alto valor das energias envolvidas, acima de 100 MeV, costuma-se chamar a área da Física de Partículas também como Física de Altas Energias.

A tabela a seguir apresenta uma pequena coleção das partículas já detectadas. Hoje, conhecemos mais de 300 partículas subatômicas, grande parte delas é fruto de pesquisas realizadas em aceleradores como os que estudaremos na próxima seção. Observe que algumas têm carga elétrica positiva, outras têm carga negativa, e outras, ainda, são neutras. Por não ser estável, a maioria delas decai rapidamente em outras partículas.

Essas partículas têm vida média curta, em geral, muito curta, que explica, em parte, por que são tão difíceis de ser detectadas. A última coluna indica os modos principais de decaimento de cada uma das partículas não estáveis. A massa também pode variar muito de uma partícula para outra: a massa do elétron, por exemplo, é cerca de 3 mil vezes menor que a massa do ômega.



A energia envolvida nas fissões nucleares, por ser mais elevada que a dos decaimentos, é capaz de evidenciar outras partículas.

Características das partículas						
Nome (símbolo)	Ano da descoberta	Carga elétrica	Spin	Massa (MeV/c²)	Vida média (s)	Modos de decaimento
neutrino do elétron ( $\nu_e$ )	1956	0	$\frac{1}{2}$	$< 3 \text{ eV}/c^2$	estável	não decai
neutrino do mûon ( $\nu_\mu$ )	1962	0	$\frac{1}{2}$	$< 0,17$	estável	não decai
neutrino do tau ( $\nu_\tau$ )	2000	0	$\frac{1}{2}$	$< 18$	estável	não decai
mûon ( $\mu^+$ )	1962	-1	$\frac{1}{2}$	105,7	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$e^\pm + \nu + \bar{\nu}$
tau ( $\tau^-$ )	1975	-1	$\frac{1}{2}$	1 777	$3,00 \cdot 10^{-13}$	$\mu^- \text{ ou } e^-$
píon ( $\pi^+$ )	1947	+1	0	140,0	$2,60 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+$
píon ( $\pi^0$ )	1949	0	0	135,0	$0,80 \cdot 10^{-16}$	$2\gamma$
píon ( $\pi^-$ )	1947	-1	0	140,0	$2,60 \cdot 10^{-8}$	$\mu^-$
káon ( $K^+$ )	1947	+1	0	493,7	$1,24 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ \text{ ou } \pi^0 + \pi^+$
káon ( $K^0_s$ )	1947	0	0	498,0	curta $0,89 \cdot 10^{-10}$ longa $5,00 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^- \text{ ou } 2\pi^0$
káon ( $K^0_L$ )	1947	0	0	497,7	$5,20 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + e^- \text{ ou } \pi^- + e^+ \text{ ou } 3\pi^0$
lambda ( $\Lambda^0$ )	1951	0	$\frac{1}{2}$	$1\,115,6 \text{ GeV}/c^2$	$2,60 \cdot 10^{-10}$	$p + \pi^- \text{ ou } n + \pi^0$
sigma ( $\Sigma^+$ )	1953	+1	$\frac{1}{2}$	$1\,189,4 \text{ GeV}/c^2$	$0,80 \cdot 10^{-10}$	$p + \pi^0 \text{ ou } n + \pi^+$

Características das partículas						
Nome (símbolo)	Ano da descoberta	Carga elétrica	Spin	Massa (MeV/c²)	Vida média (s)	Modos de decaimento
sigma ( $\Sigma^0$ )	1956	0	$\frac{1}{2}$	1 192,5 GeV/c²	$6,00 \cdot 10^{-20}$	$\Lambda^0 + \gamma$
sigma ( $\Sigma^-$ )	1953	-1	$\frac{1}{2}$	1 197,3 GeV/c²	$1,50 \cdot 10^{-10}$	$n + \pi^-$
xi ( $\Xi^0$ )	1959	0	$\frac{1}{2}$	1 315 GeV/c²	$2,90 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^0$
xi ( $\Xi^-$ )	1953	-1	$\frac{1}{2}$	1 321 GeV/c²	$1,64 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
ômega ( $\Omega^-$ )	1964	-1	$\frac{1}{2}$	1 672 GeV/c²	$0,82 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^0 + \pi^0$ ou $\Lambda^0 + K^+$

Fonte dos dados: SERWAY, R.; JEWETT Jr., J. *Princípios de Física*. São Paulo: Thomson, 2004.  
EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979, 24.ª reimpressão.

Mas não se preocupe com essa grande quantidade de partículas e dados, a ideia não é decorar o nome e as propriedades de todas as partículas. São tantas que mesmo os físicos têm dificuldade para lembrar de todas elas. Enrico Fermi uma vez disse a seu aluno (e futuro prêmio Nobel) Leon Lederman: "Jovem, se eu conseguisse lembrar o nome dessas partículas, teria sido botânico!".

## Exercícios resolvidos

Professor, é importante promover uma discussão entre os alunos antes de apresentar a resposta ou a solução do exercício. Pode-se pedir que alguns alunos respondam à pergunta oralmente e que outros alunos avaliem as respostas dadas.

3

**1)** Observe a tabela no início no capítulo. O que há em comum entre as partículas que estudamos até agora? O que isso indica?

As partículas listadas na tabela são estáveis. No caso do nêutron, ele é estável quando aprisionado no núcleo. Isso indica que se trata de partículas estáveis, ou seja, que não decaem. Além disso, das seis partículas que conhecemos, quatro delas (fóton, elétron, pósitron e neutrino) são partículas elementares, ou seja, não podem ser divididas e não têm outras partículas em sua constituição.

**2)** O mûon, uma partícula fundamental, é formado em uma colisão nas altas camadas da atmosfera. Aparentemente, ele não deveria chegar aos detectores no solo, pois, como o tempo de vida médio de um mûon é de  $2,2 \mu s$ , ele deveria decair em outras partículas antes de atingir a superfície de nosso planeta. Mesmo considerando que o mûon tem velocidade de  $0,99c$ , ele só deveria se deslocar uns 700 m. No entanto, um número considerável de mûons chega às altas montanhas onde estão os laboratórios e os detectores. Como isso é possível?

Para explicar a detecção dos mûons, é preciso recorrer à teoria da Relatividade. O tempo de vida médio de  $2,2 \mu s$  é o tempo próprio do mûon  $t_0$ , medido no sistema de referência do mûon. Se o mûon tivesse um relógio, esse seria o tempo medido por ele. Mas o detector de partículas está na Terra e seu sistema de referência está em repouso.

Sendo assim, para um observador na Terra, o tempo do mûon se dilata:

$$t = t_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 2,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,99c)^2}{c^2}}} = 2,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\sqrt{1 - 0,98}} = \\ = 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 7 = 15,5 \cdot 10^{-6} s$$

Desse modo, com sua velocidade de  $0,99c$ , o mûon alcança uma distância muito maior, quase 5 km, podendo ser detectado nas altas montanhas antes de decair.

$$\Delta p = v \Delta t = 0,99 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 15,5 \cdot 10^{-6} = 46 \cdot 10^2 = 4600 \text{ m}$$

**1)** (Fuvest-SP) O avanço científico-tecnológico permitiu identificar e dimensionar partículas e sistemas microscópicos e submicroscópicos fundamentais para o entendimento de fenômenos naturais macroscópicos. Desse modo, tornou-se possível ordenar, em função das dimensões, entidades como cromossomo (C), gene (G), molécula de água (M), núcleo do hidrogênio (N) e partícula alfa (P).

Assinale a alternativa que apresenta essas entidades em ordem crescente de tamanho.

- a) N, P, M, G, C.
- b) P, N, M, G, C.
- c) N, M, P, G, C.
- d) N, P, M, C, G.
- e) P, M, G, N, C.

**2)** Qual a quantidade de movimento de um elétron acelerado no tubo de raios catódicos de uma televisão? A diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo do tubo é de 2 000 V.  $2,4 \cdot 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

**3)** Em um tubo de raios X, um feixe de elétrons é acelerado por uma diferença de potencial de 20 000 V. Ao atingir um bloco de metal, os elétrons são violentamente desacelerados emitindo raios X, em um fenômeno chamado radiação de *bremstrahlung*. Além disso, toda a energia cinética dos elétrons é transformada nessa radiação. Calcule:

- a) a energia cinética que um elétron adquire ao ser acelerado pela diferença de potencial.  $3,2 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
- b) a velocidade do elétron quando atinge o alvo de metal.  $8,43 \cdot 10^7 \text{ m/s}$
- c) o menor comprimento de onda possível para raios X produzidos por esse tubo.  $6,2 \cdot 10^{-21} \text{ m}$

## Exercícios propostos



## 2. Aceleradores

Como as pesquisas sobre partículas precisam de altas energias para evidenciá-las, os cientistas construíram aceleradores, ou seja, equipamentos que aceleram feixes de núcleos atômicos e partículas, um em direção ao outro, a velocidades próximas à da luz, com o objetivo de colidirem. Dessa colisão de alta energia, são estudadas as reações e os decaimentos das partículas originadas na colisão para desvendar o mundo das partículas subatômicas.

Nossos olhos são capazes de nos revelar objetos no intervalo entre  $10^8 \text{ m}$  e  $10^{-3} \text{ m}$ . Para objetos distantes, usamos telescópios ou radiotelescópios, que captam a radiação emitida por estrelas e galáxias a milhões de anos-luz de distância. Para objetos menores, usamos ampliadores de imagens, como o microscópio. Até o nível da estrutura do DNA, considerada uma grande molécula, podemos usar microscópios eletrônicos.

Mas, para atingir o nível das partículas ( $10^{-16} \text{ m}$ ), precisamos dos aceleradores de partículas, como o famoso LHC, sigla em inglês para o Grande Colisor de Hadrôns, que entrou em operação em 2008 no CERN (Conselho Europeu pour la Recherche Nucléaire, em português Centro Europeu de Pesquisas Nucleares), na fronteira entre França e Suíça. Trata-se de um acelerador de partículas que atinge altíssimas energias e permite a

CERN Photo/Frédéric Pitchal/Sygma/Corbis/Latinstock



Vista aérea da área externa do LHC. A linha circular representa o duto circular e subterrâneo por onde os feixes são acelerados.

Brookhaven National Laboratory/SPL/Latinstock



Acelerador de partículas, construído no Laboratório Nacional de Brookhaven, Nova Iorque.

realização de experimentos com o objetivo de explicar questões que ainda estão em aberto sobre as partículas elementares.

Aceleradores são equipamentos caros. Para se ter uma ideia, o LHC custou aproximadamente 6 bilhões de dólares, demorou oito anos para ser construído e contou com a participação de 20 países. Esses dados podem nos assustar e talvez gerar perguntas tais como: será que máquinas como essas são realmente necessárias?

[Ver Orientação 49.](#)

## 2.1 A energia dos aceleradores

Dissemos acima que a Física de Partículas é sinônimo de altas energias. Um dos primeiros aceleradores construídos, no Laboratório Nacional de Brookhaven, em Nova Iorque, acelerava partículas a cerca de 3 GeV (3 bilhões de eV). Mas quão elevada é uma quantidade de energia dessa magnitude?

A energia das partículas aceleradas no acelerador de Brookhaven, em joule, unidade mais conhecida em situações mecânicas, é:

$$E = qU = 1,6 \cdot 10^{-19} C \cdot 3 \cdot 10^9 V = \\ = 4,8 \cdot 10^{-10} J$$

Essa energia é aparentemente pequena, não é mesmo? Uma bolinha de gude lançada num jogo de crianças tem energia maior que essa, que depende basicamente da velocidade do lançamento feito pela mão do jogador. Se calcularmos a energia da bolinha de gude, supondo massa **m** de 5 g e velocidade **v** de 5 cm/s, teremos:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot (5,0 \cdot 10^{-2})^2 = 62,5 \cdot 10^{-7} = 6,25 \cdot 10^{-6} J$$

Veja que a bolinha de gude tem cerca de 10 mil vezes mais energia cinética do que as partículas aceleradas em Brookhaven. Será então que um simples jogo de bolinhas de gude pode ser considerado um acelerador de partículas relativístico?

Nada disso! Sabemos que, em um jogo de bolinhas de gude, elas podem se quebrar, mas certamente nada ocorre em nível atômico: os átomos e/ou moléculas que compõem o vidro mantêm sua integridade, não havendo nenhum aparecimento de partículas.

Isso acontece porque a alta energia considerada nesses experimentos é medida sobre cada partícula. Para tanto, precisamos avaliar quanto cada átomo e/ou molécula presente nas bolinhas de gude tem da energia total da bolinha em movimento.

Para os cálculos, vamos admitir que o vidro seja composto basicamente de sílica ( $SiO_2$ ), que tem número de massa 60 ( $28 + 32 = 60$ ). Assim, podemos estimar que em uma bolinha de vidro de 5 g existem:

$$60 \text{ g de sílica} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 6,02 \cdot 10^{23} \text{ moléculas}$$

$$5 \text{ g de sílica} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad n \text{ moléculas}$$

$$n = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 5}{60} = 5,0 \cdot 10^{22} \text{ moléculas}$$

Em duas bolinhas serão  $1,0 \cdot 10^{23}$  moléculas ( $2 \cdot 5,0 \cdot 10^{22}$  moléculas). Portanto, a energia cinética por molécula será:

$$e_c = \frac{E_c}{n} = \frac{62,5 \cdot 10^{-6}}{1,0 \cdot 10^{23}} = 62,5 \cdot 10^{-29} \text{ J/molécula}$$

Por meio desses cálculos, fica claro que as energias envolvidas nas interações dos objetos no dia a dia não são capazes de revelar a existência de partículas. A energia por partícula no acelerador ( $4,8 \cdot 10^{-10}$  J) é muito maior que a energia por molécula na bolinha de gude ( $62,5 \cdot 10^{-29}$  J).

## 2.2 Tipos de aceleradores e seu funcionamento

Vimos que nos aceleradores é preciso isolar partículas para, em seguida, acelerá-las e finalmente fazê-las colidir. Existem várias maneiras de projetar um acelerador: cada um com características particulares e adaptadas a objetivos específicos. Um componente básico de qualquer acelerador é a fonte de íons, sendo a ionização dos átomos de hidrogênio a maneira mais fácil de produzi-los. A seguir, é formado um feixe de íons, que é injetado no equipamento para a aceleração e colisão.

Podemos classificar os aceleradores em função de alguns parâmetros:

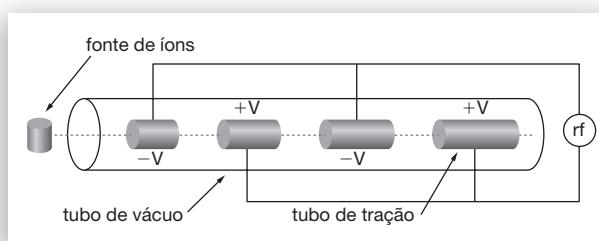
### I) Tipo de partícula acelerada

Em geral os aceleradores aceleram prótons, elétrons ou núcleos de átomos como o ouro. Os elétrons podem ser arrancados de um metal por aquecimento, que é a maneira mais simples de obtê-los. Os prótons podem ser isolados ionizando-se um gás de hidrogênio (na forma  $H_2$ ) por meio de descarga elétrica.

### II) Tipo de trajetória

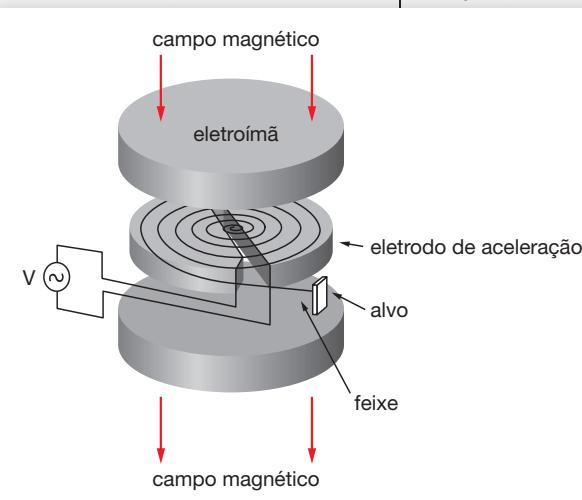
Há basicamente dois meios de acelerar as partículas, fazendo-as descrever uma trajetória retilínea ou circular. Nos **aceleradores lineares**, as partículas são submetidas a uma diferença de potencial e aceleram sob a ação de um campo elétrico.

A outra maneira de acelerar as partículas é fazendo-as descrever uma circunferência, por meio de um campo magnético que as obriga a descrever uma curva e por meio de um campo elétrico que as acelera. Isso acontece em **aceleradores circulares**, que são conhecidos como **cíclotrons** ou **síncrotronos**.



Ilustrações produzidas com base em: MARTIN, Brian R. *Nuclear and Particle Physics: an introduction*. New York: John Wiley & Son, Ltd., 2006.

A vantagem de um acelerador circular sobre um linear é que as partículas dão muitas voltas, recebendo múltiplos impulsos a cada volta. Portanto, os síncrotronos podem fornecer partículas de alta energia sem ter um enorme comprimento. Além disso, o fato de as partículas darem muitas voltas significa que há muitas chances de ocorrer colisão nos lugares onde os feixes de partículas se cruzam.



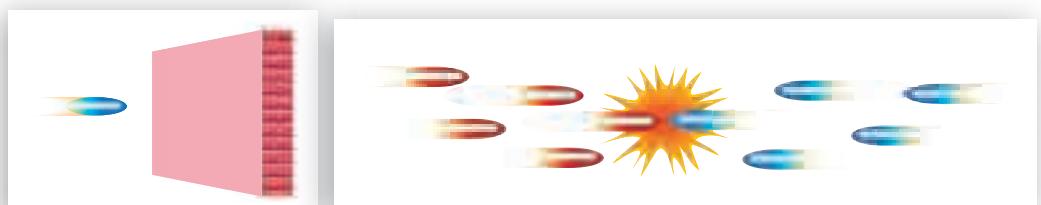
Ilustrações: Editoria de arte

Esquema de um acelerador circular e linear.

### III) Tipo de colisão

O feixe de partículas aceleradas a alta velocidade é o veículo de transporte das altas energias. Há duas maneiras de transferir essa energia, dependendo do tipo de colisão. A colisão pode ocorrer contra um alvo fixo ou fazer que dois feixes, acelerados em sentidos opostos, colidam entre si.

Colisão com um alvo fixo e entre feixes de partículas acelerados em sentidos opostos.



Editoria de arte

LNL/SAPT/Luis/CNPq/MCT



Acelerador circular na Universidade de Campinas.

Ver Orientação 50.

### Exercício resolvido

3



1) c) Não podemos descartar que o desenvolvimento científico envolve interesses econômicos, tecnológicos, políticos e, lembrando que a bomba atômica foi resultado do desenvolvimento científico, podemos também acrescentar interesses bélicos.

UNIDADE 3 RADIAÇÃO E MATÉRIA

No Brasil, existem aceleradores em diversas instituições. Podemos encontrar aceleradores lineares no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro, no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), em São Paulo, e em muitos hospitais. Já os aceleradores circulares podem ser encontrados no Instituto de Energia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, no Instituto de Pesquisas Nucleares (IPEN), em São Paulo, e no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em Campinas.

O que é um acelerador de partículas? Que tipos de aceleradores existem? Um acelerador de partículas é uma máquina que utiliza eletromagnets para acelerar partículas carregadas e aumentar a energia dessas partículas. Estudamos dois tipos de aceleradores, o linear e o circular. As partículas mais utilizadas em aceleradores são elétrons, pósitrons, prótons, antiprotons e íons pesados.

1) (Fuvest-SP) Um consórcio internacional, que reúne dezenas de países, milhares de cientistas e emprega bilhões de dólares, é responsável pelo *Large Hadrons Colider* (LHC), um túnel circular subterrâneo, de alto vácuo, com 27 km de extensão, no qual eletromagnets aceleram partículas, como prótons e antiprotons, até que alcancem 11 000 voltas por segundo para, então, colidirem entre si. As experiências realizadas no LHC investigam componentes elementares da matéria e reproduzem condições de energia que teriam existido por ocasião do *Big Bang*.

- Calcule a velocidade do próton, em km/s, relativamente ao solo, no instante da colisão.  $2,97 \cdot 10^5$  km/s
- Calcule o percentual dessa velocidade em relação à velocidade da luz, considerada, para esse cálculo, igual a 300 000 km/s. 0,99 ou 99%
- Além do desenvolvimento científico, cite outros dois interesses que as nações envolvidas nesse consórcio teriam nas experiências realizadas no LHC.

2) (Fuvest-SP) Com o objetivo de criar novas partículas, a partir de colisões entre prótons, está sendo desenvolvido, no CERN (Centro Europeu de Pesquisas Nucleares), um grande acelerador (LHC). Nele, através de um conjunto de

ímãs, feixes de prótons são mantidos em órbita circular, com velocidades muito próximas à velocidade  $c$  da luz no vácuo. Os feixes percorrem longos tubos, que juntos formam uma circunferência de 27 km de comprimento, onde é feito vácuo. Um desses feixes contém  $N = 3,0 \cdot 10^{14}$  prótons, distribuídos uniformemente ao longo dos tubos, e cada próton tem uma energia cinética  $E$  de  $7,0 \cdot 10^{12}$  eV. Os prótons repassam inúmeras vezes por cada ponto de sua órbita, estabelecendo, dessa forma, uma corrente elétrica no interior dos tubos. Analisando a operação desse sistema, estime:

- A energia cinética total  $E_c$ , em joules, do conjunto de prótons contidos no feixe.  $2,1 \cdot 10^{27}$  eV
- A velocidade  $v$ , em km/h, de um trem de 400 toneladas que teria uma energia cinética equivalente à energia do conjunto de prótons contidos no feixe. 148 km/h

### 3. Dispositivos de detecção de partículas

Já pudemos perceber que nossos olhos não são capazes de detectar a maioria das partículas. Mas a imaginação científica é poderosa e foi capaz de encontrar meios de compensar as limitações de nossa percepção.

Existem muitas maneiras de rastrear as partículas. Em meados dos anos 1920, Robert Andrews Millikan (1868-1953) desenvolveu, no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech, sigla para California Institute of Technology), um equipamento capaz de registrar numa fita de papel as marcações de um eletrômetro, instrumento que consegue revelar a presença das partículas. Em sua maioria, os detectores são instrumentos capazes de detectar o momento em que uma partícula ioniza um átomo. Isso significa que é da interação entre a partícula e um átomo que sabemos da existência e da trajetória dela. Em condições particulares, os íons formados podem ser revelados por rastros fotografados durante o processo de detecção.

Essa é a maneira mais comum de evidenciar a passagem de uma partícula, pelo efeito de ionização que ela causa, no meio por onde se desloca. Mas para que isso aconteça, a partícula precisa ter carga elétrica, pois as partículas neutras não causam ionização e precisam de outros métodos de detecção. A velocidade de uma partícula auxilia a interpretação do rastro deixado. Isso porque, ao aumentar a velocidade das partículas, a ionização do meio diminui e, portanto, é alterado o rastro deixado por elas. Uma partícula que se desloca rapidamente tem menos tempo de interagir com os átomos e deixa um traço com baixa intensidade. Já uma partícula mais lenta tem um tempo maior de interação com o átomo e deixa um traço denso.

A ionização revela a presença de partículas no interior de um plasma. Você já deve ter visto uma foto como a apresentada ao lado. As cargas elétricas produzidas no centro do bulbo se deslocam em direção ao vidro, ionizando o gás. Ao voltar ao seu estado normal, os átomos do gás emitem luz, produzindo um belo espetáculo.

Vamos focalizar nossos estudos em detectores capazes de oferecer um registro do rastro deixado pela partícula.



Clive Streeter/Dorling Kindersley/Getty Images

Os raios observados se devem ao processo de ionização e recombinação dos átomos e elétrons do gás pressurizado no interior do bulbo.

## O cientista no tempo e na história



Bernard Hoffman/Time Life Pictures/Getty Images



CIR Wilson/SPU/Latinstock



Câmara de Wilson e uma das primeiras fotografias dos rastros de partículas ionizadas numa câmara de Wilson, em 1911.

### 3.1 Rastreando as partículas

Os dispositivos mais utilizados na detecção das partículas são aqueles que produzem registros visuais, tanto reais como digitais. Apresentaremos a seguir três deles, que foram muito usados em pesquisas científicas desde 1910. Utilizados em conjunto com câmaras fotográficas ultrarrápidas, esses detectores forneceram “rastros” dos rastros deixados pelas partículas, quando estas ionizam gases e líquidos previamente preparados. No final da seção, apresentaremos os detectores mais modernos utilizados nos novos aceleradores, como o LHC, do CERN.

#### *Câmara de névoa ou de Wilson*

Foi um dos primeiros dispositivos com registro visual que os físicos utilizaram para o estudo das partículas. É composto, basicamente, de um tanque contendo um vapor de água submetido a uma expansão rápida que o torna supersaturado. O

rastro deixado por uma partícula pode ser pensado, de forma análoga, como o risco branco deixado no céu por um avião. Nesse caso, em grandes altitudes, a passagem do avião, e a consequente liberação de gases por suas turbinas, gera condensação do vapor de água da atmosfera evidenciando seu movimento.

#### **Wilson e a câmara de detecção**

Inventada pelo físico britânico Charles Wilson em 1911, a câmara de névoa ou de Wilson, como também ficou conhecida, foi a técnica experimental utilizada nas cinco primeiras décadas do século XX para a detecção de partículas elementares e permitiu o desenvolvimento das primeiras pesquisas físicas nessa área.

Wilson era meteorologista e trabalhava na Universidade de Cambridge, na Inglaterra, onde desenvolveu um estudo sobre a condução de íons nos gases. Seu objetivo era entender a interação da luz solar com as neblinas em picos de montanhas. Ao criar um equipamento para desenvolver sua própria neblina em laboratório – com uma câmara fechada que permitia contrair e expandir o ar em seu interior –, observou que o ar esfriava e se tornava supersaturado e que a umidade se condensava sobre partículas de pó com a rápida expansão e consequente queda da temperatura.

Com o objetivo de eliminar os grãos de poeira, Wilson fez contrair e expandir o ar no interior da câmara sucessivas vezes. Dessa forma, partículas de poeira caiam por causa da ação da gravidade e ficavam presas ao gel que revestia a câmara. Ele aplicou então um campo elétrico entre a base e o teto

da câmera, para que as partículas eletrizadas fossem aprisionadas no teto ou na base da câmera por conta da ação da força elétrica. Sem partículas, com a câmera “limpa”, a rápida expansão do ar deixaria de formar condensação e neblina. Mas não foi isso que aconteceu.

Wilson percebeu que essa neblina poderia ser causada por partículas carregadas vindas do exterior da câmera. Essas partículas arrancavam elétrons das moléculas de ar, e os íons produzidos serviam então como núcleos de condensação. O vapor de água, em excesso dentro da câmera, se condensava em torno desses íons, produzindo os traços que hoje sabemos serem os raios cósmicos.

Em 1927, Wilson recebeu junto com o físico norte-americano Arthur Holly Compton o prêmio Nobel de Física.



Charles Thomson  
Rees Wilson  
(1869-1959).

### Câmara de bolhas

Esse detector utiliza líquido superaquecido (submetido a alta pressão e rapidamente despressurizado levando-o próximo à temperatura de ebulição), em vez do vapor supersaturado. Tal procedimento permite o aumento em mais de mil vezes na densidade da câmera, possibilitando o maior número de colisões entre as partículas ionizantes (interagentes) e os alvos (átomos constituintes do líquido da câmera). As primeiras bolhas se formarão quando uma partícula carregada passar através da câmera produzindo uma fila de íons ao longo do trajeto fazendo o líquido entrar em ebulição. A trajetória da partícula é vista quando se fotografa essa fila de bolhas antes que desapareçam do local onde se formaram (isso dura cerca de 1 milésimo de segundo).

Embora mais precisa que a câmera de névoa, pois permite uma figura completa da interação das partículas com os átomos do líquido, a câmera de bolhas tem uma desvantagem: está limitada à existência do líquido superaquecido, que só é conseguido por meio de uma expansão rápida que precisa acontecer antes da passagem das partículas pela câmera.

A preparação do líquido leva cerca de 1 s, tempo demasiadamente longo na busca de partículas que, para serem detectadas, precisam estar no interior da câmera durante esse processo. Assim, como a passagem das partículas dura apenas alguns milésimos de segundo, isso limita os estudos, pois não é possível saber em que instante uma interação interessante vai ocorrer, levando o processo a depender um pouco da sorte.



Rastros de partículas registrados no scanner de uma câmera de bolhas.

### Glaser e a garrafa de cerveja

A câmera de bolhas, importante detector de partículas, foi desenvolvida pelo jovem físico norte-americano Donald Glaser na década de 1950. Responsável pelo crescimento das pesquisas da Física de Altas Energias, essa brilhante invenção, que permite tornar visíveis os rastros de partículas que passam por um líquido, foi concebida em uma garrafa de cerveja.

Ao abrir uma garrafa de cerveja, a queda na pressão provoca as bolhas e o líquido sobe pela garrafa. Quando temos um líquido a baixa pressão e perto

**O cientista  
no tempo e  
na história**





O físico norte-americano Donald Arthur Glaser (1926) inspeciona a câmara de bolhas.

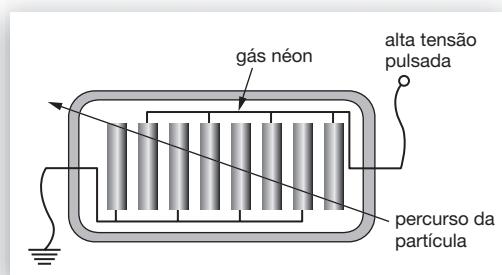
de seu ponto de ebulação, ao baixarmos sua pressão mais rapidamente (expansão), ele permanecerá líquido, mesmo estando acima de seu ponto de ebulação. Dizemos então que está superaquecido, o que não significa que está com a temperatura elevada. Trata-se de um estado instável; por isso, quando partículas carregadas atravessam o líquido, desencadeia o processo de fervura em que ionizam os átomos do líquido ao longo do caminho da partícula.

O primeiro teste foi efetuado por Glaser no outono de 1952, na Universidade de Michigan, onde ele trabalhava. Apesar de ser rápido, o processo pôde ser fotografado e repetido. O líquido utilizado foi o éter etílico e sua primeira câmara de bolhas tinha 3 centilitros de líquido. Poucos anos mais tarde, foi construída uma câmara com 50 cm de largura, 40 cm de profundidade e 180 cm de

comprimento, e o líquido utilizado foi o hidrogênio. Por essa técnica, Glaser recebeu o prêmio Nobel de Física em 1960.

### Câmara de faísca

A câmara de faísca foi desenvolvida para detectar permanentemente os rastros das partículas. Consiste de placas paralelas de metal separadas por alguns milímetros e imersas num gás inerte, como o néon. Quando uma partícula carregada adentra o interior da câmara, deixa uma linha de átomos ionizados no gás. APLICANDO-SE UMA ALTA TENSÃO ALTERNADA NAS PLACAS, O GÁS SUBMETIDO AO CAMPO ELÉTRICO COMEÇA A FAISCAR AO LONGO DA LINHA IONIZADA. Essa situação é muito semelhante aos relâmpagos numa tempestade.



Editora de arte



CERN/SPL/Latinstock

Esquema de uma câmara de faísca.

Câmara de faísca em operação no CERN em 1969.

3

## Por dentro do conceito



### Aceleradores e detectores no CERN

Fundado em 1954, o CERN é um dos maiores centros de pesquisa científica do mundo onde se localiza os maiores e mais complexos instrumentos científicos para estudo das partículas elementares. Oito aceleradores de partículas compõem o complexo acelerador do CERN, o que permite obter energias cada vez maiores.

Uma sucessão de aceleradores é responsável por aumentar a velocidade de um feixe de partículas antes de injetá-lo na sequência seguinte. O es-

quema indica as sequências de aceleradores para colisão entre prótons, íons, nêutrons, antiprotons, neutrinos e elétrons e para conversão de prótons em antiprotons.

Por exemplo, prótons são obtidos por meio da remoção de elétrons dos átomos de hidrogênio e então injetados no Acelerador Linear de Partículas (LINAC 2) para o Intensificador Síncrotron de Prótons (PS Booster, Proton Synchrotron Booster). Quando esse feixe atinge a energia requerida, é então injetado no Síncrotron de Próton (PS, Proton Synchrotron), seguido pelo Supersíncrotron de Próton (SPS, Super Proton Synchrotron). Em seguida, é dividido e injetado finalmente no Grande Acelerador de Hâdrons (LHC, Large Hadron Collider) em sentidos diferentes. Aí circulam por 20 min até atingir a velocidade e a energia máxima, 7 TeV ( $7 \cdot 10^{12}$  eV). Convergem depois para um dos seis detectores onde ocorrem as colisões. Cada detector, também conhecido como experimento, tem um propósito específico e é distribuído ao longo do LHC.

#### • ALICE

Como era a matéria no primeiro segundo de vida do Universo? Esse experimento visa explorar as condições do primeiro instante do Universo, o estágio primordial da matéria, por meio da colisão de íons de ferro a 1 300 TeV, que se espera desfaçam-se em uma mistura de quarks e glúons.

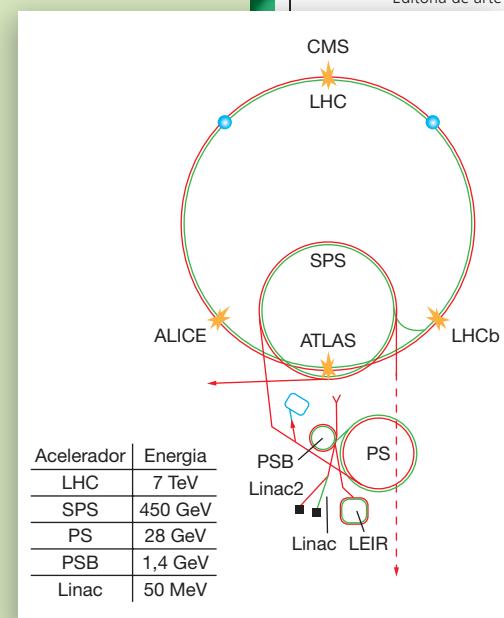
Esse detector é constituído de um espectrômetro de múons e uma Câmara de Projeção de Tempo (TPC). Inventada por David Nygren, essa câmara coleta informações suficientes do movimento de partículas carregadas que permitem ao computador reconstruir uma imagem tridimensional dos rastros.

Esquema do detector ALICE.

#### • ATLAS e CMS

Esses detectores têm objetivos gerais de pesquisa. Por exemplo, destinam-se a responder perguntas como: existem princípios desconhecidos na natureza? Como podemos resolver o mistério da energia escura? Existem dimensões extras do espaço? O que é a matéria escura? Como o Universo veio a ser?

Com 46 m de comprimento, 25 m de largura e 25 m de altura, o ATLAS é o maior detector do CERN. Em seu interior, há um rastreador que, com uma precisão de cerca de um centésimo de milímetro, registra as posições das partículas eletricamente carregadas, permitindo que computadores reconstruam suas trilhas e revelem sua dinâmica. Na câmara seguinte, projetada para detectar a energia de muitos tipos de partículas, há um calorímetro de duas partes. A primeira parte registra as energias de elétrons e fôtons e a segunda as de hâdrons. Por último, há um espectrômetro, que mede o momento de cada muon.

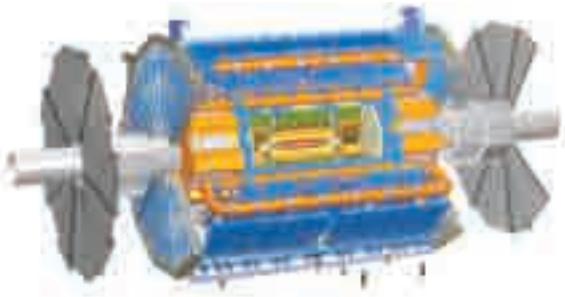


Esquema dos aceleradores e dos detectores do CERN.

Luís Moura



Ilustrações produzidas com base em: European Organization for Nuclear Research. Disponível em: <<http://public.web.cern.ch/Public/en/LHC/LHCExperiments-en.html>>. Acesso em: 30 abr. 2010.

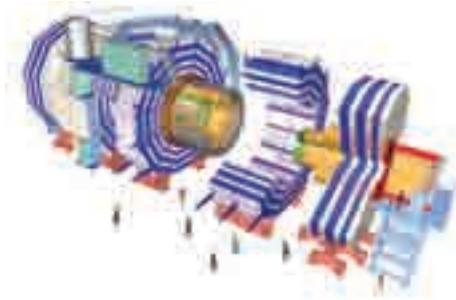


Ilustrações produzidas com base em: European Organization for Nuclear Research. Disponível em: <http://public.web.cern.ch/Public/en/LHC/LHCExperiments-en.html>. Acesso em: 30 abr. 2010.

Esquema do detector ATLAS.

Luis Moura

Esquema do detector CMS.



Eduardo Borges



Esquema do detector LHCb.

#### • LHCb

Por que não há mais antimateria? Esse experimento foi projetado para estudar o decaimento de mésons  $\bar{B}$ , contendo partículas de quarks beaty, a fim de investigar a assimetria entre matéria e antimateria.

O LHCb conta com uma série de subdetectores em torno do ponto de colisão, numa extensão de 20 m, para detectar todos os tipos de quarks que venham a aparecer antes de decaírem.



Detector TOTEM.

#### • TOTEM

Neste detector, os cientistas estudam as colisões próton-próton inelásticas (em que um próton sobrevive e outro se desintegra e produz outras partículas) e elásticas (em que ambos os prótons sobrevivem e se desviam ligeiramente um do outro). Medidas dessas colisões permitem determinar o tamanho dos prótons e o grau de precisão das colisões produzidas pelo acelerador.

Com o objetivo de atender à demanda de partilha automática de informações entre cientistas trabalhando em diferentes universidades e institutos de todo o mundo, Tim Berners-Lee, cientista do CERN, inventou a tecnologia *world wide web* ([www](http://www)) em 1989, atualmente difundida em nosso cotidiano na internet. Hoje, cientistas de cerca de 60 países compõem essa comunidade e analisam as partículas criadas nestas colisões a partir dos dados coletados pelos detectores.

O que dizer de partículas neutras? Como podem ser detectadas? Partículas neutras poderiam passar pelo rastreador, pelos calorímetros e pelo espectrômetro de mísseis inteiramente desapercebidas. No entanto, somando os momentos medidos para todas as outras partículas, pode-se inferir sua existência.

Mais compacto, o CMS é também mais pesado, 12 500 toneladas, em parte por causa do maior ímã supercondutor para um detector já construído. Sua energia de 2,5 milhões de joules seria suficiente para derreter 18 toneladas de ouro.

Com relação aos dispositivos de detecção, responda:

- O que há de semelhante entre a maioria dos detectores de partículas?
- O que os avanços na câmara de bolhas permitiu no estudo das partículas? Como é possível detectar partículas neutras, que não deixam rastros de ionização?
- Na maioria dos detectores, a existência e a trajetória de uma partícula são detectadas pela interação dessa partícula com os átomos do detector, em geral, pela ionização destes.
- A câmara de bolhas permitiu aos cientistas analisar figuras completas da interação das partículas com os átomos do líquido no interior da câmara. A aplicação da lei de conservação de energia e da quantidade de movimento permite inferir a existência das partículas neutras. Ou seja, somando os momentos medidos para todas as outras partículas que deixaram rastros, determina-se a presença de partículas neutras.

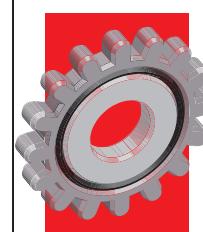
## Exercício resolvido

**1)** A quais questões os cientistas que trabalham nos aceleradores buscam responder? [Resposta no final do livro.](#)

**2)** Por que a câmara de detecção de Wilson é também conhecida como câmara de névoa? [Resposta no final do livro.](#)

## Exercícios propostos

## Técnica e tecnologia



Philippe Psaila/SPL/Alamy Stock

Cientista verificando a radioatividade de uma amostra de trigo com um contador Geiger-Miller.

Luis Moura



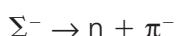
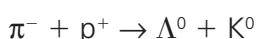
Esquema de um detector Geiger-Miller.

## 4. Leis de conservação

Dissemos anteriormente que alguns dos conceitos usados para lidar com os corpos à nossa volta também servem, com algumas ressalvas, para tratar das partículas subatômicas. O mesmo vale para leis e princípios da Física. Vamos agora aplicar algumas leis de conservação, que já conhecemos, nas reações entre partículas e apresentar outras leis próprias às partículas subatômicas.

### *Conservação da carga elétrica*

Uma das leis mais importantes no estudo das partículas é o princípio de conservação da carga elétrica. Quando ocorre uma reação, isto é, a transformação de uma ou mais partículas em outras, a quantidade de carga total antes e depois da reação deve ser a mesma. Veja estes exemplos:



No primeiro caso, um píon negativo interage com um próton positivo. A quantidade total de carga elétrica é zero, pois a soma de um inteiro positivo com um negativo é nula:  $(+1) + (-1) = 0$ . Verificando o resultado da reação, temos duas partículas, um lambda e um kaon, neutras. Uma vez que ambas são neutras, como indicado pelo índice zero, o resultado também será nulo ( $0 + 0 = 0$ ).

No segundo caso, a partícula inicial é a sigma, negativa. Após a reação, um decaimento espontâneo, a sigma se transforma em um nêutron, sem carga, e um píon negativo. Vemos que em ambos os casos a quantidade de carga é conservada, pois o valor inicial é igual ao valor final.

### *Conservação da massa-energia*

Ao longo do curso, vimos que uma das principais leis de conservação é que, em sistemas fechados, a energia se conserva, ou seja, a quantidade total da energia antes e depois de determinado evento deve permanecer constante, igual. Essa lei continua válida para as partículas, mas cuidado: a massa pode ser transformada em energia, e vice-versa.

Assim, para partículas livres, podemos escrever que a energia total é dada pela expressão:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{massa-repozo}} + E_{\text{cinética}}$$

em que a energia de repouso está associada à massa.

$$E_{\text{total}} = m_0 c^2 + E_{\text{cinética}}$$

### *Conservação da quantidade de movimento*

Além da conservação da massa-energia e da carga, a conservação da quantidade de movimento é uma lei válida para as partículas elementares.

Vale lembrar que essa grandeza física é expressa na sua forma mais genérica em termos de vetores e relaciona a evolução de um sistema físico antes e depois de dado evento, por meio da seguinte expressão:

$$\vec{Q}_{\text{antes}} = \vec{Q}_{\text{depois}}$$

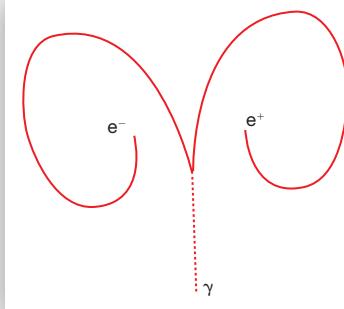
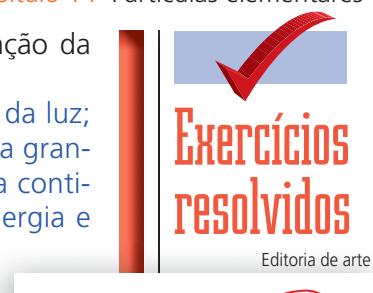
- 1)** Que cuidado deve ser tomado quando se aplica a lei de conservação da energia às partículas elementares?

As partículas se deslocam em alta velocidade, próximas à velocidade da luz; portanto, precisam ser tratadas relativisticamente. Sendo a massa uma grandeza relativística associada à energia, a lei de conservação da energia continua válida para as partículas, a massa pode ser transformada em energia e vice-versa.

- 2)** Qual deve ser a energia mínima de um fóton que, ao interagir com um material, cria um par elétron-pósitron? Desenhe a trajetória dos fótons e do par elétron-pósitron.

A quantidade de energia necessária para a criação do par elétron-pósitron é dada pela equação de Einstein,  $E = m_0 c^2$ , em que  $E$  será igual à soma da massa das partículas multiplicada pela velocidade da luz. Como  $m_{\text{elétron}} = m_{\text{pósitron}}$ , temos:

$$E = 2m_0 c^2 = 2 \cdot 0,511 \text{ MeV}/c^2 \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$



- 1)** Determine a energia mínima do fóton para que as seguintes reações ocorram:

- a)  $\gamma \rightarrow \pi^- + \Lambda$  1115 140 MeV  
 b)  $\gamma \rightarrow p + p^-$  1876,52 MeV  
 c)  $\gamma \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  211,4 MeV

- 2)** Qual das reações apresentadas a seguir pode ocorrer, ou seja, quais não violam o princípio de conservação de carga elétrica?

- |  |  |
|--|--|
| a) $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ | e) $n^+ + \pi^0 \rightarrow p^+ + \pi^+$ |
| b) $K^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$ | f) $K^+ + \pi^- \rightarrow p^+ + n$     |
| c) $\pi^0 + n \rightarrow K^+ + \Sigma^-$  | g) $n \rightarrow p^+ + e^-$             |
| d) $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$        |  |

As reações apresentadas em a, c e g não violam o princípio de conservação de carga elétrica e podem ocorrer. As reações apresentadas em b, d e e não podem ocorrer.

- 3)** Analise as transformações a seguir e veja qual delas respeita a conservação massa-energia. Nas reações a, d, e e f, podemos supor que parte da massa inicial se transformou

- a)  $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}_e$   
 b)  $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu_e$   
 c)  $p + \beta^- \rightarrow n + \nu_e$

- d)  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$   
 e)  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$   
 f)  $\pi^0 \rightarrow \mu^- + e^+ + \nu_e$

em energia cinética e que houve conservação da massa de energia. As reações b e c violam a conservação da massa de energia, uma vez que a massa de repouso é maior no final da transformação.

## Exercícios propostos



## 5. Identificando partículas em fotografias

Ser capaz de ver os traços de uma partícula nos detectores é uma das necessidades de um físico de partículas. Veja, na fotografia ao lado, que o registro do rastro evidencia que existem partículas se deslocando. Mas, logo após a primeira observação, podemos nos perguntar: Quantas são? Quais são essas partículas?

Professor, esta figura apresenta um elétron numa câmara de névoa que, sob a ação de um campo magnético, espira, gira 36 vezes. Peça aos alunos que a observem e tentem entender o que está acontecendo.



Omkron/Photoresearchers/Latinstock

Rastro deixado por uma partícula registrada em uma câmara de névoa.

**Na verdade, o nêutron foi descoberto em 1932 depois do pósitron e do neutrino, mas isso não invalida o exercício proposto.**

**Ver Orientação 51.**



### 3

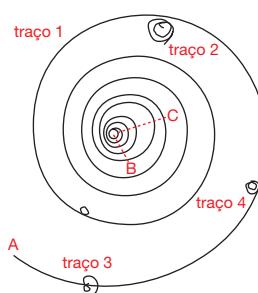
O cotidiano da Física de Partículas se dividia em obter bons registros e interpretá-los à luz das teorias vigentes. Vamos agora, depois do que já discutimos sobre as partículas e os modos de detectá-las, avançar na interpretação desses registros. Para dar um pouco mais de realismo científico, podemos nos imaginar na época em que elétrons, prótons e nêutrons já tivessem sido detectados, mais ou menos por volta dos anos 1930.

Alguém poderia se perguntar então: existem outras partículas além dessas? Apesar de os cientistas ainda não saberem disso naquele momento, a resposta é *sim*. Acontece que as outras partículas têm propriedades semelhantes, em muitos aspectos, com os prótons, os nêutrons e os elétrons. Além disso, a maior parte dessas partículas tem um tempo de vida muito curto; logo, muitas delas só são detectadas em condições específicas e em reações de altíssimas energias. O estudo do caminho percorrido pela partícula na câmara de bolhas foi o que permitiu descobrir suas características, como massa e carga elétrica.

Como vimos, as partículas carregadas deixam rastros ao passar no interior de uma câmara de bolhas ou câmara de névoa. Vamos agora aprender a decifrar fotografias tiradas numa dessas câmaras.

A figura a seguir representa o traço deixado por uma partícula ao penetrar no interior de uma câmara de bolhas (foto obtida por meio de filmes fotográficos analógicos). Para realizarmos essa tarefa, precisamos conhecer alguns dados do experimento no qual a fotografia foi obtida.

Editoria de arte



#### Contexto

A fotografia escolhida foi aquela em que a partícula se desloca no plano da folha.

**Equipamento:** câmara de bolhas

**Região:** próxima à superfície da Terra

**Interação:** campo magnético com direção perpendicular à folha e "saindo" (◐), cuja intensidade é  $1,2 \text{ Wb/m}^2$

#### Analisando os rastros deixados pelas partículas

**a) Quantas partículas carregadas estão presentes na foto?**

Vamos lá! Sabemos que os traços registrados pela fotografia de uma câmara de bolhas indicam a ionização causada por uma partícula carregada. Note que existem vários traços. Descartando borões e manchas, um deles chama nossa atenção: um de grande extensão que ocupa quase toda a fotografia e se parece com uma espiral (traço 1). Semelhante a ele, porém de extensão menor, existem mais três traços em espiral (traços 2, 3 e 4). Assim, podemos estimar que foram registradas quatro partículas carregadas.

**b) Por onde as partículas adentram a câmera?**

O traço 1 parece indicar que essa partícula entra na câmara de bolhas pelo lado esquerdo inferior da foto, ponto A, e começa a descrever uma espiral com direção à parte superior da fotografia.

As outras partículas, que aparecem dentro da câmara, provavelmente foram criadas em seu interior e, por enquanto, não vamos tratar delas.

**c) Por que a trajetória da partícula 1 é curva?**

No Capítulo 7, discutimos a trajetória de uma partícula carregada ao penetrar em uma região onde há campo magnético. Na ocasião, mostramos que ela sofre ação

de uma força magnética, perpendicular à sua velocidade, que age como uma resultante centrípeta, descrevendo assim um movimento circular.

Assim, da interação da partícula carregada em movimento com o campo magnético imposto pelo equipamento, surge uma força magnética que altera a trajetória da partícula a cada instante.

**d) Qual é a carga da partícula?**

Esta pergunta é fácil. Usando a regra da mão esquerda, podemos verificar que a carga da partícula 1 é negativa. Nesse caso, trata-se de um elétron.

Considerando o campo perpendicular à folha do papel e a orientação de  $\mathbf{v}$  no ponto A, podemos notar que, se a partícula fosse positiva, a força magnética seria para baixo. Considerando a primeira parte do traço 1, em que a espiral é ascendente, temos que, para que a força seja no sentido visto na questão anterior, a carga precisa ser negativa.

**e) Qual a quantidade de movimento inicial do elétron?**

Sabemos que a trajetória curva do elétron se deve à ação da força magnética. Portanto, podemos escrever:

$$F_{\text{mag}} = m \frac{v^2}{R} \quad (1)$$

em que o  $R$  é o raio de curvatura,  $v$  a velocidade inicial e  $m$  a massa relativística da partícula.

Essa mesma força, oriunda da interação da carga elétrica em movimento com o campo magnético, pode ser escrita como:

$$F_{\text{mag}} = qvB \quad (2)$$

em que  $q$  é o módulo da carga da partícula, no caso o elétron ( $e$ ), e  $B$  é a intensidade do campo magnético.

Igualando as expressões (1) e (2), temos:

$$m \frac{v^2}{R} = evB$$

$$mv = eBR \quad (3)$$

Lembre-se de que o produto  $mv$  é a quantidade de movimento  $Q$ :

$$Q = eBR \quad (4)$$

Para sabermos o valor de  $R$ , podemos medi-lo diretamente na figura, usando uma régua e tomando o ponto de entrada na câmara (ponto A) e o centro da espiral (ponto B):

$$R = 3,6 \text{ cm} = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

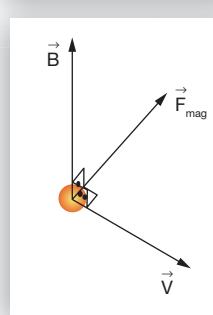
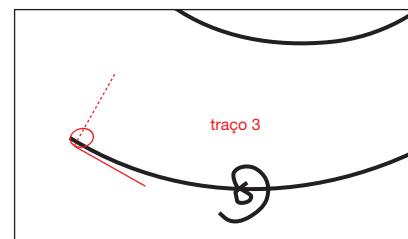
Sendo  $B$  a intensidade do campo magnético ( $B = 1,2 \text{ Wb/m}^2$ ),  $e$  a carga elétrica ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) e  $R$  o raio ( $3,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ ), podemos calcular a quantidade de movimento da partícula em MeV pela expressão:

$$Q = 3 \cdot 10^2 \cdot BR \quad (5)$$

Para obter a expressão na forma apresentada, recorre-se a uma manipulação matemática que leva em consideração o aspecto dimensional das grandezas envolvidas. Portanto:

$$\begin{aligned} Q_{\text{inicial}} &= 3 \cdot 10^2 \cdot 1,2 \cdot 3,6 \cdot 10^{-2} \\ Q_{\text{inicial}} &= 12,97 \text{ MeV} \end{aligned}$$

**f) Qual a quantidade de movimento da partícula na última volta? Por que a espiral se fecha com o movimento da partícula?**



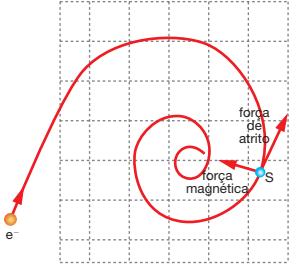
Ilustrações: Editoria de arte

Detalhe da câmara de bolhas. A linha pontilhada indica a direção e o sentido da força magnética e a linha cheia indica a direção e o sentido da velocidade.

### 3

## Exercício resolvido

Editoria de arte



(UFMG) A figura mostra um elétron que entra em uma região onde duas forças atuam sobre ele: uma deve-se à presença de um campo magnético; a outra resulta de interações do elétron com outras partículas e atua como uma força de atrito. Nessa situação, o elétron descreve a trajetória plana e em espiral representada na figura.

Despreze o peso do elétron.

- Represente e identifique as forças que atuam sobre o elétron no ponto S.
- Determine a direção e o sentido do campo magnético existente na região sombreada. Explique seu raciocínio.
  - A força de atrito possui a mesma direção e sentido contrário ao da velocidade da partícula. A força magnética é perpendicular à velocidade e a velocidade é sempre tangente à trajetória da partícula.
  - Por meio da regra da mão esquerda, para a força magnética indicada e uma velocidade tangente à trajetória, temos que o campo magnético é perpendicular ao plano da figura orientado para dentro deste ( $\otimes \vec{B}$ ).

Vamos primeiro calcular a quantidade de movimento do elétron na última volta. Para tanto, usaremos a expressão acima, mas com raio menor, agora considerando a distância entre os pontos B e C.

Usando novamente a régua, obtemos o valor de aproximadamente 0,1 cm. Temos assim:

$$R = 0,1 \text{ cm} = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Podemos então utilizar a expressão (5) para efetuar o cálculo da quantidade de movimento final da partícula:

$$Q_{\text{final}} = 3 \cdot 10^2 \cdot 1,2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2}$$

$$Q_{\text{final}} = 0,36 \text{ MeV}$$

Comparando os resultados, notamos que houve uma redução de cerca de 36 vezes no valor da quantidade de movimento. Isso significa que a quantidade de movimento da partícula não se conserva (lembre-se de que essa lei de conservação se refere ao sistema) e explica o fechamento da espiral.

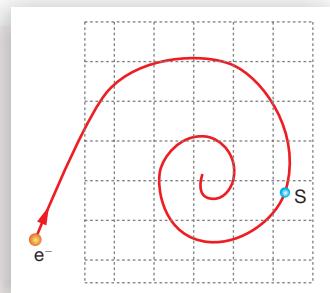
A espiral se fecha, pois o elétron dissipava energia em seu movimento por causa da interação da partícula com o hidrogênio da câmara de bolhas, o que é verificado pela redução de sua quantidade de movimento. Isso faz que a força magnética agindo sobre ele seja capaz de curvar mais a trajetória do elétron. No final, ele provavelmente é capturado por algum átomo de hidrogênio presente no líquido do interior da câmara.



Editoria de arte

Podemos observar outro exemplo de fotografia de uma câmara de bolhas, mas dessa vez, por ser muito complexo, não faremos cálculos. Note na fotografia ao lado um antiproton que entra pela parte inferior e colide com um próton (em repouso), aniquilando-se. Dessa reação, oito píons ( $\pi$ ) foram produzidos na aniquilação. Um deles, na parte mais inferior da fotografia, decaiu em um muôn (muon positivo,  $\mu^+$ ) e um neutrino ( $\nu$ ).

As trajetórias dos píons positivos e negativos curvam-se de formas opostas no campo magnético.

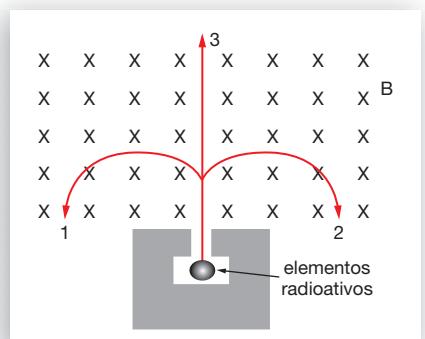


Editoria de arte

(Vunesp-SP) Uma mistura de substâncias radioativas encontra-se confinada em um recipiente de chumbo, com uma pequena abertura por onde pode sair um feixe paralelo de partículas emitidas. Ao saírem, três tipos de partículas, 1, 2 e 3, adentram uma região de campo magnético uniforme  $\vec{B}$  com velocidades perpendiculares às linhas de campo magnético e descrevem trajetórias conforme ilustradas na figura.

Considerando a ação de forças magnéticas sobre cargas elétricas em movimento uniforme, e as trajetórias de cada partícula ilustradas na figura, pode-se concluir com certeza que

- a) as partículas 1 e 2, independentemente de suas massas e velocidades, possuem necessariamente cargas com sinais contrários e a partícula 3 é eletricamente neutra (carga zero).
- b) as partículas 1 e 2, independentemente de suas massas e velocidades, possuem necessariamente cargas com sinais contrários e a partícula 3 tem massa zero.
- c) as partículas 1 e 2, independentemente de suas massas e velocidades, possuem necessariamente cargas de mesmo sinal e a partícula 3 tem carga e massa zero.
- d) as partículas 1 e 2 saíram do recipiente com a mesma velocidade.
- e) as partículas 1 e 2 possuem massas iguais, e a partícula 3 não possui massa.



## Exercício proposto



## 6. Três partículas especiais: pósitron, píon e os raios cósmicos

### 6.1 As antipartículas e a descoberta do pósitron

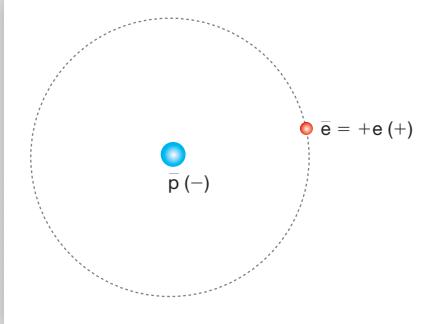
Ver Orientação 52.

Mario Pita

Imagine-se andando na rua. De repente, você olha para o lado e vê, na outra calçada, uma pessoa muito parecida com você, mas uma característica nela é oposta: a repartição do cabelo está invertida, por exemplo. Talvez você, assim como qualquer um, fique espantado e assustado, perguntando como é possível acontecer isso, pois sabemos que essa situação é praticamente impossível de ocorrer no nosso dia a dia. Mas não é impossível com as partículas elementares! A ideia de partículas quase idênticas, opostas somente em uma propriedade, começou a ser formulada em 1928, quando o inglês Paul Dirac (1902-1984) elaborou uma expressão relativística para a função de onda do elétron.

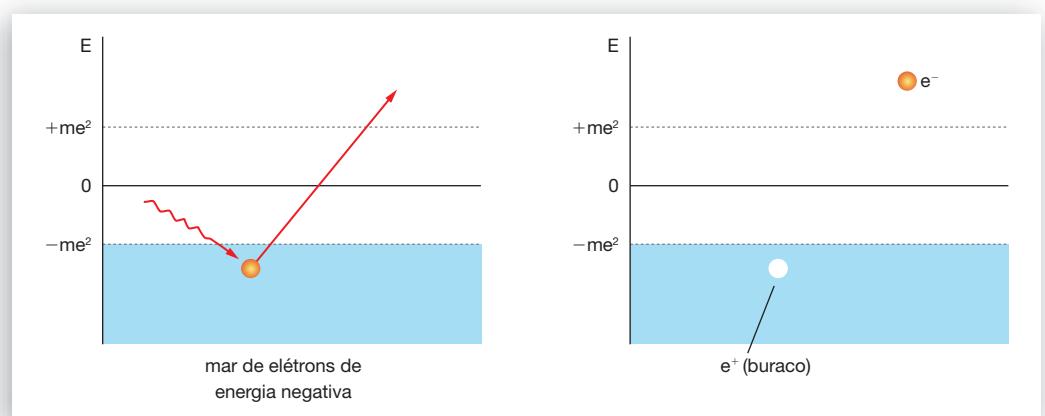
Dirac notou que essa equação admitia duas soluções, uma com energia positiva e a outra com energia negativa, que considerou em não descartá-la. Mas, ao





não fazer isso, se confrontou com uma questão: dada à tendência dos sistemas físicos de evoluírem para estados de energia mínima, os elétrons deveriam ir para estados cada vez mais negativos, sem nunca se estabilizar. Para solucionar esse problema, Dirac postulou que todos os estados negativos de energia já estariam ocupados por elétrons. Dessa forma, o princípio da exclusão de Pauli, princípio segundo o qual duas partículas idênticas não podem ocupar o mesmo nível de energia, impediria que os elétrons dos estados positivos transitasse para os estados negativos já ocupados, estabilizando os sistemas em energias mais elevadas. Dessa forma, seriam observados apenas efeitos, quando um elétron, que ocupa um dos estados negativos, fosse excitado e transitasse para um estado positivo, deixando um “buraco”. Esse buraco se comportaria como uma partícula de carga positiva e energia positiva.

Representação inicial do conceito de antipartícula.



Edição de arte

O candidato a ser essa partícula deveria ser o próton, que na época era a única partícula positiva conhecida. No entanto, a equação previa que essa partícula deveria ter a mesma massa do elétron. O mistério estava armado: a teoria parecia indicar a existência de uma nova partícula.

A interpretação de Dirac foi parcialmente validada em 1932, quando o americano Carl David Anderson (1905-1991) detectou experimentalmente partículas com a mesma massa do elétron, porém de carga positiva. Elas foram denominadas **pósitron** ( $e^+$ ).

No final da década de 1940, a ideia inicial de Dirac foi abandonada, com o desenvolvimento da Eletrodinâmica Quântica por Richard Feynman (1918-1988) e Ernst Stueckelberg (1905-1984), que propuseram a ideia de antipartículas. Para eles, para cada partícula existe uma antipartícula com a mesma massa e carga de sinal contrário. Assim, a nova teoria previa também antiprotons e antineutrons, por exemplo. Essas partículas puderam ser detectadas respectivamente em 1955 e 1956, com a construção de aceleradores mais potentes.

A característica mais notável que envolve uma antipartícula é que, quando encontra sua partícula equivalente, ambas se aniquilam, transformando-se em energia. Hoje em dia, a produção de anti-hidrogênio (antiproton + pósitron) é rotineiramente feita para pesquisa em grandes aceleradores.

Na tabela a seguir, apresentamos alguns exemplos de antipartículas. Você pode comprovar, nas tabelas anteriores, que apenas a carga elétrica dessas partículas é contrária à da partícula original. O símbolo das antipartículas é indicado por um traço horizontal sobre o símbolo da partícula original.

Nome (símbolo)	Ano de detecção	Carga elétrica	Spin	Massa	Vida média (s)
pósitron ( $e^+$ )	1932	+1	$\frac{1}{2}$	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	estável
antimúon ( $\bar{\mu}^-$ )	1937	+1	$\frac{1}{2}$	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	$2,20 \cdot 10^{-6}$
antitau ( $\bar{\tau}^+$ )	1975	+1	$\frac{1}{2}$	1 777 GeV/c <sup>2</sup>	$3,0 \cdot 10^{-13}$
antineutrino do elétron ( $\bar{\nu}_e$ )	1956	0	$\frac{1}{2}$	< 3 eV/c <sup>2</sup>	estável
antineutrino do mûon ( $\bar{\nu}_\mu$ )	1962	0	$\frac{1}{2}$	< 0,17 MeV/c <sup>2</sup>	estável
antineutrino do tau ( $\bar{\nu}_\tau$ )	2000	0	$\frac{1}{2}$	< 18 MeV/c <sup>2</sup>	estável
antipróton ( $\bar{p}$ )	1955	-1	$\frac{1}{2}$	938,3 MeV/c <sup>2</sup>	estável
antinêutron ( $\bar{n}$ )	1956	0	$\frac{1}{2}$	939,6 GeV/c <sup>2</sup>	no núcleo: estável livre: 15 min
antilambda ( $\bar{\lambda}$ )	1958	0	$\frac{1}{2}$	1 115 GeV/c <sup>2</sup>	$2,6 \cdot 10^{-10}$

Fonte de pesquisa: CLOSE, F.; MARTEN, M.; SUTTON, C. *The particle odyssey: a journey to the heart of matter*. New York: Oxford University Press, 2002.

A ideia de antimateria é estranha e parece ir contra tudo que nós conhecemos, ainda mais porque o Universo todo parece ser inteiramente composto de matéria.

Ver Orientação 53.

## 6.2 O píon (mésion $\pi$ ) e o contexto da Ciência brasileira

Uma das partículas que interagem entre prótons e nêutrons no interior do núcleo atômico chama-se **píon** ( $\pi$ ) ou **mésion  $\pi$** . Foi proposta teoricamente pelo físico japonês H. Yukawa, em 1937, e detectada somente em 1947. Como possui um curto raio de ação e sua massa é de cerca de 135-140 Mev, sua detecção foi difícil e constituiu um enigma para os cientistas por mais de dez anos. Essa seria mais uma partícula descoberta pelos cientistas, como tantas vezes aconteceu na primeira metade do século XX, se não fosse por um fato particular: o físico brasileiro César Lattes (1924-2005) foi um dos principais envolvidos na sua detecção. Tal fato contribui para o grande desenvolvimento da Física no Brasil pós-guerra. Dentre os trabalhos relacionados à detecção do mésion  $\pi$ , dois se destacaram, tanto pela importância para a Física de Partículas quanto pela repercussão internacional. Um dos trabalhos constava da detecção da partícula na natureza por meio de raios cósmicos; o outro da detecção do píon produzido artificialmente em um acelerador de partícula. A descoberta do mésion  $\pi$  rendeu ao coordenador da equipe de pesquisa experimental, o inglês Cecil Powell (1903-1969), o prêmio Nobel de Física em 1950.

José Leite Lopes (esquerda) e César Lattes na Unicamp, Campinas, SP, 1987.

Cesare Mansueto Giulio Lattes nasceu em Curitiba, Paraná, e graduou-se em Matemática e Física na Universidade de São Paulo, em 1943. Lattes fez parte de um grupo de jovens estudantes que foram completar seus estudos em centros importantes da Europa. Assim, foi levado a Bristol, Inglaterra, em 1946, por Giuseppe Occhialini (1907-1993), com quem já havia colaborado no Brasil construindo câmaras de detecção de partículas. Occhialini, que havia sido professor na Universidade de São Paulo em 1937, seguiu posteriormente, em 1944, para Bristol para trabalhar com Powell.



Luz Carlos Murauksas/Folhapress

A foto ao lado, obtida nos Pirineus por Powell e Occhialini, é um dos primeiros registros do méson  $\pi$ .



C. Powell, P. Occhialini / SPL/latinstock

[Ver Orientação 54.](#)

Nessa época, o laboratório de Powell estava recrutando alunos, mas por conta do incentivo do governo inglês no esforço de guerra os jovens cientistas ingleses não se interessaram em participar de trabalhos dessa natureza. Foi então que Occhialini sugeriu a Powell que recrutasse o brasileiro.

A grande ideia de Lattes foi identificar que o composto tetraborato de sódio (bórax) misturado às emulsões era capaz de alongar o tempo de retenção das imagens fotográficas. Isso viabilizou as exposições de longa duração, necessárias à detecção de partículas produzidas por raios cósmicos. Depois de Occhialini ter feito uma exposição frustrada das chapas nos Pirineus, a 2 800 m de altitude, Lattes expôs as chapas no monte Chacaltaya, nos Andes bolivianos, a 5 500 m de altitude (mais perto do topo da atmosfera e com ar mais rarefeito) e detectou rastros do píon ou méson  $\pi$  deixados nas emulsões.

Os eventos registrados na figura acima, descobertos pelo grupo em que trabalhou Lattes, tratavam da nova partícula. Esses eventos não poderiam ser atribuídos a qualquer radiação conhecida na época: não poderiam ser prótons, que são partículas estáveis; não poderiam ser raios X ou raios gama, que também não deixam nenhuma trajetória marcada; mas sim pontos isolados sem conexão geométrica entre eles.

Logo, as novas partículas foram batizadas como méson  $\pi$  e méson  $\mu$ .

Os trabalhos feitos em Bristol com raios cósmicos, embora tenham sido capazes de evidenciar a existência do píon, não foram suficientes para demonstrar que fosse a partícula proposta por Yukawa, responsável pelas interações nucleares. Os mésons  $\pi$  não existem normalmente no interior dos núcleos, eles são criados e emitidos durante colisões de projéteis externos com os núcleos.

A demonstração experimental conclusiva foi realizada em 1948 por Eugene Gardner (1913-1950) e Lattes ao acelerarem partículas alfa de 380 MeV utilizando um sincrociclotron da Universidade da Califórnia, em Berkeley, EUA. As partículas  $\alpha$ , ao incidirem sobre os prótons e os nêutrons de um átomo de carbono, produziram os mésons  $\pi$ . Suas trajetórias foram registradas em emulsões nucleares colocadas no interior do equipamento. Por mais de um ano os físicos de Berkeley tentaram detectar os mésons, mas não conseguiram por desconhecimento do método apropriado de utilização das emulsões nucleares e porque procuravam uma partícula mais leve.

Dessa forma, César Lattes e o méson  $\pi$  foram considerados pela opinião pública brasileira um símbolo de esperança coletiva, uma vez que a Física em meados do século XX estava associada à ideia de progresso e se traduzia como aliada na busca do desenvolvimento.



Lawrence Berkeley National Laboratory/SPL/latinstock

César Lattes (esquerda) e Eugene Gardner.

## Método fotográfico (emulsões nucleares)

Ao contrário da câmara de Wilson, que era de uso delicado e envolvia a tomada de centenas de milhares de fotografias até que algum evento de interesse aparecesse, a emulsão fotográfica comum é um instrumento de registro contínuo. As emulsões fotográficas podem, em princípio, guardar nas imagens latentes (imagens registradas num filme fotográfico antes de ser revelado) todos os eventos que as sensibilizaram a partir do momento em que foram expostas à radiação. O problema era tornar um filme fotográfico comum sensível à trajetória de uma partícula. Para isso, era necessário aumentar em várias vezes a quantidade de sais de prata nele contida, pois a precipitação da prata metálica induzida pela luz, por exemplo, é que torna visível a imagem dos objetos fotografados. Esse problema foi sendo progressivamente resolvido até que, em 1946, os físicos já dispunham de um novo instrumento sensível aos traços de partículas carregadas: as emulsões nucleares. Assim como na fotografia comum, as imagens latentes deixadas pelas partículas na emulsão passaram a ser reveladas, em seguida fixadas, lavadas e secas para depois serem levadas à observação (em microscópios).

Além do registro contínuo, as emulsões apresentaram outra vantagem em relação às câmaras de Wilson ou de bolhas. Por serem muito mais leves e portáteis, podiam ser levadas sem dificuldade em voos de balão ou ser transportadas até estações em montanhas elevadas. No entanto, tinham a desvantagem de requerer um microscópio para as observações, tornando-as cansativas e lentas.

O grupo de Bristol, do qual fez parte César Lattes, deu grandes contribuições para o desenvolvimento das emulsões nucleares, a ponto de torná-las úteis não apenas para registrar a passagem das partículas, mas também para identificá-las, permitindo, por exemplo, a determinação de sua carga elétrica, de sua energia cinética e da massa. Um dos grandes problemas que o trabalho prático de Lattes ajudou a resolver foi o desaparecimento das imagens deixadas pelas partículas quando passa um tempo muito grande entre a exposição e a revelação.

### 6.3 Raios cósmicos

Nesse contexto, por volta de 1946, os cientistas só faziam experimentos de Física Nuclear utilizando, basicamente, os aceleradores de partículas. Mesmo assim, esses equipamentos tinham limitações. Portanto, para mais partículas serem descobertas, mais energia seria necessária. Isso sem levar em conta todo o investimento financeiro e a complexidade na construção dessas máquinas.

Entretanto, por sorte (se é que podemos usar esse termo em se tratando do Universo), os cientistas não esperavam descobrir uma fonte natural de partículas aceleradas a altas energias que poderiam ser usadas no estudo das partículas: os raios cósmicos.

Em 1910, o padre jesuíta e físico holandês Theodor Wulf (1868-1946) levou um detector de radiação (eletroscópio) ao alto da torre Eiffel, a 300 m de altura. Notou que um tipo de radiação “etérea”, vindo do espaço, era mais intenso que no solo. Mas não foi além em suas conclusões. Entre 1911 e 1913, o balonista e físico austriaco Victor Hess (1883-1964) se arriscou em dez voos, levando detectores a quilômetros de altura. Notou, por exemplo, que a 5 km de altitude o nível de radiação era 16 vezes maior que no solo. Em um dos voos, durante um eclipse solar, os resultados se repetiram. Sua conclusão foi postular a existência de uma “radiação etérea”, vinda do espaço, não do Sol. Em 1936, Hess ganhou o Nobel de Física pela descoberta dos raios cósmicos, como foram batizados em meados da década de 1920, por virem do espaço.

### Técnica e tecnologia



[Ver Orientação 55.](#)

Victor Franz Hess  
(1883-1964).



Bettmann/Corbis/Latinstock

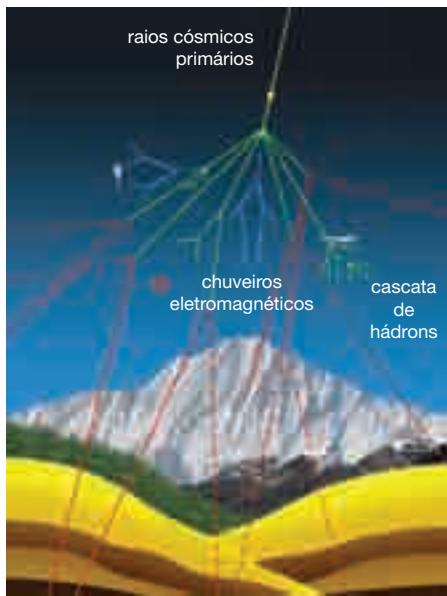


Ilustração produzida com base em: CLOSE, Frank; MARTEN, Michael; SUTTON, Christine. *The Particle Odyssey: A Journey to the Heart of Matter*. New York: Oxford University Press, 2002.

Os raios cósmicos funcionam como uma fonte de altíssima energia, que, ao colidir com átomos, é capaz de revelar o interior da matéria, pois sua energia pode atingir valores muito altos. Até o início do século XX, a radiação mais energética conhecida eram os raios  $\gamma$ , com poder de penetração muito alto, capaz de atravessar uma placa de chumbo de 5 cm de espessura. Verificou-se então que os raios cósmicos são capazes de penetrar espessuras muito maiores. Mas enquanto os raios  $\gamma$  são ondas eletromagnéticas de alta frequência, os raios cósmicos são partículas primárias, em geral núcleos de hidrogênio (prótons) que se deslocam em altas velocidades. Poucos são os que atingem a superfície da Terra, pois em geral colidem com as partículas presentes na atmosfera, produzindo o que os cientistas chamam de “chuveiros” de partículas secundárias, que são criadas da colisão de várias partículas e descrevem trajetórias específicas.

Na colisão de um raio cósmico com os átomos da atmosfera, outras partículas são produzidas. Se nossos olhos fossem capazes de detectar essas partículas, seria um espetáculo maravilhoso. Talvez nem fosse necessário lançar fogos de artifício em dias festivos, pois o céu seria naturalmente enfeitado pela chuva de partículas.

### Características

Os raios cósmicos são partículas de alta energia e velocidade que provêm de locais distantes do espaço e atingem a Terra em todas as direções. Cerca de 200 dessas partículas secundárias atingem cada metro quadrado ( $m^2$ ) da superfície terrestre a cada segundo, com energia em torno de 1 MeV ( $10^6$  eV, milhões de elétron-volt). Em menor número, há também poucas partículas mais energéticas, da ordem de 1 Tev ( $10^{18}$  eV, tera elétron-volt). Estas chegam à Terra na quantidade de apenas uma por semana, numa área de um quilômetro quadrado. Acima dessa energia, a quantidade de partículas diminui bastante, estimando-se que devam existir uma a cada século por quilômetro quadrado com energia de  $10^{20}$  eV. Para se ter ideia da energia contida nessas partículas, se um micrograma de um raio cósmico ultraenergético atingisse a Terra, o choque seria equivalente ao de um asteroide com a massa do monte Everest, o mais alto pico do mundo, viajando a 200 000 km/h.

Parece haver consenso de que os raios cósmicos são prótons a altíssima velocidade que provêm do espaço. Mas qual sua origem específica? Uma das hipóteses é que se trata de restos de explosões estelares ocorridas em locais distantes do Universo. Esses raios cósmicos vagam pela galáxia alterando sua trajetória com a interação de campos elétricos e magnéticos.

### Meios de detecção: o observatório Pierre Auger

Os astronautas são diretamente expostos aos raios cósmicos, enquanto nós estamos protegidos pela atmosfera terrestre, que absorve a maior parte da radiação antes que ela chegue à superfície da Terra. Desse modo, medir diretamente essas partículas antes que colidam com a atmosfera terrestre exige o envio de detectores, como balões e satélites, a grandes altitudes.

Na superfície da Terra, também é possível detectar os raios cósmicos. Mas as medidas efetuadas são indiretas, ou seja, feitas por meio das partículas secundárias produzidas durante a interação dos raios cósmicos com os gases que compõem nossa atmosfera. Essas partículas incluem prótons, nêutrons e muitos píons ( $\pi^+$  e  $\pi^0$ ). O tempo de vida dos  $\pi^0$  é relativamente curto: eles decaem antes de chegar

à superfície terrestre em pares de raios  $\gamma$ . Estes, por sua vez, produzem pares de elétrons ( $e^-$ ) e pósitrons ( $e^+$ ) que, dependendo da energia, produzem uma avalanche de outras partículas que podem ser detectadas na superfície da Terra. Os píons que ultrapassam a atmosfera decaem. Eles sofrem transmutação em muôns e neutrinos, que também podem ser detectados. Ou seja, a colisão dos raios primários com a atmosfera produz novas partículas, e fragmentos dessa colisão são expelidos com altíssimas velocidades em todas as direções. Voltam a colidir com outros átomos e moléculas em uma cascata até que a energia da partícula original seja distribuída entre milhares de partículas que incidem na superfície terrestre em uma área de até 16 km<sup>2</sup>.

Com o objetivo de capturar partículas mais energéticas como as que chegam apenas uma vez por semana numa área de um quilômetro quadrado, há um projeto de colaboração internacional chamado Observatório Pierre Auger. Serão construídos dois observatórios: um no Hemisfério Sul, na Argentina (o primeiro a ser construído), e outro no Hemisfério Norte, nos Estados Unidos, para detecção e estudos dos raios cósmicos a partir do solo.

Quando terminado, o Auger cobrirá uma área de 3 500 km<sup>2</sup> com 1 800 estações detectoras, formando um gigantesco retículo. Cada uma dessas estações terá o tamanho da garagem de um carro médio e vai distar 1,5 km uma da outra. Desse modo, o detector medirá cerca de 50 raios cósmicos por ano com energias acima de 10<sup>20</sup> eV, além de um grande número de eventos com energias menores.

Um segundo sistema de detecção (como o representado no centro da figura) será utilizado em noites escuras e sem Lua, em locais ermos e secos. Trata-se de sensores de luz sensibilíssimos e calibradíssimos que serão utilizados para medir fluorescência das colisões das partículas com as moléculas dos gases da atmosfera durante o desenvolvimento do chuveiro (basicamente o mesmo processo físico que produz a luz em uma lâmpada fluorescente).



Eduardo Borges

Projeto do Observatório Pierre Auger, na Argentina.

## Exercícios resolvidos

**1)** Qual a importância do trabalho do brasileiro César Lattes para a Ciência de sua época?

A partícula detectada por Lattes e o grupo no qual trabalhava, o píon ou méson  $\pi$ , havia sido proposta teoricamente pelo físico japonês H. Yukawa 10 anos antes e reforçou a confiança no modelo de partículas que estava em desenvolvimento.

**2)** Explique a vantagem de realizar o experimento que permitiu a detecção do píon ou méson  $\pi$  no monte Chacaltaya a 5 500 m e nos Pirineus a 2 800 m. Por que o ar mais rarefeito é melhor nesse tipo de experimento?

O píon é uma partícula de curto raio de ação, por sua massa ser de cerca de  $10^{-15}$  m<sub>e</sub>. Além disso, sendo o ar rarefeito, é menor a possibilidade de essa partícula interagir com outras partículas do ar.

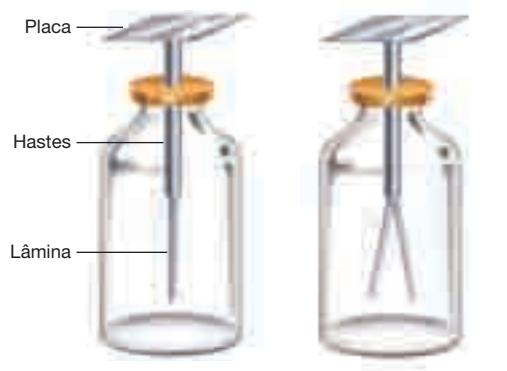
**3)** Quais as vantagens e desvantagens das emulsões quando comparadas a câmara de Wilson?

Além do registro contínuo, as emulsões apresentam sobre as câmaras de Wilson a vantagem de ser muito mais leves e portáteis, podendo ser levadas sem dificuldade em voos de balão ou transportadas até estações em montanhas elevadas. Já as emulsões têm a desvantagem de requerer um microscópio para as observações, tornando-as cansativas e lentas.

## Exercícios propostos

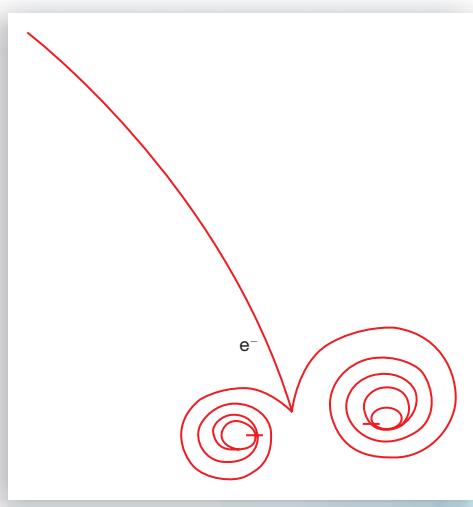
é fácil

Luis Moura



**1)** Na figura ao lado, temos representada a imagem da trajetória de três partículas numa câmara de bolhas. Na região, age um campo magnético  $\vec{B}$  perpendicular ao plano e orientado para cima. Pergunta-se:

- Observe o rastro deixado pelas partículas não indicadas na figura. Qual a carga dessas partículas? [Resposta no final do livro.](#)
- Qual(is) dela(s) deve(m) ter sido produzida(s) no interior da câmara de bolhas? [Resposta no final do livro.](#)
- Que tipo de partícula deve ter produzido o fenômeno na câmara de bolha e qual sua trajetória? [Resposta no final do livro.](#)
- Qual a resultante das cargas originadas nessa colisão? [Zero.](#)



Editoria de arte

**2)** Qual a energia mínima liberada na aniquilação de um elétron e um pósitron? Desenhe a trajetória do par elétron-pósitron e dos fótons. [1,022 MeV](#)

**3)** O eletroscópio é um aparelho utilizado para detectar cargas elétricas. Ele é constituído de uma placa metálica que é ligada a duas lâminas metálicas finas por uma haste condutora elétrica. As duas lâminas podem se movimentar, afastando-se ou aproximando-se uma da outra. Suponha que subamos num

balão levando um eletroscópio descarregado como o representado na figura I. Ao estabilizarmos o balão a 300 m de altitude, o eletroscópio fica carregado, como representado na figura II.

- Por que as lâminas de um eletroscópio se separam quando ele está carregado? [Resposta no final do livro.](#)
- Com base no estudo desta seção, como podemos explicar o fato de o eletroscópio ficar carregado a 300 m de altitude? [Resposta no final do livro.](#)
- Depois de responder ao item b, explique por que isso não ocorre na superfície da Terra. [Resposta no final do livro.](#)

3

## 7. Famílias de partículas e os quarks

Começamos este capítulo repensando a ideia dos tijolos básicos da matéria. Podemos perceber que até o momento a quantidade de partículas só aumentou. Das poucas partículas apresentadas até o Capítulo 13, apresentamos várias outras e dissemos que hoje são conhecidas mais de 300. Mas será que não há nada de realmente elementar na natureza?

Questionamento semelhante tiveram os cientistas ao longo do século XX, mas aparentemente a resposta definitiva estava distante, pois a cada novo acelerador construído, mais energético, novas partículas eram descobertas. No entanto, algumas ideias intuitivas pareciam não ser aplicadas às partículas. Por exemplo, poderia se pensar que as partículas menores pudesse ser candidatas naturais ao posto de elementares. Mas

alguns resultados contradiziam isso, pois existiam partículas muito pesadas que não revelavam uma estrutura interna, enquanto outras mais leves podiam revelar.

## 7.1 Uma primeira classificação

Quando a coleção de exemplares é grande, uma alternativa é tentar organizá-las com base em determinado critério. Assim, foram criadas as famílias de partículas. O termo *família* é uma metáfora, no sentido de que são um coletivo com alguma semelhança. Inicialmente, tentou-se usar a massa delas como critério de organização, criando-se três famílias:

- **bárions:** palavra grega que significa *pesado*, seria a família composta das partículas com maior massa, como o próton e o nêutron de massa aproximada de  $939 \text{ MeV}/c^2$ .
- **léptons:** palavra grega que significa *leve*, seria a família composta das partículas de menor massa, como o elétron, com massa de  $0,511 \text{ MeV}/c^2$ .
- **mésons:** de massa intermediária, seria a família composta das partículas com massa entre as das outras duas famílias anteriores, como o méson  $\pi$ , de massa  $135 \text{ MeV}/c^2$ .

## 7.2 Revendo a classificação

A classificação proposta mostrou-se inadequada, pois algumas características muito importantes não eram compartilhadas pelos membros de uma mesma família. Por exemplo, como ser ou não ser sensível à interação forte.

Para ilustrar esse exemplo, vamos tomar o elétron, o mûon e o tau. Apesar de todos eles terem como propriedade não manifestar a interação forte, e, por isso, deveriam pertencer à mesma família, foram classificados em famílias diferentes pelo valor de suas massas.

Um caminho para a classificação das partículas veio com a percepção de que as forças nucleares não distinguiam prótons de nêutrons no interior do núcleo. Ou seja, poder-se-ia considerar a força forte como um critério para a classificação das famílias. Assim, as partículas que manifestassem a força forte fariam parte da mesma família. Nascia aí a classificação que empregamos ainda hoje como forma de organizar as partículas.

### Hádrons

Passaram a pertencer à família *hádron* as partículas que manifestam a interação forte e estão presentes no núcleo atômico. Como exemplos de hádrons, temos o próton, o nêutron e o píon.

### Léptons

As partículas que não manifestam interação forte, ou seja, não são encontradas no núcleo atômico, passaram a pertencer à família *lépton*. A quantidade de partículas que fazem parte dos léptons, como o elétron, o neutrino e o mûon, é bem menor que a quantidade das partículas dos hádrons.

## 7.3 Quarks

Mesmo com essas duas famílias já servindo para organizar as centenas de partículas existentes, duas categorias ainda eram insuficientes para o detalhamento das teorias. Buscaram-se então outras formas de classificar as partículas com o intuito de obter categorias com mais detalhes.

Na década de 1960, os físicos Murray Gell-Mann (1929-) e George Zweig (1937-) postularam a existência de três **partículas elementares** que poderiam compor todos os hadrons. Essa proposta, inicialmente pensada apenas como entidade matemática e auxiliar para tratar de tantas partículas, começou a se constituir em uma teoria física. Posteriormente, a existência dessas partículas foi comprovada experimentalmente.

Segundo a proposta de Gell-Mann e Zweig, os quarks – nome atribuído às partículas elementares constituintes dos núcleos atômicos – existiriam apenas agrupados em dois ou três na composição dos hadrons, permanecendo confinados neles e **nunca se apresentando individualmente**.

Inicialmente foram propostos três tipos de quarks, que receberam os nome de: **quark up** (u), **quark down** (d) e **quark strange**, ou quark estranho (s).

Alguns anos depois, mais três quarks foram acrescentados: o **quark charm**, ou quark charmoso (c), o **quark bottom** (b) e, por último, o **quark top** (t), que se constituíam de partículas produzidas como resultado de colisões entre outras partículas.

A descoberta do quark top, último dos seis quarks previstos, ocorreu em 2 de março de 1995, no Fermilab, um laboratório de Física de Partículas de Altas Energias, em Chicago, nos Estados Unidos. A busca começou em 1977, quando os físicos do mesmo laboratório encontraram o quinto quark, o bottom. O tempo consideravelmente longo dessa busca pode ser explicado porque o quark top era muito mais pesado do que se esperava originalmente, sendo então necessária uma quantidade maior de energia para evidenciá-lo.

Embora o quark top decaia rápido demais para ser observado, ele deixa para as partículas que evidenciam sua existência uma espécie de “assinatura” do quark top. O quark top pode decair de várias maneiras, mas, como ele aparece apenas uma vez em vários bilhões de colisões, foram necessários bilhões de colisões.

Naturalmente, conhecendo-se a existência das antipartículas, aos seis quarks acima temos de acrescentar outros seis, dados pelos **antiquarks**. Com isso, tem-se ao todo 12: seis quarks e seis antiquarks, que serão a base para formar todas as outras partículas que interagem por meio da força forte, os hadrons.

Dessa forma, a classificação em **hadrons** e **léptons** passou a ter outras categorias. Os hadrons classificam-se em **bárions**, que são constituídos de três quarks, e **mésons** ou partículas fundamentais, formadas por 2 quarks, na verdade um quark e um antiquark de cor oposta, conforme veremos mais adiante. Por sua vez, os léptons, como o elétron, não são formados por quarks.

### Propriedades dos quarks

#### Carga elétrica

Os quarks também têm dois tipos de carga, a positiva e a negativa. Entretanto, eles possuem cargas semi-inteiras, isto é, uma fração da carga do elétron, antigamente considerada elementar.

As cargas elétricas dos quarks são fracionárias e podem ser  $\frac{2}{3}$  e ou  $-\frac{1}{3}$  e.

#### Carga-cor

Além da carga elétrica, os quarks têm uma propriedade chamada carga de cor ou simplesmente carga-cor. Diferentemente da carga elétrica, que se manifesta de apenas duas formas, positiva ou negativa, a carga-cor pode se manifestar de três

maneiras: vermelha, verde e azul, que são as cores primárias. Mas não se iluda: os quarks não são coloridos. Foram identificados como cores apenas para designar uma propriedade quântica da matéria que pode ser de três tipos. Cada quark pode ter uma dessas três cores.

Os antiquarks também têm carga-cor, mas, por ser antipartículas, essa propriedade deve assumir um efeito inverso. Para indicar sua cor, escolheram-se as cores complementares, ou seja, ciano, magenta e amarelo.

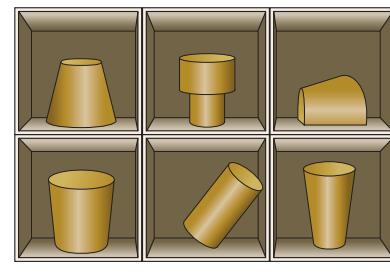
A tabela a seguir oferece uma síntese bem-humorada dos seis quarks e dos seis antiquarks, com a indicação de suas cargas elétricas e suas cargas-cores.

$\frac{2}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{2}{3}e$
up 	charm 	top 	anti-up 	anti-charm 	anti-top 
down 	strange 	bottom 	anti-down 	anti-strange 	anti-bottom 
$-\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}e$
<b>vermelho, verde, azul</b>			<b>ciano, magenta e amarelo</b>		

Embora estejam listados 12 tipos de quarks, atualmente o Universo é formado apenas pelos quarks dos tipos up e down. Os outros quarks, strange, charm, bottom e top, só existiram no Universo mais primordial, quando a temperatura e a energia eram muito mais altas. Essas partículas só são detectadas em experimentos realizados nos grandes aceleradores.

*Os nomes up, down, charm, strange, top e bottom são nomes fantasia. Em diversas situações, os físicos gostam de brincar com nomes e representações, valendo-se muitas vezes de nomes com duplo sentido.*

*Imagine que um grupo de jovens físicos resolveu usar rolhas de vinho obtidas numa festa para fazer uma tabela de quarks. Você conseguiria identificar o tipo de quark que cada rolha representa?*



Editoria de arte

  
**Explorando  
o assunto**

## Massa dos quarks

Quark	Massa corrente (MeV/c <sup>2</sup> )
u	~ 5
d	~ 10
s	~ 100
c	1500
b	4 700
t	170 000*

\* Valor estimado sem evidências experimentais seguras.

Fonte de pesquisa:  
CLOSE, F.; MARTEL, M.;  
SUTTON, C. *The particle odyssey: a journey to the heart of matter*. New York: Oxford University Press, 2002.

Ao contrário dos léptons, os hadrons possuem quarks confinados em seu interior que não são detectados como partículas físicas isoladas. Portanto, a massa dos quarks não pode ser medida diretamente, mas deve ser determinada indiretamente, por meio de sua influência sobre as propriedades dos hadrons. A massa calculada só faz sentido no contexto limitado de um modelo de quark particular e não pode ser relacionada diretamente à partícula do modelo padrão. Ou seja, não se pode tratar da massa dos quarks como se trata da massa das demais partículas, havendo estimativas da assim chamada "massa corrente".

Um fato curioso sobre os hadrons é que apenas uma parte muito pequena de sua massa se deve à massa dos quarks que o constituem. Por exemplo, um próton, formado por dois quarks up e um down (uud), tem massa superior à soma das massas de seus quarks:

quarks	Resultado		
	u	u	d
massa	3	3	6
			12 MeV/c <sup>2</sup>

Veja que a maior parte da massa que observamos no próton, cuja massa total é 938,26 MeV/c<sup>2</sup>, vem de sua energia cinética e potencial. Essas energias são convertidas na massa do hadron, como é descrito pela equação de Einstein, que relaciona energia e massa,  $E = mc^2$ .

Os físicos ainda não entendem o motivo de o quark top ter massa elevada em comparação com os outros quarks, sendo 40 vezes mais massivo que o mais massivo dos outros quarks e, aproximadamente, 35 mil vezes mais leve que os quarks up e down.

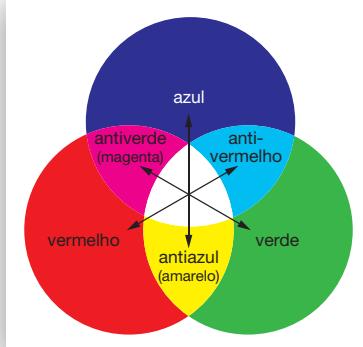
## Regras de combinação dos quarks

Vimos que os quarks compõem os hadrons e que podem se combinar em número de dois ou três para compor cada hadron. Essa associação de quarks obedece a algumas regras, das quais vamos apresentar duas:

I) A soma das cargas elétricas deve ser um número inteiro entre  $-2e$  e  $+2e$ . Ou seja, a carga final de um hadron deve ter um dos seguintes valores:  $-2e$ ,  $-1e$ ,  $0$ ,  $1e$  ou  $2e$ .

II) A soma da carga-cor deve resultar em branco, considerado carga-cor nula.

Vimos a combinação das cores no Capítulo 8 deste volume, mas apenas para refrescar sua memória:



vermelho + verde + azul = branco

vermelho + verde = amarelo

vermelho + azul = magenta

verde + azul = ciano

cor + cor - complementar = branco

Analogia com as cores primárias.

Bárions (símbolo)	Quarks	Mésons (símbolo)	Quarks
próton ( $p$ )	uud	píon ( $\pi^+$ )	$u\bar{d}$
nêutron ( $n$ )	udd	píon ( $\pi^-$ )	$d\bar{u}$
lambda ( $\Lambda^0$ )	uds	káon ( $K^+$ )	$\bar{u}s$
delta ( $\Delta^{++}$ )	uuu	káon ( $K^0$ )	$d\bar{s}$
sigma ( $\Sigma^+$ )	uus	káon ( $\bar{K}_0$ )	$s\bar{d}$
sigma ( $\Sigma^0$ )	uds	káon ( $K^-$ )	$\bar{u}s$
sigma ( $\Sigma^-$ )	dds	J/ $\Psi$	$c\bar{c}$
xi ( $\Xi^0$ )	uss	$D^+$	$c\bar{d}$
xi ( $\Xi^-$ )	dss	$D^0$	$c\bar{u}$
ômega ( $\Omega^-$ )	sss	$D_s^+$	$c\bar{s}$
lambda ( $\Lambda_c^0$ )	udc	$B^+$	$u\bar{b}$
sigma ( $\Sigma_c^{++}$ )	uuc	$\bar{B}_0$	$\bar{d}b$
sigma ( $\Sigma_c^+$ )	udc	$B^0$	$d\bar{b}$
xi ( $\Xi_c^+$ )	usc	$B^-$	$\bar{u}b$

Fonte de pesquisa: CLOSE, F.; MARTEN, M.; SUTTON, C. *The particle odyssey: a journey to the heart of matter*. New York: Oxford University Press, 2002.

1) Qual a carga elétrica de um próton?

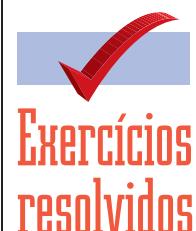
O próton é formado por três quarks: uud. Pela soma das cargas dos quarks que o constituem, temos:

quark	u	u	d	total
carga	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	+1e

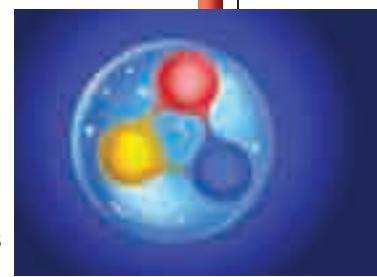
2) Quais as cores possíveis para cada um dos quarks que constituem um próton?

Como são três quarks e a soma da carga-cor tem de ser branca, cada um deles precisa ser de uma cor primária, por exemplo, vermelho, verde, azul. Nenhum quark pode ter carga-cor complementar.

Representação de hadrons formados por três quarks ligados pela interação forte.



Luis Moura



## Exercícios propostos



3) O conhecimento da existência das antipartículas tornou necessário acrescentar 6 antiquarks ao modelo de classificação das partículas.

4) O elétron pertence à família dos léptons, que não sentem a força forte. Por isso, não pode ser atraído, como o próton, que pertence a família hadrônica dos bárions.

1) Toda partícula formada de quarks deve ter uma carga elétrica que seja um número inteiro entre -2 e 2 e uma carga de cor branca. Para obter uma partícula com essas características, é preciso combinar dois ou três quarks, com a soma da carga-cor sendo o branco. Com base nessas regras, responda:  
a) Quais são as possíveis combinações de quarks que dão esse resultado?  
b) É possível formar uma partícula de 4 quarks? Justifique. *Respostas no final do livro.*

2) Por que partículas, como o próton, não podem ser formadas por apenas dois quarks? *Porque a associação de quarks obedece a algumas regras, dentre elas: a soma das cargas elétricas deve ser um número inteiro entre -2e e +2e e a soma da carga-cor deve resultar em branco.*

3) Por que o conjunto proposto de quark não poderia se limitar a seis?

4) Um elétron pode ser atraído por outro elétron assim como ocorre entre um par de prótons presente no núcleo atômico? Justifique.

5) Se um pósitron se transforma num próton, que regra seria violada? *O número leptônico e as leis de conservação de massa e energia.*

## 8. Partículas mediadoras e o modelo padrão

A introdução dos quarks permitiu uma simplificação enorme no campo das partículas elementares, que pôde ser dividido em dois grupos: os **hádrons**, constituídos por quarks, e os **léptons**, que não são constituídos por quarks e são considerados elementares.

### 8.1 Partículas mediadoras

Além dessas duas famílias de partículas, a evolução das pesquisas em Física de Partículas determinou a classe das partículas **mediadoras**. Essas partículas são responsáveis por intermediar as interações nucleares, forças forte e fraca e a eletromagnética. Elas aparecem durante os decaimentos e são as portadoras das interações.

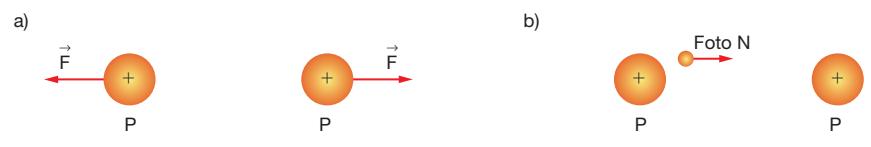
Mediator	Símbolo	Carga	Tempo de vida	Interação	interage em
glúon	g	0	estável	forte	quarks
fóton	$\gamma$	0	estável	eletromagnética	cargas
bósons intermediários	$W^\pm$	$\pm 1$	$10^{-25}$	fraca	quarks e léptons
	$Z^0$	0	$10^{-25}$	fraca	quarks e léptons

Fonte de pesquisa: CLOSE, F.; MARTEN, M.; SUTTON, C. *The particle odyssey: a journey to the heart of matter*. New York: Oxford University Press, 2002.

3

Ilustrações: Editoria de arte

O conceito de partículas mediadoras substitui os clássicos conceitos de campo e força como mediadores das interações. Por exemplo, a repulsão elétrica entre dois prótons seria interpretada na perspectiva das partículas como uma troca de fótons. Esses seriam emitidos por um próton e absorvidos pelo outro enquanto a interação se mantivesse.

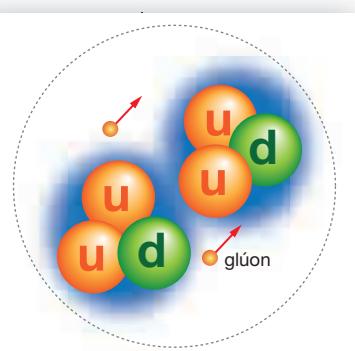


Em a), dois prótons interagem pela ação da força elétrica que age em ambos. Em b), os prótons interagem trocando fótons, partículas mediadoras da interação eletromagnética.

Assim, a interação forte pode ser vista como a troca de glúons, partículas mediadoras da interação forte, entre os quarks de dois prótons no interior de um núcleo atômico.

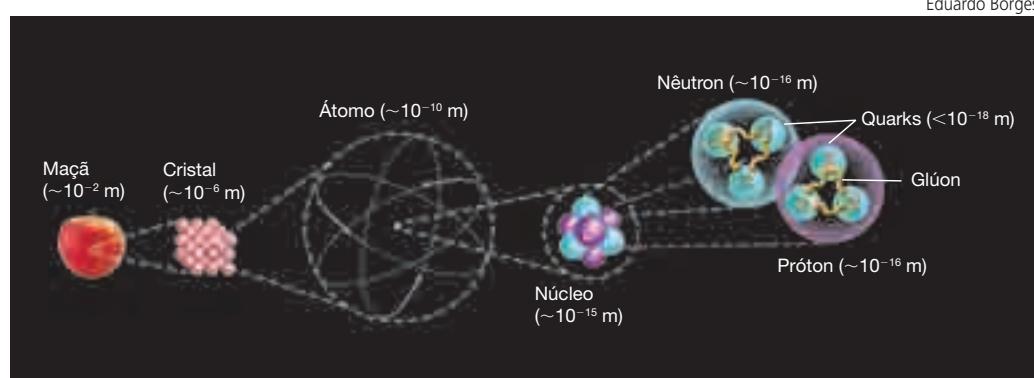
Um ponto importante sobre as partículas transportadoras de interação é que uma partícula mediadora, de um tipo particular de interação, só pode ser absorvida ou emitida por partículas afetadas por essa interação. Por exemplo, elétrons e prótons têm carga elétrica; portanto, eles podem produzir e absorver as transportadoras de forças eletromagnéticas, ou seja, os fótons. Neutrinos, por outro lado, não têm carga elétrica, então eles não podem absorver ou produzir fótons.

Se você reparar na tabela das partículas de interação, vai sentir falta da força gravitacional. Ela não é uma das forças existentes no Universo? Não é responsável por manter os planetas girando em torno do Sol? Sem dúvida, a força gravitacional é uma das interações fundamentais, mas ainda não tem lugar na Física de Partículas. Embora toda partícula com massa esteja sujeita à ação da força gravitacional, o gráviton, suposta partícula mediadora da interação gravitacional, ainda não foi observado.



Editoria de arte

Eduardo Borges



Detalhe do cartaz “Estrutura elementar da matéria”. O número dentro dos parênteses indica a escala de tamanho dos elementos.

Fonte: Centro Regional de Análise de São Paulo (SPRACE), com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Universidade Federal do ABC (UFABC). Extraído do site: <[www.sprace.org.br/eem/home/Cartaz](http://www.sprace.org.br/eem/home/Cartaz)>. Acesso em: 10 abr. 2010.

*Muitos comparam os físicos de partículas com os cozinheiros, sendo então os cozinheiros do Universo. Tente brincar de cozinheiro do Universo e faça sua receita!*

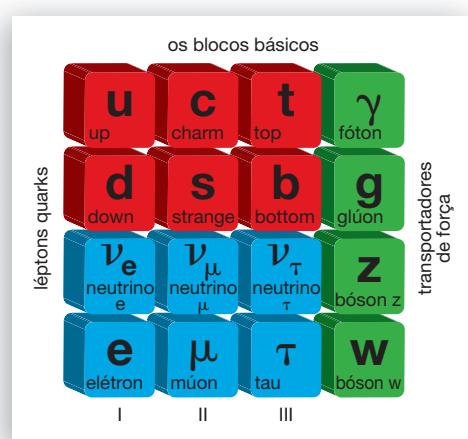
*Construa hadrons e mésons pela associação de quarks.*

Resposta pessoal. A ideia é que os alunos pensem sobre a formação das partículas.



## 8.2 Modelo padrão

As partículas mediadoras completam o quadro sintético da maneira de conceber as partículas. Temos assim três tipos de partículas: quarks (presentes em todos os hadrons), léptons e as partículas mediadoras. Isso permite organizar as partículas conhecidas neste pequeno quadro, que recebe o nome de **modelo padrão**.



Editoria de arte

## Exercícios propostos



## Exercícios resolvidos



O modelo padrão funciona como uma espécie de tabela periódica de partículas, com a vantagem de ser mais sintética e constituir uma referência teórica, pois serve de guia para os experimentos. As previsões obtidas a partir dele foram confirmadas por experimentos com precisão incrível, e todas as partículas previstas por essa teoria já foram encontradas. Contudo, ele não fornece explicações seguras para alguns fatos. Por exemplo, o que causa a geração e a distribuição de massas entre as partículas e por que elas são tão diferentes? Para poder responder a perguntas como essa, os físicos teorizaram a existência de outra partícula, chamada bóson de Higgs, ainda não detectada. Eles esperam provar ou descartar sua existência em futuros estudos nos aceleradores de altas energias, como o LHC.

Além da questão da massa das partículas, existem estas questões em aberto:

- Por que há mais matéria do que antimateria no Universo?
- Como a gravidade se encaixa no modelo padrão?
- O que é a matéria escura, que parece permear todo o Universo, interagir gravitacionalmente e não ser detectada?
- Os quarks e os léptons são realmente elementares ou são constituídos de partículas mais fundamentais?

**1)** Algumas das partículas mediadoras interagem com a luz?

Somente as partículas mediadoras com carga elétrica interagem com a luz. Como o  $W^-$  e o  $W^+$ .

**2)** Qual das quatro forças de interação **deve** estar envolvida no seguinte processo de decaimento  $\beta$ :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ?

A força fraca, pois ela interage com os quarks e os léptons.

**3)** Qual núcleon não interage com fóton? Por quê?

O nêutron, porque não possui carga elétrica.

**1)** Se usarmos glúons para ligar um quark up a um quark antistrange, qual será a partícula resultante?

- |            |            |
|------------|------------|
| a) próton  | c) elétron |
| b) nêutron | x d) méson |

**2)** Indique três partículas que não interagem com glúons. Elétron, fóton, tau.

**3)** O neutrino do elétron interage com fótons? Explique. Assim como o nêutron, o neutrino do elétron também não interage com fótons, porque tem carga elétrica nula.

**4)** (Vunesp-SP) De acordo com o modelo atômico atual, os prótons e os nêutrons não são mais considerados partículas elementares. Eles seriam formados de 3 partículas ainda menores, os quarks. Admite-se a existência de 12 quarks na natureza, mas só 2 deles formam os prótons e os nêutrons, o quark up (u), de carga elétrica positiva, igual a 2/3 do valor da carga do elétron, e o quark down (d), de carga elétrica negativa, igual a 1/3 do valor da carga do elétron. Com base nessas informações, assinale a alternativa que apresenta corretamente a composição do próton e do nêutron.

I - próton e II - nêutron

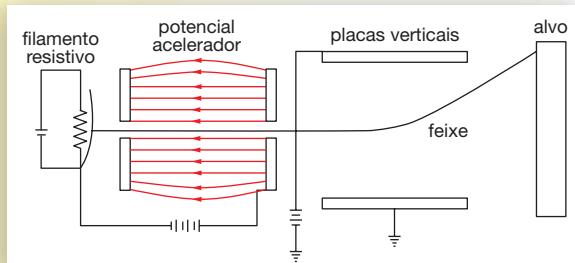
- |                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| a) (I) d,d,d (II) u,u,u   | d) (I) u,u,u (II) d,d,d |
| b) (I) d,d,u (II) u,u,d   | e) (I) d,d,d (II) d,d,d |
| x c) (I) d,u,u (II) u,d,d |                         |

## Exercícios propostos

**Exercícios correspondentes às partículas e aos aceleradores.**

- 1) (UFMT) Na figura abaixo é representado um desenho esquemático que retrata um projeto possível de um aparelho de televisão.

Editoria de arte



O conjunto completo consiste de um filamento que deve ser aquecido para atuar como fonte de elétrons, que formam um feixe acelerado por um potencial acelerador e posteriormente desviado por um campo elétrico perpendicular à trajetória original do feixe que varia em função do sinal recebido pelo aparelho vindo de uma emissora de TV. O desvio faz com que os elétrons atinjam seletivamente pontos do alvo (a tela da TV) formando uma imagem. Sobre os princípios físicos envolvidos no funcionamento de tal aparelho de televisão, julgue os itens.

- Fa) Os elétrons que constituem o feixe são emitidos pela emissora de TV e captados por meio da antena do aparelho de televisão.  
 Fb) O feixe representado na figura foi desviado na direção da parte superior desta folha de papel, o que significa que a placa vertical superior deve estar carregada negativamente.  
 Fc) O feixe de elétrons deve se deslocar no vácuo, pois o aparelho de televisão deve ser termicamente isolado.  
 Vd) O projeto do aparelho de TV apresentado na figura é coerente com as equações gerais do eletromagnetismo, estabelecidas por James Maxwell.

- 2) (UFMT) Em relação ao funcionamento de um aparelho de televisão, considere:

- a) O tempo médio necessário para o acendimento de um pixel da tela do aparelho de TV é igual ao tempo médio gasto pelo elétron entre o potencial acelerador e o alvo.  
 b) É constante a velocidade dos elétrons, na trajetória entre o potencial acelerador e o alvo.

Pense  
um pouco  
mais!

- c) A distância média entre o potencial acelerador e o alvo é de 50 cm.

- d) A energia cinética adquirida pelo elétron no potencial acelerador é igual ao produto entre a carga do elétron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C) e a diferença de potencial nas placas aceleradoras, cujo valor é de 300 V. A energia cinética do elétron antes do potencial acelerador pode ser desprezada.  
 e) A massa do elétron é de  $9 \cdot 10^{-31}$  kg.  
 f) A tela do aparelho de TV é constituída de 800 colunas e 500 linhas.

Calcule, a partir das considerações, quantas vezes por segundo os elétrons devem varrer a tela de um aparelho de televisão. **50 vezes/segundo**

- 3) (Fuvest-SP) Segundo uma obra de ficção, o Centro Europeu de Pesquisas Nucleares, CERN, teria recentemente produzido vários gramas de antimateria. Sabe-se que, na reação de antimateria com igual quantidade de matéria normal, a massa total  $m$  é transformada em energia  $E$ , de acordo com a equação  $E = mc^2$ , onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

**NOTE E ADOTE:**

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}.$$

A explosão de "Little Boy" produziu  $60 \cdot 10^{12}$  J (15 quilotonos).

$$1 \text{ mês} \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ s}.$$

$$\text{Velocidade da luz no vácuo, } c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

- a) Com base nessas informações, quantos joules de energia seriam produzidos pela reação 1 g de antimateria com 1 g de matéria?  **$1,8 \cdot 10^{14}$  J**  
 b) Supondo que a reação matéria-antimateria ocorra numa fração de segundo (explosão), a quantas "Little Boy" (a bomba nuclear lançada em Hiroshima, em 6 de agosto de 1945) corresponde a energia produzida nas condições do item a? **3**  
 c) Se a reação matéria-antimateria pudesse ser controlada e a energia produzida na situação descrita em a fosse totalmente convertida em energia elétrica, por quantos meses essa energia poderia suprir a necessidade de uma pequena cidade que consome 100 MW?

No livro original  
**existem mais duas páginas de exercícios que complementam essa seção.**

# Outras ATIVIDADES

**Pesquise,  
proponha  
e debata**

**3**

## Um “cíclotron” pelos aceleradores

O que você acha de pegarmos carona com os fótons da rede mundial de computadores para conhecer alguns dos aceleradores de partículas do mundo?

Nesta atividade, vamos conhecer o projeto dos principais aceleradores de partículas. Atualmente, alguns são obsoletos e podem ser considerados peças de museu, outros estão em pleno funcionamento, e ainda existem os que estão somente no papel, em projetos que ainda estão sendo construídos.

### Discussão

**1)** Com base no conhecimento técnico apresentado neste capítulo, você deverá pesquisar em encyclopédias, páginas da internet confiáveis e revistas de divulgação científica dados de alguns aceleradores de partículas. Elabore fichas técnicas com as seguintes características:

- |                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| • Nome do acelerador    | • Localização        |
| • Ano de ativação       | • Energia do feixe   |
| • Partículas aceleradas | • Meio de aceleração |
| • Partículas detectadas | • Tipo de detectores |



<b>Nome do acelerador</b>	Cosmotrão
<b>Localização</b>	Brookhaven National Laboratory, Long Island, New York, EUA
<b>Ano de ativação</b>	1954
<b>Energia do feixe</b>	3 GeV
<b>Partículas aceleradas</b>	Prótons
<b>Meio de aceleração</b>	Circular
<b>Partículas detectadas</b>	$\Sigma^0$



<b>Nome do acelerador</b>	SLAC
<b>Localização</b>	Universidade de Stanford, Stanford, Califórnia, EUA
<b>Ano de ativação</b>	1967
<b>Energia do feixe</b>	20-50 GeV
<b>Partículas aceleradas</b>	Elétrons e pósitrons
<b>Meio de aceleração</b>	Linear
<b>Partículas detectadas</b>	$c$ e $\bar{e}$



<b>Nome do acelerador</b>	Tevatron
<b>Localização</b>	Fermilab, Illinois, EUA
<b>Ano de ativação</b>	1972
<b>Energia do feixe</b>	1 trilhão de eV
<b>Partículas aceleradas</b>	Prótons e Antiprotons
<b>Meio de aceleração</b>	Circular
<b>Partículas detectadas</b>	$t$

2) Faça um gráfico da energia utilizada nos aceleradores ao longo do tempo. Inclua os novos projetos. Qual a perspectiva futura dos experimentos de colisão de partículas a altas energias?



## Experimento Investigue você mesmo

# Descobrindo novas partículas

Nos filmes de suspense, policial, ou mesmo em um faroeste antigo, é comum os personagens utilizarem diferentes estratégias para descobrir o percurso feito por alguém pelos rastros que ele deixou. Esses indícios podem ser impressões digitais, pegadas, testemunhas, entre outros.

Vimos que os físicos de partículas desenvolvem procedimento semelhante. Afinal, eles tentam descobrir a natureza de determinada partícula pelo rastro deixado nos detectores. Nesta atividade, você também deverá descrever o evento ocorrido tendo como base somente alguns rastros deixados.

### Parte I – Rastros e pegadas

Observe a figura. Ela representa pegadas deixadas em um local.

**1)** Use a imaginação e relate uma história fictícia que forneça uma explicação aos rastros observados. Compare sua versão com a de seus colegas de classe.

**2)** O que se pode concluir com base nas várias histórias ou explicações dadas para a figura?

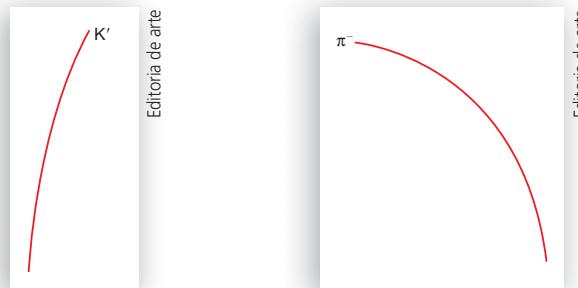


Eduardo Borges

### Parte II – No rastro das partículas

Você deve ter percebido que, por meio dos rastros, é possível construir uma explicação para determinado evento que você não presenciou.

O objetivo agora é analisar como podemos obter informações sobre partículas quando passam por uma câmara de bolhas e deixam seu rastro nela. Veja as figuras a seguir. Elas mostram os rastros deixados por um káon positivo ( $K^+$ ) e por um píon negativo ( $\pi^-$ ).



**3)** Por que as partículas apresentam uma trajetória curva? Argumente.

**4)** Como podemos explorar esse comportamento? Que informações podemos identificar sobre a partícula?

**5)** Por que as partículas, nas mesmas condições iniciais, apresentam diferente sentido e diferente ângulo de curvatura? O que nos permite inferir delas?

**6)** Que outros estudos podem ser feitos por meio da observação dos rastros de uma partícula na câmara de bolhas?

Fonte de pesquisa: SECRETARIA DA EDUCAÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Caderno do professor: Física, Ensino Médio – 3ª série, 4º bimestre/Secretaria da Educação*. São Paulo: SEE, 2008.