

# Astronomia e Astrofísica

Copyright © 2017 Editora Livraria da Física  
4ª Edição

**Direção editorial:** José Roberto Marinho

**Capa:** Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

---

Oliveira Filho, Kepler de Souza  
Astronomia e astrofísica / Kepler de Souza Oliveira Filho, Maria de Fátima Oliveira Saraiva. –  
4. ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017.

Bibliografia  
ISBN 978-85-7861-485-0

1. Astrofísica 2. Astronomia I. Saraiva, Maria de Fátima Oliveira. II. Título.

CDD-523.01

---

Índices para catálogo sistemático:

1. Astrofísica: Astronomia 523.01

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida  
sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.

Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107  
da Lei N° 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



Editora Livraria da Física  
[www.livrariadafisica.com.br](http://www.livrariadafisica.com.br)

# **Astronomia e Astrofísica**

**Kepler de Souza Oliveira Filho (S.O. Kepler)**

**Maria de Fátima Oliveira Saraiva**

Departamento de Astronomia - Instituto de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, 27 de março de 2017.



# Conteúdo

<b>Prefácio</b> . . . . .	<b>xix</b>
<b>1 Astronomia antiga</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Os astrônomos da Grécia antiga . . . . .	2
1.2 Constelações . . . . .	4
<b>2 A esfera celeste</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>3 Coordenadas</b> . . . . .	<b>13</b>
3.1 Coordenadas geográficas . . . . .	13
3.2 Coordenadas astronômicas . . . . .	14
3.2.1 O sistema horizontal . . . . .	14
3.2.2 O sistema equatorial celeste . . . . .	14
3.2.3 O sistema equatorial local . . . . .	16
3.2.4 Tempo sideral . . . . .	16
<b>4 Movimento diurno dos astros</b> . . . . .	<b>19</b>
4.1 Fenômenos do movimento diurno . . . . .	20
4.1.1 Nascer e ocaso de um astro . . . . .	20
4.1.2 Passagem meridiana de um astro . . . . .	20
4.1.3 Estrelas circumpolares . . . . .	20
4.2 Movimento diurno do Sol . . . . .	21
<b>5 Trigonometria esférica</b> . . . . .	<b>23</b>
5.1 Definições básicas . . . . .	23
5.2 Triângulos esféricos . . . . .	23
5.2.1 Propriedades dos triângulos esféricos . . . . .	24
5.2.2 Solução de triângulos esféricos . . . . .	24
5.3 O triângulo de posição . . . . .	25
5.4 Algumas aplicações: . . . . .	27
5.4.1 Ângulo horário no ocaso . . . . .	27
5.4.2 Separação angular entre duas estrelas. . . . .	28
<b>6 Medida do tempo</b> . . . . .	<b>31</b>
6.1 Tempo sideral . . . . .	31
6.2 Tempo solar . . . . .	31

6.2.1	Fusos horários . . . . .	32
6.2.2	Equação do tempo . . . . .	33
6.3	Calendário . . . . .	33
<b>7</b>	<b>Movimento anual do Sol . . . . .</b>	<b>37</b>
7.1	Estações do ano . . . . .	37
7.1.1	Posições características do Sol . . . . .	37
7.1.2	Estações em diferentes latitudes . . . . .	39
7.2	Insolação . . . . .	40
<b>8</b>	<b>Movimentos da Lua . . . . .</b>	<b>43</b>
8.1	Fases da Lua . . . . .	43
8.1.1	Mês lunar e mês sideral . . . . .	45
8.1.2	Dia lunar . . . . .	45
8.1.3	Rotação da Lua . . . . .	45
8.2	Eclipses . . . . .	45
8.2.1	Geometria da sombra . . . . .	46
8.2.2	Eclipses do Sol e da Lua . . . . .	48
8.3	Exemplos de cálculos de eclipses . . . . .	51
<b>9</b>	<b>Movimento dos planetas . . . . .</b>	<b>55</b>
9.1	O modelo geocêntrico de Ptolomeu . . . . .	55
9.2	Copérnico e o modelo heliocêntrico . . . . .	56
9.3	Classificação dos planetas pela distância ao Sol . . . . .	56
9.4	Configurações planetárias . . . . .	57
9.4.1	Configurações de um planeta inferior . . . . .	57
9.4.2	Configurações de um planeta superior . . . . .	58
9.5	Período sinódico e sideral dos planetas . . . . .	58
9.5.1	Relação entre os dois períodos . . . . .	58
9.6	Exemplos de períodos . . . . .	59
9.7	Distâncias dentro do Sistema Solar . . . . .	59
9.7.1	Distâncias dos planetas inferiores . . . . .	60
9.7.2	Distâncias dos planetas superiores . . . . .	60
<b>10</b>	<b>As leis de Kepler . . . . .</b>	<b>63</b>
10.1	Tycho . . . . .	63
10.2	Kepler . . . . .	63
10.2.1	Propriedades das elipses . . . . .	64
10.2.2	As três leis . . . . .	67
10.3	Galileo . . . . .	69
<b>11</b>	<b>Newton . . . . .</b>	<b>71</b>
11.1	Gravitação universal . . . . .	73
11.2	Derivação da “constante” <b>K</b> . . . . .	74
11.3	Determinação de massas . . . . .	75

<b>12 Leis de Kepler generalizadas</b> . . . . .	<b>79</b>
12.1 Equação do movimento . . . . .	79
12.2 Conservação da energia total do sistema . . . . .	80
12.3 Conservação do <b>momentum</b> angular . . . . .	81
12.4 Primeira lei de Kepler: Lei das órbitas . . . . .	82
12.5 Segunda lei de Kepler: Lei das áreas . . . . .	85
12.6 Terceira lei de Kepler: Lei harmônica . . . . .	85
12.7 A equação da energia . . . . .	87
12.7.1 Velocidade circular . . . . .	88
12.7.2 Velocidade de escape . . . . .	88
12.7.3 Problema de muitos corpos . . . . .	89
12.7.4 Exemplos . . . . .	89
<b>13 Forças gravitacionais diferenciais</b> . . . . .	<b>93</b>
13.1 Dedução da força diferencial . . . . .	94
13.2 Marés . . . . .	95
13.2.1 Expressão da força de maré . . . . .	95
13.2.2 Maré da Lua e do Sol . . . . .	97
13.2.3 Rotação sincronizada . . . . .	97
13.2.4 Limite de Roche . . . . .	100
13.3 Precessão . . . . .	102
<b>14 O Sol e os planetas</b> . . . . .	<b>107</b>
14.1 Origem do sistema solar . . . . .	109
14.2 Planetologia comparada . . . . .	109
14.2.1 Características gerais dos planetas . . . . .	109
14.2.2 Propriedades fundamentais dos planetas . . . . .	110
14.2.3 Estrutura Interna: . . . . .	112
14.2.4 Superfícies . . . . .	113
14.2.5 Atmosferas . . . . .	115
14.2.6 Efeito estufa . . . . .	116
<b>15 Corpos menores do Sistema Solar</b> . . . . .	<b>119</b>
15.1 Asteróides . . . . .	119
15.2 Objetos do Cinturão de Kuiper . . . . .	119
15.3 Meteoros . . . . .	120
15.4 Impactos na Terra . . . . .	121
15.5 Satélites . . . . .	123
15.6 Anéis . . . . .	123
15.7 Cometas . . . . .	123
15.7.1 Origem dos Cometas . . . . .	126
15.8 Planeta X . . . . .	127
15.9 Chuva de meteoros . . . . .	127
15.10 Luz zodiacal . . . . .	127

<b>16 O Sol - a nossa estrela</b>	<b>129</b>
16.1 Estrutura do Sol	130
16.1.1 A fotosfera	131
16.1.2 A cromosfera	133
16.1.3 A Coroa	133
16.2 A energia do Sol	135
<b>17 Vida</b>	<b>137</b>
17.1 Vida na Terra	137
17.2 Vida no Sistema Solar	138
17.3 Vida na galáxia	138
17.4 OVNI's	139
17.5 Planetas fora do Sistema Solar	140
<b>18 Determinação de distâncias</b>	<b>143</b>
18.1 Paralaxe geocêntrica e heliocêntrica	145
18.1.1 Paralaxe geocêntrica	145
18.1.2 Paralaxe heliocêntrica	145
18.2 Unidades de distâncias astronômicas	146
18.2.1 A unidade astronômica	146
18.2.2 O ano-luz	146
18.2.3 O parsec	148
<b>19 Estrelas binárias</b>	<b>151</b>
19.1 Histórico	151
19.2 Tipos de sistemas binários	151
19.3 Massas de sistemas binários visuais	153
19.4 Massas de binárias espectroscópicas	154
<b>20 Fotometria</b>	<b>157</b>
20.1 Grandezas típicas do campo de radiação	158
20.2 Ângulo sólido	158
20.3 Intensidade específica	159
20.4 Fluxo	160
20.5 Magnitudes	162
20.5.1 Sistemas de magnitudes	162
20.5.2 Índices de cor	163
20.5.3 Magnitude absoluta	164
20.5.4 Magnitude bolométrica	164
20.5.5 Sistema de Strömgren	165
20.5.6 Extinção atmosférica	165
20.5.7 Extinção interestelar e Excesso de cor	167
20.6 Teoria da Radiação	169
20.6.1 O corpo negro	169
20.6.2 Lei de Wien	172
20.6.3 Lei de Stefan-Boltzmann	172



<b>21</b>	<b>Espectroscopia</b>	<b>175</b>
21.1	Histórico	175
21.2	Leis de Kirchhoff	177
21.2.1	Variação do espectro contínuo com a temperatura	177
21.3	A origem das linhas espectrais: átomos e luz	178
21.3.1	Quantização	178
21.3.2	Níveis de energia do hidrogênio	179
21.4	Classificação Espectral	183
21.4.1	A seqüência espectral e a temperatura das estrelas	187
21.5	Classificação de luminosidade	187
21.6	Velocidade radial e efeito Doppler	188
21.7	Perfil da linha	189
21.8	Lei de Boltzmann - Equação de Excitação	189
21.9	Lei de Saha - Equação de Ionização	190
<b>22</b>	<b>Estrelas</b>	<b>193</b>
22.1	O Diagrama HR	193
22.2	Cúmulos e Aglomerados Estelares	197
22.3	Distâncias espectroscópicas	197
22.4	A relação massa-luminosidade	199
22.5	Extremos	200
22.5.1	As estrelas mais luminosas	201
22.5.2	As estrelas de baixa luminosidade	202
22.5.3	As anãs brancas	202
22.6	A fonte de energia das estrelas	203
22.7	Fusão termonuclear	206
22.8	Tempo de vida das estrelas	209
22.9	Escalas de tempo evolutivo	210
22.9.1	Tempo nuclear	210
22.9.2	Tempo térmico	210
22.9.3	Tempo dinâmico	211
22.10	O Problema do neutrino solar	211
22.11	Energia nuclear de ligação	214
22.12	Massas Nucleares	215
22.13	Evolução final das estrelas	217
22.14	Estrelas Variáveis	225
<b>23</b>	<b>Interiores estelares</b>	<b>231</b>
23.1	Temperatura	231
23.2	Pressão mecânica	234
23.2.1	Gás não-degenerado	235
23.2.2	Gás de fótons	237
23.2.3	Degenerescência dos elétrons	238
23.2.4	Degenerescência parcial	242
23.3	Energia de Fermi	245
23.3.1	T=0	245

23.3.2	Gás não-degenerado, ionizado . . . . .	245
23.3.3	Degenerescência fraca . . . . .	245
23.3.4	Altamente degenerado, ultra-relativístico . . . . .	245
23.4	Gás, $T=0$ . . . . .	246
23.5	Gás não-degenerado, ionizado . . . . .	247
23.6	Gás fracamente degenerado . . . . .	247
23.7	Gás altamente degenerado, ultra-relativístico . . . . .	249
23.8	Equilíbrio hidrostático . . . . .	252
23.9	Reserva de energia de uma estrela . . . . .	255
23.9.1	Algumas relações termodinâmicas . . . . .	258
23.9.2	Energia nuclear . . . . .	266
23.9.3	Ciclo próton-próton . . . . .	266
23.9.4	Ciclo CNO . . . . .	268
23.9.5	Tripla- $\alpha$ . . . . .	270
23.9.6	Queima do carbono . . . . .	272
23.10	Condição de equilíbrio térmico . . . . .	273
23.11	O Transporte de energia radiativo . . . . .	276
23.12	A Equação de transporte radiativo . . . . .	276
23.13	Equilíbrio radiativo no interior estelar . . . . .	278
23.14	Ordem de grandeza da luminosidade . . . . .	284
23.15	A relação massa-luminosidade . . . . .	284
23.16	Estabilidade do equilíbrio térmico . . . . .	285
23.17	Transporte de energia por convecção . . . . .	285
23.17.1	Condição de estabilidade do equilíbrio radiativo . . . . .	286
23.17.2	Equilíbrio convectivo . . . . .	290
23.17.3	Transporte de energia por convecção . . . . .	290
23.17.4	Aproximação adiabática . . . . .	293
23.17.5	Características da convecção no interior estelar . . . . .	294
23.17.6	<b>Overshooting</b> e semiconvecção . . . . .	295
23.18	Abundância dos elementos . . . . .	297
23.18.1	Variação da composição com o tempo . . . . .	298
23.18.2	Difusão . . . . .	299
23.18.3	Regiões convectivas . . . . .	302
23.19	Opacidades . . . . .	302
23.19.1	Transições ligado-livre . . . . .	304
23.19.2	Transições livre-livre . . . . .	305
23.19.3	Coefficiente de absorção monocromática . . . . .	307
23.19.4	Espalhamento Thomson . . . . .	308
23.19.5	Coefficiente total . . . . .	310
23.19.6	Íon negativo de hidrogênio . . . . .	312
23.20	Geração de Energia Nuclear . . . . .	318
23.20.1	Seção de choque e taxa de reação . . . . .	318
23.20.2	Reações não-ressonantes . . . . .	319
23.20.3	Reações ressonantes . . . . .	322
23.20.4	Escudamento eletrônico . . . . .	325
23.20.5	Síntese de elementos pesados . . . . .	327

23.21	Emissão de neutrinos . . . . .	327
23.22	Polítropos . . . . .	338
23.22.1	Aplicações para anãs brancas . . . . .	342
23.23	Limite de Eddington . . . . .	343
23.24	Modelos de evolução . . . . .	344
23.25	Condições de contorno . . . . .	345
23.25.1	Atmosferas estelares . . . . .	345
23.25.2	Envelope radiativo . . . . .	349
23.25.3	Estrelas completamente convectivas . . . . .	349
23.26	Resultado dos modelos . . . . .	355
23.27	Anãs brancas . . . . .	373
23.27.1	Propriedades de anãs brancas não-binárias . . . . .	374
23.27.2	Evolução das anãs brancas . . . . .	378
23.27.3	Evolução Térmica das Anãs Brancas . . . . .	381
23.27.4	Cristalização . . . . .	385
23.27.5	Função luminosidade . . . . .	390
23.28	Novas e supernovas . . . . .	393
23.29	Equilíbrio hidrostático na Relatividade Geral . . . . .	400
23.29.1	Schwarzschild . . . . .	404
23.29.2	Avermelhamento Gravitacional . . . . .	405
23.29.3	Tensores Covariantes e Contravariantes . . . . .	406
23.29.4	Tolman-Oppenheimer-Volkoff . . . . .	407
23.30	Formação estelar . . . . .	413
23.31	Estrelas binárias . . . . .	423
23.31.1	Binárias Próximas . . . . .	425
23.31.2	Discos de Acresção . . . . .	426
23.31.3	Envelope Comum . . . . .	427
23.32	Pulsações Radiais Adiabáticas . . . . .	429
23.32.1	A Equação de Onda Adiabática e Linear . . . . .	434
23.32.2	Alguns Exemplos . . . . .	435
23.33	Pulsações não-radiais . . . . .	436
23.33.1	Aproximação Não Adiabática . . . . .	442
23.33.2	Heliosismologia . . . . .	443
23.33.3	Pulsações das Anãs Brancas . . . . .	444
23.34	Efeitos não lineares . . . . .	445
23.35	Pulsações das ZZ Ceti . . . . .	447
23.36	Bibliografia . . . . .	452
<b>24</b>	<b>A escala do universo . . . . .</b>	<b>453</b>
<b>25</b>	<b>Nossa galáxia: a Via Láctea . . . . .</b>	<b>455</b>
25.1	Sistema de coordenadas galácticas . . . . .	456
25.2	Distâncias dentro da Galáxia . . . . .	457
25.2.1	Relação Período-Luminosidade . . . . .	458
25.3	Forma e tamanho da Via Láctea . . . . .	458
25.4	O movimento das estrelas na Galáxia . . . . .	460

25.4.1	Componentes dos movimentos estelares . . . . .	460
25.4.2	O sistema local de repouso (SLR) . . . . .	462
25.5	A rotação e a massa da Galáxia . . . . .	462
25.5.1	Massa da Galáxia . . . . .	462
25.5.2	A curva de rotação da Galáxia . . . . .	463
25.5.3	Velocidade e distância galactocêntrica do Sol . . . . .	465
25.6	Meio interestelar . . . . .	468
25.6.1	Gás interestelar . . . . .	468
25.6.2	A poeira interestelar . . . . .	469
25.6.3	Moléculas interestelares . . . . .	470
25.7	Populações estelares . . . . .	470
25.8	Estrutura espiral . . . . .	471
25.9	O Centro da Galáxia . . . . .	473
<b>26</b>	<b>Galáxias . . . . .</b>	<b>475</b>
26.1	A descoberta das galáxias . . . . .	475
26.2	Classificação morfológica . . . . .	476
26.2.1	Espirais (S) . . . . .	477
26.2.2	Elípticas (E) . . . . .	477
26.2.3	Irregulares (I) . . . . .	479
26.3	Massas . . . . .	480
26.3.1	Determinação de massa em galáxias elípticas . . . . .	481
26.3.2	Determinação de massa em galáxias espirais . . . . .	482
26.4	Luminosidade . . . . .	482
26.5	Brilho superficial . . . . .	483
26.5.1	Distribuição de brilho superficial . . . . .	483
26.5.2	Elípticas . . . . .	483
26.5.3	Espirais . . . . .	484
26.6	A relação entre a luminosidade e a velocidade para galáxias elípticas e espirais . . . . .	485
26.7	Aglomerados de galáxias . . . . .	486
26.7.1	O Grupo Local . . . . .	486
26.7.2	Outros aglomerados de galáxias . . . . .	487
26.8	Superaglomerados . . . . .	488
26.9	Colisões entre galáxias . . . . .	488
26.9.1	Fusão de galáxias e canibalismo galáctico . . . . .	489
26.10	A formação e evolução das galáxias . . . . .	490
26.11	Galáxias ativas . . . . .	491
26.11.1	Quasares . . . . .	491
26.11.2	Movimentos superluminais . . . . .	493
26.11.3	Radio-galáxias . . . . .	495
26.11.4	Galáxias Seyfert . . . . .	495
26.11.5	Objetos BL Lacertae (BL Lac) . . . . .	496
26.12	A lei de Hubble . . . . .	498

<b>27</b>	<b>Cosmologia</b>	<b>501</b>
27.1	O Paradoxo de Olbers: a escuridão da noite	501
27.2	Relatividade Geral	503
27.2.1	Lentes Gravitacionais	504
27.3	Expansão do Universo	505
27.4	Big Bang	508
27.5	A questão da matéria escura	510
27.6	A idade do Universo	513
27.7	COBE	515
27.8	Viagem no tempo	521
27.9	Quarks	522
27.10	Superstrings - Cordas Cósicas	523
27.11	Cosmologia newtoniana	527
27.11.1	Densidade crítica	527
27.11.2	Idade do Universo	528
27.11.3	Parâmetro de densidade	529
27.11.4	Parâmetro de desaceleração	534
27.11.5	Big Bang quente	534
27.11.6	Avermelhamento gravitacional	535
27.11.7	Massa de Planck	535
27.12	Cosmologia Relativística	536
27.12.1	Espaço-tempo de Minkowski	536
27.12.2	Coordenadas gaussianas	537
27.12.3	Relatividade Geral	538
27.12.4	Levantando e baixando índices	540
27.12.5	Cosmologia na Relatividade Geral	541
27.12.6	Evolução Térmica após o Big Bang	543
27.12.7	Métrica de Robertson-Walker	545
27.13	Recombinação	548
<b>28</b>	<b>Telescópios</b>	<b>551</b>
28.1	Refrator ou refletor	552
28.2	Radiotelescópio	556
28.3	Comprando um telescópio	557
28.3.1	Características óticas dos telescópios	559
28.3.2	Binóculos	560
28.4	Mínimos Quadrados	563
28.5	Mínimos quadrados lineares	566
28.6	Mínimos quadrados não lineares	566
28.7	Formulação Geral	567
28.8	Determinação das incertezas	569
28.9	Matriz Covariância	570
28.10	$\chi^2$	570
28.11	Estimativa Robusta	572
28.11.1	Probabilidade	572
28.12	Determinação das incertezas	575

<b>A</b>	<b>Biografias</b>	<b>577</b>
A.1	Nicolau Copérnico	577
A.2	Tycho Brahe	579
A.3	Johannes Kepler	581
A.4	Galileo Galilei	585
A.5	Christiaan Huygens	589
A.6	Isaac Newton	590
A.7	Gian Domenico Cassini	593
A.8	Edmond Halley	594
	<b>Bibliografia</b>	<b>597</b>

# Lista de Figuras

1.1	Reprodução do Almagesto . . . . .	4
1.2	Mapa do céu na área da constelação do Órion. . . . .	5
2.1	Esfera Celeste . . . . .	9
2.2	Esfera celeste visível para um certo lugar do hemisfério sul . . . . .	10
2.3	Horizonte . . . . .	11
2.4	Círculos fundamentais da esfera celeste. . . . .	12
3.1	Coordenadas horizontais . . . . .	14
3.2	Coordenadas equatoriais . . . . .	15
3.3	Definição astronômica de latitude . . . . .	16
3.4	Ângulo horário . . . . .	17
3.5	Hora sideral. . . . .	18
4.1	Movimento dos astros em diferentes latitudes. . . . .	19
4.2	Calotas circumpolares. . . . .	20
4.3	Círculos diurnos do Sol . . . . .	21
6.1	Dia Solar . . . . .	32
7.1	Gnômon . . . . .	38
7.2	Posições do Sol na eclíptica no início de cada estação . . . . .	39
7.3	Causa das estações do ano. . . . .	40
7.4	Insolação. . . . .	41
8.1	Lua cheia ao nascer. . . . .	44
8.2	Representação esquemática do movimento da Lua em torno da Terra . . . . .	46
8.3	Geometria da sombra (umbra e penumbra) . . . . .	47
8.4	Eclipse Solar . . . . .	48
8.5	Diagrama de um eclipse lunar . . . . .	49
8.6	Fases da Lua . . . . .	51
9.1	Modelo de Ptolomeu. . . . .	56
9.2	Movimento retrógrado de um planeta superior. . . . .	57
9.3	Período sinódico e sideral. . . . .	58
10.1	Afélio e periélio da órbita planetária . . . . .	65
10.2	Elipse . . . . .	68

10.3	Fases de Vênus . . . . .	70
11.1	Aceleração centrípeta. . . . .	72
12.1	Componentes de uma cônica. . . . .	83
12.2	Trajatória em coordenadas esféricas. . . . .	86
12.3	Transferência de Hohmann. . . . .	90
13.1	A força sobre a partícula $m_2$ é menor do que sobre o centro de massa . . . . .	93
13.2	A maré alta segue a posição da Lua. . . . .	95
13.3	Forças sobre partículas em relação ao centro de massa . . . . .	96
13.4	Marés vivas e marés mortas . . . . .	98
13.5	A força de maré tende a sincronizar as órbitas, reduzindo a fricção. . . . .	99
13.6	Precessão de um pêlo. . . . .	103
13.7	Precessão do pólo norte celeste. . . . .	104
13.8	Precessão do pólo sul celeste. . . . .	105
13.9	Precessão do Equador Celeste. . . . .	105
14.1	Formação do sistema solar . . . . .	110
14.2	O Sol, os planetas e Plutão . . . . .	112
14.3	Interior dos planetas gigantes e terrestres. . . . .	113
15.1	Meteorito ALH84001. . . . .	121
15.2	Meteor Crater . . . . .	122
15.3	Chicxulub . . . . .	122
15.4	Anéis de Saturno. . . . .	124
15.5	Partes de um cometa . . . . .	125
15.6	Cauda de um cometa . . . . .	125
15.7	Cometa West. . . . .	126
16.1	Foto do Sol . . . . .	129
16.2	Foto do Sol na linha de 584 Å do hélio (HeI) . . . . .	131
16.3	Manchas Solares . . . . .	132
16.4	Distribuição de temperatura e densidade na atmosfera do Sol. . . . .	132
16.5	Eclipse do Sol . . . . .	133
16.6	Flares Solares . . . . .	134
16.7	Magnetosfera da Terra - cinturão de Van Allen. . . . .	134
18.1	Deslocamento aparente dos objetos vistos de ângulos distintos. . . . .	143
18.2	Ângulo paralático . . . . .	144
18.3	Ângulo plano $\alpha$ , correspondente a um arco $a$ à uma distância $r$ . . . . .	145
18.4	Paralaxe heliocêntrica . . . . .	145
18.5	Medida da velocidade da luz . . . . .	147
18.6	Paralaxe e parsec . . . . .	148
19.1	Binárias espectroscópicas . . . . .	152
19.2	Centro de massa, CM, entre dois objetos $M_1$ e $M_2$ . . . . .	154



20.1	Espectro eletromagnético. . . . .	157
20.2	Ângulo plano $\alpha$ e ângulo sólido $\omega$ . . . . .	158
20.3	Intensidade específica na direção $\theta$ . . . . .	159
20.4	Relação ente fluxo e distância. . . . .	161
20.5	Brilho superficial . . . . .	161
20.6	Curvas de transmissão dos filtros UBV. . . . .	163
20.7	Sistema de Strömgen . . . . .	165
20.8	Absorção atmosférica. . . . .	166
20.9	Excesso de cor . . . . .	168
20.10	Gráfico da lei de Planck para diferentes temperaturas. . . . .	170
20.11	Ilustração da lei de Wien. . . . .	173
21.1	Imagem de um espectro de H . . . . .	175
21.2	Níveis de energia do hidrogênio . . . . .	181
21.3	Formação de linhas de absorção e de emissão. . . . .	182
21.4	Intensidade das Linhas Espectrais . . . . .	184
21.5	Espectros por classe espectral . . . . .	185
21.6	Espectros com Função de Planck . . . . .	186
22.1	Diagrama HR. . . . .	194
22.2	Diagrama HR do HIPPARCOS . . . . .	195
22.3	Diagrama HR dos aglomerados . . . . .	198
22.4	Distribuição de estrelas por tipo . . . . .	199
22.5	Relação massa-luminosidade. . . . .	200
22.6	Estrelas da sequência principal. . . . .	201
22.7	Sírius A e B . . . . .	202
22.8	Ciclo próton-próton. . . . .	207
22.9	Energia de ligação dos átomos . . . . .	215
22.10	Esquema de evolução estelar . . . . .	218
22.11	Nebulosa Planetária . . . . .	219
22.12	Simulação de Supernova . . . . .	220
22.13	Diagrama HR teórico para $5 M_{\odot}$ . . . . .	222
22.14	Diagrama HR teórico até anã-branca . . . . .	223
22.15	Estrelas Variáveis . . . . .	229
23.1	Pressão . . . . .	234
23.2	Distribuição de Fermi-Dirac . . . . .	238
23.3	Diagrama $\rho - T$ . . . . .	244
23.4	Secção de choque dos neutrinos . . . . .	268
23.5	Espectro de neutrinos solares . . . . .	269
23.6	Abundâncias com CNO . . . . .	270
23.7	Abundâncias com Triplo- $\alpha$ . . . . .	271
23.8	Intensidade e ângulo sólido . . . . .	277
23.9	Deslocamento por convecção. . . . .	286
23.10	Convecção . . . . .	291
23.11	Coefficiente de absorção monocromático. . . . .	308
23.12	Relação entre as opacidades . . . . .	312

23.13	Regiões de domínio dos diferentes tipos de absorção. . . . .	312
23.14	Opacidade conductiva . . . . .	314
23.15	Opacidade Total. . . . .	316
23.16	Opacidade de Rosseland . . . . .	317
23.17	Fatores dominantes na taxa de reação nuclear. . . . .	322
23.18	Taxa de reação nuclear para $p + p$ e $3\text{He}^4$ . . . . .	324
23.19	Taxa de reação nuclear para $C^{12} + p$ e $C^{12} + \alpha$ . . . . .	326
23.20	Abundâncias Solares . . . . .	328
23.21	Mário Schenberg . . . . .	329
23.22	Emissão de neutrinos . . . . .	330
23.23	Refrigeração por neutrinos . . . . .	331
23.24	Variação na produção de neutrinos . . . . .	331
23.25	Áxions . . . . .	335
23.26	Emissão de Áxions . . . . .	336
23.27	Emissão de Áxions e Neutrinos . . . . .	337
23.28	Seqüência principal e zona completamente convectiva . . . . .	352
23.29	Seqüência principal: diferentes composições químicas . . . . .	353
23.30	Evolução a partir da seqüência principal. . . . .	357
23.31	Evolução de Pop. I. . . . .	358
23.32	Modelos Evolucionários . . . . .	359
23.33	Densidade e temperaturas centrais . . . . .	360
23.34	Isócronas teóricas. . . . .	360
23.35	Isócrona de 12,5 Ganos . . . . .	361
23.36	Evolução de $25 M_{\odot}$ . . . . .	364
23.37	Taxas de perda de massa para estrelas massivas. . . . .	365
23.38	Seqüências evolucionárias com perda de massa . . . . .	366
23.39	Evolução da estrutura interna e $5 M_{\odot}$ . . . . .	366
23.40	Evolução da estrutura interna e $1,3 M_{\odot}$ . . . . .	367
23.41	Diagrama H-R de 4 a $9 M_{\odot}$ . . . . .	368
23.42	Variação do raio das estrelas com o tempo . . . . .	369
23.43	Massa da anã-branca vs. massa inicial . . . . .	369
23.44	Icko Iben Jr. . . . .	371
23.45	Zonas de Convecção . . . . .	372
23.46	Diagrama HR teórico incluindo nebulosa planetária . . . . .	372
23.47	Diagrama HR teórico para diversas massas . . . . .	373
23.48	Evolução das DAs e Não DAs. . . . .	379
23.49	<i>Born Again</i> . . . . .	380
23.50	Luminosidade em neutrinos . . . . .	385
23.51	Temperatura de Cristalização . . . . .	386
23.52	Transição de Fase . . . . .	387
23.53	Efeito da separação de fase no esfriamento . . . . .	388
23.54	Efeito da separação de fase na idade . . . . .	388
23.55	Função luminosidade das anãs brancas . . . . .	391
23.56	Anãs Brancas no Halo . . . . .	392
23.57	Nova Cygni 1992 . . . . .	393
23.58	Emissão de neutrinos . . . . .	394

23.59	Lóbulo de Roche . . . . .	394
23.60	Disco de Acréscimo . . . . .	395
23.61	Anéis em volta da SN1987A . . . . .	396
23.62	Estrutura de uma estrela de nêutrons . . . . .	407
23.63	Formação Estelar . . . . .	419
23.64	Esquema de formação estelar . . . . .	420
23.65	Discos Proto-Estelares . . . . .	421
23.66	Espectro de uma protoestrela . . . . .	422
23.67	Evolução de Proto-estrelas . . . . .	423
23.68	Equipotenciais de um Sistema Binário . . . . .	424
23.69	Equipotenciais para massas diferentes . . . . .	425
23.70	Envelope Comum . . . . .	428
23.71	Cenários para evolução de binárias . . . . .	429
23.72	Cenário para SNIa . . . . .	430
25.1	Via Láctea no céu do hemisfério sul . . . . .	455
25.2	Plano galáctico . . . . .	457
25.3	Faixa de instabilidade . . . . .	459
25.4	Representação da Via Láctea . . . . .	460
25.5	Componentes dos movimentos estelares. . . . .	461
25.6	Velocidades estelares a diferentes distâncias do centro galáctico. . . . .	464
25.7	Curva de rotação galáctica. . . . .	466
25.8	Velocidade do Sol . . . . .	467
25.9	Nebulosa de Órion . . . . .	468
25.10	Braço formado por rotação diferencial. . . . .	472
25.11	Braço espiral como onda de densidade . . . . .	472
26.1	Classificação de galáxias de Hubble . . . . .	476
26.2	Espirais Barradas . . . . .	478
26.3	A galáxia elíptica gigante M87 . . . . .	478
26.4	A Grande Nuvem de Magalhães . . . . .	479
26.5	Movimentos das estrelas em uma galáxia elíptica . . . . .	480
26.6	Movimentos das estrelas em uma galáxia espiral. . . . .	481
26.7	Curva de rotação para a galáxia espiral NGC3198. . . . .	482
26.8	Perfil de brilho superficial de uma galáxia elíptica. . . . .	484
26.9	Perfil de brilho para uma galáxia espiral . . . . .	485
26.10	O aglomerado de galáxias de Coma . . . . .	486
26.11	Aglomerado de galáxias Abell 2218 . . . . .	487
26.12	Estrutura em grande escala . . . . .	489
26.13	Quasar 3C 279 . . . . .	492
26.14	Modelo de quasar . . . . .	492
26.15	Galáxias onde ocorrem quasares . . . . .	493
26.16	Espectro de 3C 273 . . . . .	494
26.17	Espectro de um quasar com $z=5$ . . . . .	495
26.18	Imagem ótica e rádio de 3C219 . . . . .	496
26.19	Geometria de um movimento superluminal . . . . .	497

26.20 Lei de Hubble . . . . .	499
27.1 Paradoxo de Olbers. . . . .	502
27.2 Cruz de Einstein . . . . .	505
27.3 Deslocamento do Perélio de Mercúrio . . . . .	505
27.4 Distribuição em grande escala . . . . .	506
27.5 Alexander Friedmann e Georges Lemaître . . . . .	507
27.6 Radiação do Fundo do Universo: Penzias e Wilson . . . . .	508
27.7 Comparação das medidas do COBE com Modelo Inflacionário . . . . .	512
27.8 Abundâncias no Big-Bang . . . . .	515
27.9 Experimento FIRAS do satélite COBE . . . . .	516
27.10 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) . . . . .	519
27.11 Decomposição em esféricos harmônicos das flutuações . . . . .	520
27.12 Representação esquemática de uma corda cósmica. . . . .	523
28.1 Triquetrum e Astrolábio. . . . .	551
28.2 Teodolito de Leonard Digges . . . . .	552
28.3 Réplica do telescópio de Galileo de 3 cm de diâmetro. . . . .	552
28.4 Esquema de Refletor e Refrator. . . . .	553
28.5 Telescópio de Newton. . . . .	553
28.6 Sextante de Hadley . . . . .	554
28.7 Telescópio Keck I, no Hawai'i, com 10 m de diâmetro. . . . .	554
28.8 Esquema de um telescópio catadrióptico. . . . .	555
28.9 O telescópio de James Nasmyth, com o próprio na lateral. . . . .	555
28.10 Conjunto de radiotelescópios do VLA: Very Large Array. . . . .	556
28.11 Telescópio Dobsonian. . . . .	557
28.12 Telescópio Schmidt-Cassegrain . . . . .	558
28.13 Telescópio apocromático. . . . .	558
28.14 Esquema de um binóculo. . . . .	561