

SUMÁRIO

Os Autores	V
Dedicatórias	VII
Prefácio	IX
1 Introdução à Cosmologia Física	1
2 Gravitação de Newton	5
2.1 Força gravitacional sobre o eixo de um anel de matéria	8
2.2 Força gravitacional de uma casca esférica	12
2.3 Força gravitacional de uma esfera maciça	17
2.4 Velocidade orbital	21
2.5 Energia potencial gravitacional	23
2.6 Velocidade de escape	28
2.7 Buraco negro	29
3 Primórdios da Cosmologia: Universo de Galáxias	31
3.1 Distância até Andrômeda (M31)	33
3.2 Limite de detecção	40
3.3 Técnica de Zwicky	45

4	A Descoberta da Matéria Escura	49
4.1	Massa luminosa	50
4.2	Massa dinâmica	53
4.3	Rotação da galáxia andrômeda	54
4.3.1	Bojo	57
4.3.2	Disco	63
4.3.3	Halo de Matéria Escura	68
4.4	Estudo do aglomerado de Coma	75
4.4.1	Massa luminosa	75
4.4.2	Massa dinâmica	76
4.4.2.1	Teorema do Virial	77
5	Observando a Expansão	83
5.1	Medida da velocidade	87
5.2	Interpretação do <i>Redshift</i>	88
6	Interpretação Cosmológica da Lei de Hubble-Lemaître	91
6.1	Efeito Doppler e <i>Redshift</i> cosmológico	102
6.2	Fluxo de Hubble	107
6.3	Escalas de tempo e tamanho para o Universo	108
7	Modelo Cosmológico Newtoniano	111
7.1	Coordenadas comóveis	113
7.2	Lei de Hubble-Lemaître a partir das coordenadas comóveis . .	114
7.3	Equação de aceleração de Friedmann	114
7.4	Equação de Friedmann-Lemaître	119
7.5	Interpretação da equação de Friedmann-Lemaître	122
7.5.1	Expansão eterna ($k < 0$)	123
7.5.2	Expansão e colapso ($k > 0$)	124
7.5.3	Cenário crítico ($k = 0$)	124
7.5.4	Densidade de Matéria, $\Omega_{M,0}$	126
8	Modelos de Friedmann-Lemaître	129
8.1	O termo de radiação	134
8.2	Equação de Friedmann-Lemaître com componente radiativa . .	135
8.3	Estimativas do parâmetro $\Omega_{R,0}$	140

8.4	Universo dominado por radiação	141
8.5	A Constante Cosmológica Λ	144
9	Interpretação de Λ	149
9.1	A equação de estado para uma caixa de partículas	151
9.1.1	Aplicação para partículas não relativísticas	155
9.1.2	Aplicação para a luz	156
9.1.3	Aplicação para a Energia Escura	157
9.1.4	Equação de estado generalizada	159
10	Interpretação de k	163
10.1	Medindo π	167
10.2	Medindo π sobre uma esfera	170
10.3	Parâmetro de curvatura	176
10.4	Medindo π na métrica de FLRW	177
11	Soluções Numéricas	183
12	Paradoxo de Olbers	195
13	Idades	201
14	Distâncias em Cosmologia	211
14.1	Distância de luminosidade	217
14.2	Horizonte de partículas	221
15	Efeitos Relativísticos na Lei de Hubble–Lemaître	227
16	Parâmetro de Desaceleração	237
17	Os Alicerces da Física Moderna	247
17.1	A Mecânica Estatística	248
17.2	A Teoria Eletromagnética	252
17.3	A Física Quântica	257

18	Modelo Padrão de Partículas	267
18.1	Fatos sobre a Matéria Escura	275
18.2	Aniquilamento e formação de pares	277
19	Surgimento da Matéria	281
19.1	Era Leptônica	290
19.2	Nucleogênese	291
19.3	Decaimento do nêutron	292
19.4	Formação de Hélio	293
20	Recombinação e Radiação Cósmica de Fundo	295
20.1	Medições da RCF	300
20.2	Análise de dados da RCF	308
21	Dipolo Cinemático	313
21.1	Efeito Doppler na RCF	318
21.1.1	Expansão para $\beta \ll 1$	320
21.2	Medição da temperatura da RCF	321
21.3	Medição da velocidade em relação à RCF	325
22	Autocorrelação	329
22.1	Autocorrelação na RCF	339
23	Análise de Multipolos	347
23.1	Expansão em série de Taylor	348
23.2	Decomposição vetorial	353
23.3	Decomposição polinomial	356
23.4	Produto interno no espaço das funções contínuas	357
23.5	Multipolos eletromagnéticos	358
23.6	Propriedades dos polinômios de Legendre	364
23.7	Polinômios de Legendre - Exemplos numéricos	366
24	Expansão da RCF em multipolos	375

25 Oscilações Acústicas na RCF	391
25.1 Tamanho angular do horizonte causal	394
25.2 Anisotropias da RCF	397
25.3 Harmônicos	402
26 Picos Acústicos	409
26.1 Primeiro pico acústico	409
26.2 Segundo pico acústico	412
26.3 Degenerescência de Ω_b e Ω_K	415
26.4 Picos mais altos	415
26.5 Escalas acima do horizonte causal	417
27 Inflação	419
27.1 Problemas do Modelo Λ CDM	421
27.2 Flutuações primordiais	425
27.3 Teoria da Inflação	425
27.4 Mecanismo da Inflação	428
27.5 Críticas à Teoria Inflacionária	431
28 Oscilações Acústicas de Bárions	435
28.1 Fazendo medidas	442
29 Filosofia e Cosmologia	449
29.1 As questões básicas da Cosmologia	452
29.2 As maiores questões da Cosmologia hoje	454
29.3 Testes de consistência da Cosmologia	456
29.4 As consequências da unicidade do Universo	458
29.5 Multiversos	460
29.5.1 O Princípio Antrópico	462
29.6 O infinito	464
29.7 Os limites para testarmos as leis físicas	465
29.8 Não existem singularidades em Astrofísica	466
Referências Bibliográficas	469