

---

# **Teoria do Campo Eletromagnético e da Relatividade**





---

# Teoria do Campo Eletromagnético e da Relatividade

*José Roberto Pinheiro Mahon*

Instituto de Física Armando Dias Tavares  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro



2021

Copyright © 2021 Editora Livraria da Física  
1ª 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)

---

Mahon, José Roberto Pinheiro  
Teoria do campo eletromagnético e da relatividade / José Roberto Pinheiro Mahon. – 1. ed. –  
São Paulo : Livraria da Física, 2021.

ISBN 978-65-5563-114-2

1. Eletromagnetismo - Estudo e ensino I. Título.

21-69992

CDD-537.07

---

Índices para catálogo sistemático:

1. Eletromagnetismo: Física: Estudo e ensino 537.07

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

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 Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



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

*A meus pais, José (in memoriam) e Zélia.  
A Geisa, por seu amor e paciência.*



## Sobre o Autor



José Roberto Pinheiro Mahon, nascido em Bauru, no Estado de São Paulo, em 1955, é professor e pesquisador do Departamento de Física Nuclear e Altas Energias, no Instituto de Física Armando Dias Tavares da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Graduado em matemática e tecnologia mecânica em Sorocaba (FAFI e FATEC-UNESP), fez seu mestrado em física na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e obteve seu doutorado em física pela Universidade de São Paulo (USP). Com formação científica na área de física de partículas, desenvolveu pesquisas em física experimental de altas energias e trabalhou em colaborações internacionais tanto no Fermilab, Estados Unidos, como no CERN, na Europa. Atualmente dedica-se a teoria clássica e quântica de campos, QCD e fundamentos de física. Publicou mais de 135 trabalhos em periódicos científicos internacionais, além de apresentações em congressos internacionais. Orienta alunos de graduação e de pós-graduação. É coautor do livro *Estimativas e erros em experimentos de Física*, já na terceira edição (2013) publicado pela EdUERJ, autor do livro *Mecânica Quântica - desenvolvimento contemporâneo com aplicações* (2011) publicado pela LTC Editora, coautor do livro *Introdução à QCD perturbativa* (2013) também publicado pela LTC Editora e autor do livro *Mecânica Clássica - fundamentos teóricos e aplicações* (2020) publicado pela Ed. Livraria da Física.





# Prefácio

A teoria eletromagnética clássica e a relatividade, juntamente com as mecânicas clássica, quântica e estatística, compõem o núcleo da formação teórica atual para os físicos, tanto na graduação como na pós-graduação. Uma base sólida nesses assuntos é um requisito para uma formação mais avançada ou especializada.

Este texto é baseado em um curso de pós-graduação em eletromagnetismo que ministrei nos últimos quinze anos no INSTITUTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, é uma exposição básica e com abordagem moderna da teoria clássica do campo eletromagnético e da relatividade restrita e geral.

Um programa típico de graduação em eletromagnetismo envolve dois semestres com ênfase nas leis fundamentais, equações de onda eletromagnética e radiação. As ferramentas matemáticas utilizadas incluem cálculo vetorial, equações diferenciais ordinárias, equações diferenciais parciais e funções especiais. No início da pós-graduação vemos mais profundamente o desenvolvimento relativístico e tópicos avançados do eletromagnetismo clássico, como radiação e espalhamento, multipolos toroidais, radiação por partícula em movimento e supercondutividade.

O objetivo do texto é apresentar o eletromagnetismo e a relatividade no contexto da física moderna, incluindo vários exemplos atuais e suas aplicações. Assim, o texto está dirigido aos estudantes avançados de graduação e de pós-graduação em física, estudantes de ciências exatas e engenharia, que trazem uma base sólida da graduação, que gostariam de aperfeiçoar seus conhecimentos, ou seja, espera-se que o estudante tenha familiaridade com o material básico de um curso de eletromagnetismo (nível de graduação) e de matemáticas para a física e engenharia.

Os tópicos introduzidos são tratados de forma compreensiva, procurando-se expor claramente as deduções dos principais resultados. Espero que o texto seja estimulante por ter uma apresentação diferente e nitidamente mais madura e profunda que aquela apresentada em sua formação básica e início do ciclo profissional.

Os temas tratados neste texto foram divididos em vinte e três capítulos assim distribuídos: Introdução aos Conceitos Fundamentais, O Princípio da Relatividade, Partícula em um Campo Eletromagnético, Campos Eletromagnéticos e Simetrias, Eletrostática e Magnetostática, Problemas de Contorno, Multipolos Elétricos Magnéticos e Materiais, Campos Eletromagnéticos Variáveis no Tempo e Calibre, Ondas Eletromagnéticas, Aproximação WKB, Ondas Eletromagnéticas Cilíndricas e Esféricas, Interferência e Difração, Guias de Onda e Cavidades Ressonantes, Sistema de Radiação, Radiação de Cargas Aceleradas, Perda de Energia por Radiação, Fundamentos da Relatividade Geral e Tensores, Curvatura do Espaço-Tempo e Equações de Einstein, Abordagem Variacional e a Solução de Schwarzschild, Cosmologia: Princípios Físicos e Modelo Padrão, Cosmologia Inflacionária, Buracos Negros e finalmente Ondas Gravitacionais. Como o texto está preparado para estudantes avançados de graduação (dois semestres) e para estudantes de pós-graduação (dois semestres), podemos utilizá-lo da seguinte forma: Para a graduação em física, os capítulos 1, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14 e 15; estudantes avançados de engenharia, além destes, acrescentam os capítulos

10 e 11; para a pós-graduação em física (dois semestres) usamos o texto completo. Este texto ainda poderá ser usado como um curso de relatividade (um semestre) para alunos avançados de graduação ou pós, usando os capítulos 1, 2, 3, 4, 17, 18, 19, 20, 21, 22 e 23.

**Agradecimentos** Desejo agradecer aos estudantes que em todos esses anos proporcionaram a motivação para escrever este texto. Em especial Daniel Grangeia, Márcio Capri e Rogério Menezes de Almeida (hoje doutores e professores), além de Sílvia Nunes, Breno D. Chrispim, Juan M. Zárate Pretel, Katharine Ivette Cuba Quispe, solucionando problemas propostos nas listas e propondo problemas avançados durante o curso e Michael Aleixo dos Santos, fazendo um estudo de monopolos magnéticos e cargas elétricas.

Agradeço também aos colegas do Instituto que incentivaram na preparação deste trabalho. Em especial aos profs. José Umberto Cinelli Lobo de Oliveira, pelas discussões dos aspectos fundamentais do eletromagnetismo, relatividade restrita e valiosa ajuda na apresentação do texto; Cesar Augusto Linhares da Fonseca Junior, pelo apoio e discussões sobre o fenômeno de Stokes, a respeito dos multipolos toroidais, momento anapolo e teoria clássica de campos; e Márcio Capri por valiosas discussões e sugestões em teoria clássica de campos, formalismo matemático e relatividade restrita e geral. Cabe lembrar que o prof. Márcio Capri utilizou parte desse material no curso por ele oferecido aos estudantes de pós-graduação da UERJ, o Prof. Rogério Menezes de Almeida utilizou parte desse material em seu curso de pós-graduação oferecido na UFF e também o Prof. José André Lourenço utilizou parte desse material em seu curso de pós-graduação oferecido na UFES (Espírito Santo). Minhas longas conversas com esses amigos e colegas de trabalho foram um grande estímulo para realização deste texto. Cabe aqui um agradecimento especial ao Eduardo de Mattos pela realização e excelente cuidado com as figuras.

*UERJ, Rio de Janeiro, 2021*

**J. R. Mahon**

# Sumário

<b>Sobre o Autor</b>	<b>vii</b>
<b>Prefácio</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução aos Conceitos Fundamentais</b>	<b>1</b>
1.1 Equações de Maxwell . . . . .	3
1.2 Potenciais Eletromagnéticos . . . . .	5
1.3 Invariância de Calibre . . . . .	7
1.4 Princípio da Relatividade na Eletrodinâmica . . . . .	7
1.5 Relatividade Restrita . . . . .	10
1.6 Princípio de Equivalência . . . . .	11
1.7 Relatividade Geral . . . . .	13
Problemas . . . . .	14
Leitura Recomendada . . . . .	15
<b>2 O Princípio da Relatividade</b>	<b>16</b>
2.1 Hipótese histórica do éter . . . . .	16
Transformação de Galileu . . . . .	17
2.2 Postulados de Einstein . . . . .	19
2.3 Experimentos de Fizeau, de Michelson-Morley e Modernos . . . . .	20
Experimento de Fizeau . . . . .	20
Experimento de Michelson-Morley . . . . .	21
Experimentos Modernos . . . . .	22
2.4 Transformação de Lorentz . . . . .	24
Quadrivetores . . . . .	26
Intervalo Invariante e Tempo Próprio . . . . .	26
2.5 Grupos de Lorentz e de Poincaré . . . . .	27
Cone de Luz . . . . .	28
Grupos $O(3, 1)$ e $SO(3, 1)$ . . . . .	29
Grupo $SL(2, \mathbb{C})$ . . . . .	31
Grupo de Poincaré . . . . .	33
2.6 Campos Escalares e Tensores . . . . .	34
2.7 Matriz de Lorentz Generalizada . . . . .	35
2.8 Efeito Doppler e Aberração da Luz . . . . .	36
2.9 Dinâmica Relativística . . . . .	37

Problemas . . . . .	40
Leitura Recomendada . . . . .	41
<b>3 Partícula em um Campo Eletromagnético . . . . .</b>	<b>42</b>
3.1 Quadri vetor Potencial de um Campo . . . . .	42
3.2 Equações de Movimento de uma Partícula em um Campo Eletromagnético . . . . .	44
3.3 Tensor do Campo Eletromagnético . . . . .	45
3.4 Transformação de Lorentz do Campo . . . . .	47
3.5 Invariantes de Lorentz do Campo Eletromagnético . . . . .	50
3.6 Movimento de Cargas em Campos Eletromagnéticos . . . . .	51
Movimento em Campo Elétrico Uniforme . . . . .	51
Movimento em Campo Magnético Uniforme . . . . .	52
Movimento em Campos Compostos . . . . .	53
3.7 Invariantes Adiabáticos - Espelhos Magnéticos . . . . .	54
Espelhos Magnéticos . . . . .	55
Problemas . . . . .	56
Leitura Recomendada . . . . .	57
<b>4 Campos Eletromagnéticos e Simetrias . . . . .</b>	<b>58</b>
4.1 Ação para o Campo Eletromagnético . . . . .	58
4.2 Quadricorrente . . . . .	59
4.3 Equações de Campo . . . . .	61
4.4 Dedução das Equações de Maxwell . . . . .	62
4.5 Invariâncias e Leis de Conservação . . . . .	64
Teorema de Noether e Tensor Canônico . . . . .	64
Tensor Canônico Simétrico . . . . .	65
Leis de Conservação para Campos Eletromagnéticos Interagindo com Partículas . . . . .	69
4.6 Massa Eletromagnética . . . . .	71
Massa Eletromagnética Revisada . . . . .	73
4.7 Hamiltoniana do Campo Eletromagnético . . . . .	79
4.8 Outros Campos . . . . .	82
Campo de Méson de Yukawa . . . . .	82
Campo de Fóton Massivo de Proca . . . . .	83
4.9 Equação de Onda na Forma Covariante . . . . .	84
Problemas . . . . .	91
Leitura Recomendada . . . . .	93
<b>5 Eletrostática e Magnetostática . . . . .</b>	<b>94</b>
5.1 Eletrostática Elementar . . . . .	94
Equações do Campo Eletrostática . . . . .	95
5.2 Lei de Coulomb . . . . .	95
5.3 Lei de Gauss . . . . .	97
5.4 Potencial Eletrostático . . . . .	98
5.5 Equação de Poisson . . . . .	99
5.6 Teorema de Green . . . . .	100
5.7 Condições de Contorno de Dirichlet e Neumann . . . . .	101
5.8 Solução Formal - Função de Green . . . . .	102
5.9 Energia Potencial Eletrostática . . . . .	103

5.10	Magnetostática Elementar . . . . .	105
5.11	Lei de Biot e Savart . . . . .	107
5.12	A Lei de Ampère . . . . .	108
5.13	O Potencial Vetor . . . . .	110
	Espira Circular de Corrente . . . . .	112
	Efeito Aharonov-Bohm . . . . .	118
5.14	Efeito Hall . . . . .	121
	Problemas . . . . .	124
	Leitura Recomendada . . . . .	127
<b>6</b>	<b>Problemas de Contorno</b> . . . . .	<b>128</b>
6.1	Método das Imagens . . . . .	128
	Carga na Esfera Condutora Conectada a Terra . . . . .	129
	Esfera Condutora, Carregada e Isolada . . . . .	130
	Esfera Condutora em Potencial Fixo . . . . .	131
	Esfera Condutora em um Campo Elétrico Uniforme . . . . .	131
6.2	Função de Green para a Esfera, Solução Geral para o Potencial . . . . .	132
6.3	Equação de Laplace em Coordenadas Cartesianas . . . . .	133
6.4	Equação de Laplace em Coordenadas Cilíndricas . . . . .	135
6.5	Função de Green em Coordenadas Cilíndricas . . . . .	140
6.6	Equação de Laplace em Coordenadas Esféricas . . . . .	142
	Relação entre os Polinômios de Legendre e a Função Hipergeométrica . . . . .	146
	Função Associada de Legendre e Harmônicos Esféricos . . . . .	147
6.7	Função de Green em Harmônicos Esféricos . . . . .	150
	Solução Geral com a Função de Green Esférica . . . . .	151
	Problemas . . . . .	153
	Leitura Recomendada . . . . .	155
<b>7</b>	<b>Multipolos Elétricos, Magnéticos e Materiais</b> . . . . .	<b>156</b>
7.1	Expansão do Potencial Escalar em Multipolos . . . . .	156
7.2	Expansão Multipolar da Energia Eletrostática . . . . .	159
7.3	Multipolos Magnéticos . . . . .	161
7.4	Expansão do Potencial Escalar Magnético . . . . .	162
7.5	Torque e Precessão de Larmor . . . . .	167
7.6	Spin num Campo Eletromagnético Externo . . . . .	169
7.7	Polarização e Magnetização . . . . .	172
	Meios Dielétricos e a Polarizabilidade Molecular . . . . .	173
	Densidade de Energia num Meio Dielétrico . . . . .	174
	Densidade de Força num Meio Dielétrico . . . . .	176
	A Relação de Clausius-Mossotti . . . . .	178
	Materiais Magnéticos e o Momento Magnético . . . . .	180
	Potencial Escalar Magnético e Potencial Vetor . . . . .	182
7.8	Equações de Maxwell em Meios Macroscópicos . . . . .	183
	Condições de Contorno . . . . .	184
	Problemas . . . . .	186
	Leitura Recomendada . . . . .	188

<b>8</b>	<b>Campos Eletromagnéticos Variáveis no Tempo e Calibre</b>	<b>189</b>
8.1	A Lei de Faraday . . . . .	189
	Lei de Lenz . . . . .	194
	O Efeito Zeeman . . . . .	197
8.2	Energia no Campo Magnético . . . . .	199
8.3	Corrente de Deslocamento; Equações de Maxwell . . . . .	201
8.4	Potenciais Vetor e Escalar . . . . .	203
8.5	Solução das Equações de Onda, Potenciais de Retardo . . . . .	206
	Significado Físico das Funções de Green . . . . .	207
	Calibre do Campo Eletromagnético e Funções de Green . . . . .	208
	Potenciais em Meios Materiais . . . . .	210
8.6	Generalização de Jefimenko e de Heaviside-Feynman . . . . .	210
8.7	Meios Supercondutores . . . . .	214
8.8	Vetor de Hertz . . . . .	220
8.9	Monopolos Magnéticos . . . . .	221
	Problemas . . . . .	225
	Leitura Recomendada . . . . .	227
<b>9</b>	<b>Ondas Eletromagnéticas</b>	<b>228</b>
9.1	Ondas Planas Em Meios Não Condutores . . . . .	228
9.2	Polarização Linear e Circular . . . . .	233
9.3	Reflexão e Refração . . . . .	237
9.4	Polarização por Reflexão e Reflexão Total . . . . .	242
9.5	<i>Momentum</i> Angular em Ondas Planas . . . . .	244
9.6	Característica da Dispersão da Frequência . . . . .	245
	Modelo Simples para $\varepsilon(\omega)$ . . . . .	246
	Dispersão Anômala e Absorção Ressonante . . . . .	248
	Comportamento em Frequências Baixas . . . . .	248
	Limite de Altas Frequências . . . . .	249
9.7	Ondas Planas num Meio Condutor ou Dissipativo . . . . .	250
	Efeito <i>Skin</i> . . . . .	253
	Reflexão e Refração em uma Superfície Metálica . . . . .	254
9.8	Superposição de Ondas em uma Dimensão . . . . .	259
	Propagação de um Pulso Unidimensional em um Meio Dispersivo . . . . .	261
9.9	Relações de Kramers-Kronig . . . . .	265
9.10	Propagação de Sinal . . . . .	269
	Problemas . . . . .	270
	Leitura Recomendada . . . . .	272
<b>10</b>	<b>Aproximação WKB</b>	<b>274</b>
10.1	Propagação de Ondas de Rádio Através da Ionosfera . . . . .	274
10.2	Método de Aproximação WKB . . . . .	275
10.3	Coeficiente de Reflexão . . . . .	278
10.4	Extensão para Incidência Oblíqua . . . . .	279
10.5	Propagação do Pulso na Ionosfera . . . . .	282
10.6	Densidade Eletrônica da Ionosfera . . . . .	286
10.7	Raio Traçado na Ionosfera . . . . .	288
	Séries Assintóticas . . . . .	289

10.8	Soluções WKB como Séries Assintóticas . . . . .	293
	Constante de Stokes . . . . .	295
	Coeficiente de Reflexão . . . . .	298
	Fórmula de Conexão de Jeffreys . . . . .	300
	Problemas . . . . .	301
	Leitura Recomendada . . . . .	302
<b>11</b>	<b>Ondas Eletromagnéticas Cilíndricas e Esféricas</b>	<b>303</b>
11.1	Vetor de Hertz em Meios Materiais . . . . .	303
11.2	Equações de um Campo Cilíndrico Através do Vetor de Hertz . . . . .	306
	Equações de um Campo Cilíndrico . . . . .	306
	Funções de Onda Cilíndrica Circular . . . . .	308
	Campos de Funções de Onda Cilíndrica Circular . . . . .	311
11.3	Funções de Onda do Cilindro Elíptico . . . . .	312
11.4	Equação de Onda em Coordenadas Esféricas . . . . .	317
	Ondas Esféricas Elementares . . . . .	317
	Equação de Onda Vetorial . . . . .	319
	Funções de Ondas Vetoriais Esféricas . . . . .	321
	Oscilações de uma Esfera . . . . .	322
	Problemas . . . . .	327
	Leitura Recomendada . . . . .	329
<b>12</b>	<b>Interferência e Difração</b>	<b>330</b>
12.1	Interferência . . . . .	330
	Fendas de Young . . . . .	330
	Superposição de Duas Ondas Harmônicas . . . . .	331
	Lâminas Delgadas - Múltipla Interferência . . . . .	332
	Interferômetro . . . . .	333
12.2	Coerência . . . . .	336
	Coerência Temporal . . . . .	337
12.3	Difração . . . . .	338
	Princípio de Huygens e Visão Qualitativa da Difração . . . . .	339
	Teoria de Kirchhoff para Difração . . . . .	339
	Difração de Fraunhofer e Fresnel . . . . .	343
	Princípio de Babinet . . . . .	346
	Aspecto Vetorial da Integral de Kirchhoff . . . . .	347
12.4	Espalhamento e Teorema Óptico . . . . .	348
	Problemas . . . . .	350
	Leitura Recomendada . . . . .	351
<b>13</b>	<b>Guias de Onda e Cavidades Ressonantes</b>	<b>352</b>
13.1	Condições de Contorno em Condutores . . . . .	352
13.2	Cavidades e Guias de Onda . . . . .	355
13.3	Guias de Onda . . . . .	358
13.4	Modos num Guia de Onda Retangular . . . . .	359
13.5	Cavidades Ressonantes . . . . .	360
	Cavidade Retangular . . . . .	361
	Cavidade Cilíndrica . . . . .	361

Cavidade Esférica . . . . .	362
13.6 Potência Dissipada numa Cavidade . . . . .	364
13.7 Guias de Onda Dielétricos . . . . .	365
13.8 Fibras Ópticas . . . . .	367
Problemas . . . . .	368
Leitura Recomendada . . . . .	370
<b>14 Sistemas de Radiação</b>	<b>371</b>
14.1 Ondas Esféricas . . . . .	371
Funções Esféricas de Bessel, Neumann e Hankel . . . . .	372
Função de Green, Ondas Esféricas . . . . .	373
14.2 Radiação de uma Fonte Oscilante Localizada . . . . .	378
14.3 Radiação de Dipolos Elétricos . . . . .	380
14.4 Radiação de Dipolo Magnético . . . . .	383
14.5 Radiação de Quadrupolo Elétrico . . . . .	386
Exemplo: Pulsar de <i>spin-down</i> . . . . .	389
14.6 Radiação por Antenas Lineares . . . . .	390
14.7 Radiação Multipolar via Equações de Jefimenko . . . . .	392
Contribuição do Dipolo Elétrico . . . . .	394
Contribuição do Dipolo Magnético . . . . .	395
Contribuição do Quadrupolo Elétrico . . . . .	396
14.8 Expansão Multipolar dos Campos . . . . .	397
Multipolos Elétrico e Magnético em Espaço Livre . . . . .	397
Expansão em Multipolos para os Campos com Fontes . . . . .	399
Distribuição Angular da Radiação de Multipolo . . . . .	403
14.9 Expansão Multipolar Eletromagnética Incluindo Momentos Toroidais . . . . .	404
Momento Toroidal . . . . .	405
Expansão das Densidades de Corrente . . . . .	407
Derivação da Expansão Multipolar numa Base Canônica . . . . .	409
Intensidade de Radiação de uma Fonte Arbitraria em Termos de Multipolos . . . . .	417
14.10 Espalhamento da Luz . . . . .	428
Problemas . . . . .	435
Leitura Recomendada . . . . .	437
<b>15 Radiação por Cargas em Movimento e de Cargas Aceleradas</b>	<b>439</b>
15.1 Os Potenciais de Liénard-Wiechert . . . . .	439
15.2 Campos de uma Carga em Movimento . . . . .	441
15.3 Carga Acelerada – A Fórmula de Larmor . . . . .	443
15.4 Bremsstrahlung . . . . .	446
15.5 Radiação de Cíclotron e de Síncrotron . . . . .	448
Radiação de Cíclotron . . . . .	450
Radiação de Síncrotron . . . . .	450
15.6 Radiação no Caso Geral . . . . .	458
15.7 Fótons Virtuais . . . . .	458
Problemas . . . . .	461
Leitura Recomendada . . . . .	463



<b>16 Perda de Energia por Radiação</b>	<b>464</b>
16.1 Perda de Energia por Ionização . . . . .	464
16.2 Carga Ligada Harmonicamente - Perda de Energia . . . . .	466
16.3 Perda de Energia - Clássica e Quântica . . . . .	469
16.4 Efeito de Densidade . . . . .	470
16.5 Efeito Čerenkov . . . . .	476
Descrição Qualitativa . . . . .	476
Descrição Teórica . . . . .	477
Distribuição Espectral . . . . .	478
16.6 Radiação de Transição . . . . .	479
Descrição Qualitativa . . . . .	479
Descrição Teórica . . . . .	481
Descrição Prática . . . . .	484
16.7 Método dos <i>Quanta</i> Virtuais . . . . .	485
Problemas . . . . .	491
Leitura Recomendada . . . . .	493
<b>17 Fundamentos da Relatividade Geral e Tensores</b>	<b>494</b>
17.1 Relatividade Especial ou Restrita . . . . .	495
17.2 Princípio de Equivalência . . . . .	496
Princípio de Equivalência Fraco . . . . .	496
Princípio de Equivalência Forte . . . . .	498
17.3 Da Relatividade Especial para a Relatividade Geral . . . . .	498
17.4 Conceitos Básicos de Geodésica . . . . .	500
Desvio Geodésico na Gravidade Newtoniana . . . . .	501
Curvatura Intrínseca e o Campo Gravitacional . . . . .	502
17.5 Variedades – <i>Manifolds</i> . . . . .	503
Funções Escalares em uma <i>Variedade</i> . . . . .	504
17.6 Vetores em Espaços Curvos . . . . .	504
Vetores Tangentes . . . . .	505
Lei de Transformação para Vetores, Covetores e 1-Forma . . . . .	507
Lei de Transformação para Tensores . . . . .	509
Contração de Tensores . . . . .	510
17.7 Derivadas Covariante e Transporte Paralelo . . . . .	511
17.8 Equação da Geodésica . . . . .	513
Geodésica das Partículas com Massa . . . . .	514
Geodésica dos Fótons . . . . .	514
Problemas . . . . .	515
Leitura Recomendada . . . . .	515
<b>18 Curvatura do Espaço-Tempo e Equações de Einstein</b>	<b>516</b>
18.1 Curvatura do Espaço-Tempo na Relatividade Geral . . . . .	516
Tensor de Riemann-Christoffel . . . . .	516
Aceleração do Desvio Geodésico . . . . .	517
18.2 Tensor Energia- <i>Momentum</i> . . . . .	521
Tensor Energia- <i>Momentum</i> com Pressão Nula . . . . .	522
Tensor Energia- <i>Momentum</i> , Fluido Perfeito com Pressão . . . . .	524
18.3 O Tensor e as Equações de Einstein . . . . .	526

Tensor de Ricci . . . . .	526
Tensor de Einstein . . . . .	528
Equações de Einstein . . . . .	528
18.4 Motivação Física das Equações de Einstein . . . . .	529
18.5 Limite dos Campos Fracos das Equações de Einstein . . . . .	532
Dedução das Equações de Einstein . . . . .	533
O Limite de Campo Fraco . . . . .	535
Constante Cosmológica . . . . .	536
Problemas . . . . .	538
Leitura Recomendada . . . . .	539
<b>19 Abordagem Variacional e a Solução de Schwarzschild</b>	<b>540</b>
19.1 Formulação Lagrangiana e Equações de Campo . . . . .	540
19.2 A Solução de Schwarzschild . . . . .	544
A Métrica Estática e Isotrópica . . . . .	544
Solução das Equações de Campo do Espaço Vazio . . . . .	546
19.3 Geodésica para a Métrica de Schwarzschild . . . . .	548
19.4 Testes Clássicos da Relatividade Geral . . . . .	551
Precessão do Periélio de Mercúrio . . . . .	551
Deflexão dos Raios Luminosos . . . . .	554
Desvio para o Vermelho de Origem Gravitacional . . . . .	557
Atraso no Tempo de Propagação da Luz . . . . .	559
Problemas . . . . .	562
Leitura Recomendada . . . . .	563
<b>20 Cosmologia: Princípios Físicos e Modelo Padrão</b>	<b>564</b>
20.1 Princípios Físicos da Cosmologia Relativista . . . . .	565
Cosmologia Newtoniana . . . . .	565
Princípio Cosmológico . . . . .	566
20.2 Espaços de Curvatura Constante . . . . .	568
20.3 Desvio para o Vermelho Cosmológico . . . . .	572
Parâmetros de Hubble e da Desaceleração . . . . .	573
Distância . . . . .	575
Horizontes . . . . .	578
20.4 Dinâmica e Modelos . . . . .	580
Modelo Cosmológico de Einstein . . . . .	583
Modelo Cosmológico de Lemaître . . . . .	585
Modelo Cosmológico de Friedmann . . . . .	586
Análise Geral . . . . .	590
Problemas . . . . .	593
Leitura Recomendada . . . . .	594
<b>21 Cosmologia Inflacionária</b>	<b>595</b>
21.1 <i>Big-Bang</i> - Modelo Padrão e Seus Problemas . . . . .	598
Modelo Cosmológico do <i>Big-Bang</i> . . . . .	598
Problemas do Modelo Padrão do <i>Big-Bang</i> . . . . .	599
21.2 Ideia de Cosmologia Inflacionária . . . . .	601
21.3 Dinâmica da Inflação . . . . .	603

21.4	Modelos de Inflação . . . . .	606
	Inflação Caótica . . . . .	606
	Inflação Natural . . . . .	608
	Inflação Híbrida . . . . .	609
21.5	Teoria de Perturbações Cosmológicas . . . . .	610
	Perturbação Escalar . . . . .	612
	Perturbação Vetorial . . . . .	618
	Perturbação Tensorial . . . . .	619
	Problemas . . . . .	619
	Leitura Recomendada . . . . .	620
<b>22</b>	<b>Buracos Negros</b>	<b>621</b>
22.1	Buracos Negros de Schwarzschild . . . . .	622
	Coordenadas de Kruskal-Szekeres . . . . .	625
	Diagrama de Carter-Penrose na métrica de Schwarzschild . . . . .	630
22.2	Buracos Negros Carregados e Rotativos . . . . .	631
	Solução de Reissner-Nordström . . . . .	632
	Buracos Negros Rotativos . . . . .	634
22.3	Teoria Quântica de Campos em Espaços-Tempos Plano e Curvo . . . . .	638
	Teoria Quântica de Campos Escalares Livres em Espaço-Tempo Curvo . . . . .	638
	Transformação de Bogoliubov . . . . .	639
22.4	Radiação de Hawking . . . . .	639
	Criação de Partículas no Espaço-Tempo Sanduíche . . . . .	639
	Criação de Partículas no Espaço-Tempo de Schwarzschild . . . . .	641
22.5	Fenomenologia dos Buracos Negros . . . . .	645
	Vida dos Buracos Negros . . . . .	645
	Minis Buracos Negros . . . . .	645
	Problemas . . . . .	646
	Leitura Recomendada . . . . .	647
<b>23</b>	<b>Ondas Gravitacionais</b>	<b>648</b>
23.1	Métrica do Campo Fraco . . . . .	650
23.2	Equações do Campo Gravitacional Linearizadas . . . . .	652
23.3	Transformação de Calibre . . . . .	653
23.4	Solução da Equação de Onda no Vácuo . . . . .	653
	Polarização das Ondas Gravitacionais . . . . .	656
23.5	Solução Geral da Equação de Onda . . . . .	659
	Expansão Multipolar da Solução Geral . . . . .	660
	Tensor Energia- <i>Momentum</i> em Ondas Gravitacionais . . . . .	664
	Fluxo de Energia em Ondas Gravitacionais . . . . .	668
	Energia Irrradiada . . . . .	669
	<i>Spin-up</i> e o Pulsar Binário PSR 1913 + 16 . . . . .	673
23.6	Deteção de Ondas Gravitacionais . . . . .	675
	Problemas . . . . .	680
	Leitura Recomendada . . . . .	681
	<b>Bibliografia</b>	<b>682</b>

