

Astrofísica Moderna

Fenômenos e Conceitos

Volume I



Conselho Editorial da LF Editorial

Amílcar Pinto Martins - Universidade Aberta de Portugal

Arthur Belford Powell - Rutgers University, Newark, USA

Carlos Aldemir Farias da Silva - Universidade Federal do Pará

Emmánuel Lizcano Fernandes - UNED, Madri

Iran Abreu Mendes - Universidade Federal do Pará

José D'Assunção Barros - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Luis Radford - Universidade Laurentienne, Canadá

Manoel de Campos Almeida - Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Maria Aparecida Viggiani Bicudo - Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro

Maria da Conceição Xavier de Almeida - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Maria do Socorro de Sousa - Universidade Federal do Ceará

Maria Luisa Oliveras - Universidade de Granada, Espanha

Maria Marly de Oliveira - Universidade Federal Rural de Pernambuco

Raquel Gonçalves-Maia - Universidade de Lisboa

Teresa Vergani - Universidade Aberta de Portugal

Alexandre Zabot
Marcos Amarante

Astrofísica Moderna

Fenômenos e Conceitos

Volume I



2025

Copyright © 2025 os autores
1ª Edição

Direção editorial: Victor Pereira Marinho e 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)

Zabot, Alexandre
Astrofísica moderna: fenômenos e conceitos: volume I / Alexandre Zabot,
Marcos Amarante Garcia Júnior. – 1. ed. – São Paulo: LF Editorial, 2025.

Bibliografia.
ISBN 978-65-5563-646-8

1. Astrofísica 2. Astronomia - Estudo e ensino I. Júnior, Marcos Amarante Garcia. II. Título.

25-302534.0

CDD-523.01

Índices para catálogo sistemático:
1. Astrofísica: Astronomia 523.01

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

Crédito da imagem

Fotografia do eclipse solar total sobre em 2 de julho de 2019, feita por Mahdi Zamani. Na imagem, aparecem várias cúpulas de telescópios do Observatório Astronômico de La Silla, no Chile, o maior do Hemisfério Sul. Foi inaugurado em 1969 e é operado pelo ESO.



Autores

Alexandre Zabot - Sou físico e obtive meu Doutorado em Astrofísica em 2011, estudando discos de poeira em torno de anãs brancas. Leciono desde 2010 e hoje sou professor de Astrofísica, Física e Matemática na UFSC Joinville. Meu encanto pelo Universo começou bem cedo, mas o envolvimento profissional iniciou na graduação ao fazer parte do Grupo de Astrofísica. Além dos temas de Pesquisa, desenvolvíamos atividades de Extensão Universitária: observações do céu, palestras e cursos. Estas atividades imprimiram desde cedo em mim um amor pelo ensino e divulgação de Astrofísica. O Projeto “Astrofísica para Todos” (<http://astrofisica.ufsc.br>) nasceu de modo natural dessas experiências e hoje já conta com diversos cursos online e quase 50 mil alunos regularmente inscritos em suas atividades.

Marcos Amarante Garcia Júnior - Sou físico com mestrado em Astrofísica pela Universidade Federal de Itajubá, onde meus objetos de estudo se concentraram nas flutuações de temperatura da Radiação Cósmica de Fundo. Atualmente, atuo no ensino superior, acumulando 20 anos de experiência na docência nas áreas de Física e Matemática. Minha paixão pela Ciência se manifesta na combinação da astrofotografia com a fotografia, e tenho um grande encantamento pela demonstração das equações que fundamentam a Física e a Matemática, buscando sempre transmitir essa fascinação aos meus alunos.

A fotografia da página seguinte retrata Alexandre Zabot (à direita) e Marcos Amarante (à esquerda) em um momento da noite de Premiação do Jabuti Acadêmico de 2024.



Dedicatórias

“A Deus, cuja glória é narrada pelos céus que tanto tempo passei contemplando e estudando.”Alexandre Zabot.

“Para minha esposa, Amanda Amarante, minha parceira de vida.”Marcos Amarante.

Agradecimentos

“Ao Marcos por me convidar a transformar o curso gravado em livro. Aos meus alunos dos cursos do Projeto Astrofísica para Todos, pelo incentivo, carinho e amizade. De modo muito especial à minha esposa Cristiane e nossos amados filhos Pedro, André, Joana, Catarina, Teresa, Rita, Paulo e Felipe que são verdadeiras estrelas guias na minha vida. Ao meu pai Onévio, exemplo que procuro seguir em tudo.” Alexandre Zabot.

“Agradeço ao Prof. Alexandre por ter contribuído significativamente para os meus conhecimentos. Ao Prof. Dr. Sérgio Augusto de Sousa Campos pela revisão na parte de Biologia deste livro.” Marcos Amarante.

Por fim, um agradecimento especial à NASA, ESO e aos contribuidores da Wikipédia por disponibilizar um tremendo acervo de imagens sob licenças que permitem o uso nesta obra. Apreciamos muito seu espírito de compartilhar conhecimento e trabalho, reflexo de um verdadeiro espírito científico e humanista. Agradecimento também ao Prof. Dr. Sérgio Augusto de Sousa Campos por sua revisão na parte de Biologia deste livro.

Prefácio

Contemplar o céu estrelado é encantador, e por isso todos se sentem atraídos pela Astronomia. Mas entender as leis físicas por trás dos astros não é fácil. Levar a Astrofísica para todos sem se deixar cair na superficialidade e nem na tecnicidade foi o objetivo que nos levou a escrever este livro.

Somos apaixonados pelo Universo e queremos compartilhar isso com pessoas que desejam aprender com profundidade sobre os fenômenos e os conceitos da Astrofísica. Escolhemos não usar matemática e nos apoiamos nas observações. Se você sempre quis entender como funciona o Universo, mas se sentia intimidado pela complexidade matemática, este livro foi pensado especialmente para você.

Esta obra também nasce de uma grande amizade e parceria. Nós nos conhecemos por meio dos cursos online. Em 2021, o Marcos fez o curso avançado de Cosmologia oferecido pelo Alexandre como parte do Projeto Astrofísica para Todos. Ao final, encaramos juntos o desafio de colocar o curso em formato de livro e nasceu o “Introdução à Cosmologia Moderna: um curso de graduação”, que foi publicado pela Livraria da Física em 2023. O livro obteve uma excelente recepção, chegando a ser finalista do Prêmio Jabuti de 2024 na categoria “Astronomia e Física”.

O sucesso do livro de Cosmologia nos motivou a estreitar nossa colaboração e escrever o livro de Astrofísica que você tem em mãos. O trabalho foi árduo e longo: levamos mais de dois anos. Para entender como chegamos a esta abordagem, é importante conhecer a história por trás da obra.

Este livro também é fruto de um curso online de Astrofísica. Antes de tudo, na verdade, são dois cursos online de Astrofísica e é por isso que este livro já nasce como “volume 1”. O Curso de Astrofísica I contém três módulos: Introdução, Sistemas Planetários e Astrobiologia. O Curso de Astrofísica II aborda Estrelas, Galáxias e Cosmologia.

É importante mencionar os cursos porque seus propósitos foram reforçados no livro: (i) falar de todas as áreas da Astrofísica com igual medida, interesse e profundidade; (ii)

explicar os conceitos a partir dos resultados observacionais, sem usar matemática.

Percebemos que muitas obras da área, por serem escritas por especialistas, naturalmente enfatizam as áreas de expertise de seus autores. Nossa objetivo foi diferente: dar igual importância a todos os campos da Astrofísica.

Não usar Matemática e explorar os conceitos a partir das observações era mais que um propósito, consistia em um verdadeiro desafio pedagógico. Foi preciso criar métodos de explicação e adaptar a linguagem.

Além destes princípios norteadores, queríamos trazer muitas atualizações das últimas descobertas com sondas espaciais e telescópios terrestres e espaciais. A Astrofísica tem evoluído muito rápido nas últimas décadas, muito por conta dos avanços tecnológicos. Nesse sentido, escrever o livro foi um prazer imenso para nós, pois em cada página tínhamos algo novo para nos atualizar. Por isso, o livro não é uma mera transcrição das aulas dos cursos de Astrofísica. Nós atualizamos muito conteúdo e também incluímos assuntos que não tinham sido abordados plenamente nas aulas.

Como fruto, apresentamos a você um livro que não se situa apenas como divulgação científica mas também não é um livro técnico. Esta obra, esperamos, levará os leitores a um passeio pelo universo da Astrofísica. Ao final desta jornada, você não apenas terá conhecimento sobre astrofísica, mas também uma nova perspectiva sobre nosso lugar no cosmos e sobre como a ciência desvenda os mistérios do universo.

Felizmente, a Astrofísica é uma ciência muito visual, o que sem dúvida facilitou muito nosso trabalho. Tivemos acesso a muitas fotografias e gráficos e lançamos mão abundantemente deles, resultando num livro ricamente ilustrado. As imagens foram cuidadosamente escolhidas para trabalharem junto do texto na explicação dos conceitos.

Sumário

1	Introdução à Astrofísica	1
	EXERCÍCIOS	4
2	Gravitação	5
2.1	Geocentrismo	6
2.2	Heliocentrismo	9
2.2.1	A Elipse	10
2.2.2	Leis de Kepler	11
2.3	Mecânica Newtoniana	15
2.3.1	Leis da Mecânica Newtoniana	16
2.4	Lei da Gravitação Universal	20
2.4.1	Evolução das Ideias	22
2.4.2	Teorema das Cascas	23
2.5	Órbitas	25
2.5.1	Movimento Orbital	25
2.5.2	Lua em Queda	27
2.5.3	Mudança de Órbita	29
2.5.4	Baricentro	31
2.6	Sistemas Múltiplos	34
2.7	Pontos de Lagrange	37
2.7.1	Variáveis Cataclísmicas	39
2.8	Velocidade de Escape	40
2.8.1	Buraco Negro	43
2.9	Causas das Marés	44
2.9.1	Atrito	48

2.9.2	Consequências do Atrito no Sistema Terra-Lua	49
2.9.3	O Limite de Roche	51
EXERCÍCIOS		53
3	Luz	55
3.1	A Natureza da Luz	56
3.1.1	A Teoria Ondulatória da Luz	57
3.1.2	Teoria Corpuscular da Luz	59
3.1.3	Teoria Ondulatória <i>versus</i> Teoria Corpuscular da Luz	59
3.1.4	Dualidade Onda-Partícula	63
3.2	A Natureza das Ondas Eletromagnéticas	65
3.2.1	Comprimento de Onda e Frequência	68
3.2.2	Espectro Eletromagnético	69
3.2.3	Espectroscopia	74
3.3	Efeito Doppler	79
3.3.1	<i>Redshift</i> e <i>Blueshift</i>	83
3.3.2	Método Doppler	84
3.4	Corpo Negro	85
3.4.1	Cores e lei da distribuição de Planck	89
3.5	O Modelo Atômico de Bohr e a Luz	91
3.5.1	Efeito Fotoelétrico	91
3.5.2	O Modelo Atômico de Bohr	94
3.6	Opacidade da Atmosfera Terrestre	99
EXERCÍCIOS		101
4	Óptica	105
4.1	Reflexão e Refração	106
4.1.1	Dispersão	108
4.2	Espalhamento	110
4.2.1	As Cores do Céu	112
4.3	Polarização	113
4.4	Espelhos	117
4.5	Lentes	121
4.6	Interferência e difração	124

4.6.1	Princípio de Huygens	126
4.6.2	<i>Spikes</i>	128
4.6.3	Fenda Simples	130
	EXERCÍCIOS	133
5	Instrumentos Astrofísicos	137
5.1	Telescópios Ópticos	137
5.1.1	Conceitos Básicos	138
5.1.2	Resolução Angular	140
5.1.3	Telescópios de Grande Abertura	149
5.1.4	Aumento	151
5.2	Tipos de Telescópios	154
5.2.1	Telescópios Refratores	155
5.2.2	Telescópios Refletores	157
5.2.3	Telescópios Catadióptricos	160
5.2.4	Montagem	161
5.2.5	Telescópios Não-Ópticos	166
5.2.6	Rádio Telescópio	168
5.2.7	Telescópio de Raio-X	169
5.2.8	Telescópio de Raios Gama	170
5.3	Observatórios Astronômicos	171
5.4	Poluição Luminosa	179
5.5	Telescópios Espaciais	180
5.5.1	Telescópio Espacial Hubble	181
5.5.2	Telescópio Espacial James Webb	184
5.6	Outras Fontes de Informação Astrofísica	187
5.7	Detectores	189
	EXERCÍCIOS	195
6	Sistema Solar	199
6.1	Estrutura do Sistema Solar	199
6.2	Classificação dos Planetas	205
6.2.1	Mercúrio	205
6.2.2	Vênus	208

6.2.3	Terra	212
6.2.4	Marte	214
6.2.5	Júpiter	218
6.2.6	Saturno	220
6.2.7	Urano	223
6.2.8	Netuno	226
6.3	Comparações - Composições Internas	228
6.4	Comparações - Inclinações	234
6.5	Comparações - Luas	235
6.6	Exploração Espacial	235
6.7	Planetas Anões	237
6.7.1	Plutão	245
6.7.2	Ceres	246
6.8	Satélites do Sistema Solar	248
6.8.1	A Lua	249
6.8.2	A Lua Europa	261
6.8.3	A Lua Titã e a Missão Cassini-Huygens	262
6.8.4	A Lua Mimas	265
6.9	Corpos Menores do Sistema Solar	266
6.9.1	Asteroides	266
6.9.2	Cometas	274
6.9.3	Meteoro, Meteoroides e Meteoritos	276
6.10	Anéis de Poeira	280
	EXERCÍCIOS	282
7	O Sol	285
7.1	Características solares	285
7.2	A Vida do Sol	288
7.3	Equilíbrio Hidrostático	289
7.4	Transferência de Calor	291
7.5	Estrutura do Sol	293
7.5.1	Núcleo	295
7.5.2	Zona Radiativa	302

7.5.3	Zona Convectiva	303
7.5.4	Fotosfera	304
7.5.5	Cromosfera	307
7.5.6	Coroa	310
7.6	O Campo Magnético Solar	312
7.6.1	Plasma	313
7.6.2	<i>Loops</i> Magnéticos do Sol	317
7.6.3	Explosões Solares	319
7.6.4	Manchas Solares	321
7.6.5	Vento Solar	325
	EXERCÍCIOS	327
8	Exoplanetas	329
8.1	Os Descobridores	331
8.2	Velocidade Radial	332
8.3	Trânsito Planetário	338
8.4	Imageamento Direto	341
8.5	Microlente gravitacional	344
8.6	Astrometria	346
8.7	Propriedades dos Exoplanetas	347
8.8	Zona de Habitabilidade	347
8.9	Exoplanetas Exóticos	356
8.10	Atmosferas	358
	EXERCÍCIOS	361
9	Formação de Sistemas Planetários	363
9.1	Colapso da Nebulosa - Dados Observacionais	364
9.1.1	Modelo de Formação	366
9.1.2	Formação dos Planetas	368
9.2	Exoplanetas em Formação	373
9.3	Formação das Luas	378
9.3.1	Formação da Nossa Lua	380
9.4	Formação dos Anéis	383
9.5	Júpiteres Quentes	385

9.6 Quando a Estrela Morre	386
EXERCÍCIOS	388
10 A Vida	391
10.1 O que é Vida?	392
10.2 Elementos Básicos da Vida	394
10.2.1 Síntese Proteica	396
10.2.2 Fotossíntese e Respiração	399
10.3 Abiogênese	402
10.3.1 Síntese de Aminoácidos	404
10.3.2 Chaminés	406
10.4 Protocélulas	409
10.5 Evolução	410
10.6 Formas de Vida na Terra	413
10.7 Condições Extremas	416
EXERCÍCIOS	424
11 A Vida na Terra	425
11.1 Surgimento da Vida na Terra	425
11.1.1 Terra Primitiva	429
11.1.2 Evidências do Surgimento da Vida	431
11.1.3 Linha do Tempo	432
11.1.4 Evolução da Vida na Terra	435
11.2 Explosão do Cambriano	438
11.3 Atmosfera e Vida	441
11.3.1 Evolução da Atmosfera	441
11.3.2 Ciclo do Carbono	444
11.3.3 Idades do Gelo	447
11.3.4 Ciclo de Milankovitch	450
11.4 Extinções em Massa	451
11.4.1 A Hipótese do Asteroide	456
11.4.2 Impactos	460
11.4.3 Falta de Oxigênio nos Oceanos	464
11.4.4 A Hipótese do Vulcanismo	465