

# 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 Zabet  
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

LF Editorial  
[www.livrariadafisica.com.br](http://www.livrariadafisica.com.br)  
[www.lfeditorial.com.br](http://www.lfeditorial.com.br)  
(11) 2648-6666 | Loja do Instituto de Física da USP  
(11) 3936-3413 | Editora

## 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 Zabet - 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 Zabet (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 apoiarmos 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. Nosso 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

<b>1</b>	<b>Introdução à Astrofísica</b>	<b>1</b>
	EXERCÍCIOS . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Gravitação</b>	<b>5</b>
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
<b>3</b>	<b>Luz</b> . . . . .	<b>55</b>
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
<b>4</b>	<b>Óptica</b> . . . . .	<b>105</b>
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
<b>5</b>	<b>Instrumentos Astrofísicos</b>	<b>137</b>
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
<b>6</b>	<b>Sistema Solar</b>	<b>199</b>
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	Meteoros, Meteoroides e Meteoritos . . . . .	276
6.10	Anéis de Poeira . . . . .	280
	EXERCÍCIOS . . . . .	282
<b>7</b>	<b>O Sol</b>	<b>285</b>
7.1	Caraterísticas 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
<b>8</b>	<b>Exoplanetas</b>	<b>329</b>
8.1	Os Descobridores . . . . .	331
8.2	Velocidade Radial . . . . .	332
8.3	Trânsito Planetário . . . . .	338
8.4	Imageamento Direto . . . . .	341
8.5	Micro lente 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
<b>9</b>	<b>Formação de Sistemas Planetários</b>	<b>363</b>
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
<b>10 A Vida</b>	<b>391</b>
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
<b>11 A Vida na Terra</b>	<b>425</b>
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