

Introdução à Cosmologia Moderna
Um Curso de Graduação

*Alexandre Zabet
Marcos Amarante Garcia Júnior*

Introdução à Cosmologia Moderna
Um Curso de Graduação



Editora Livraria da Física
São Paulo — 2023

Copyright © 2023 Editora Livraria da Física

1a. Edição

Editor: JOSÉ ROBERTO MARINHO

Projeto gráfico e diagramação: THIAGO AUGUSTO SILVA DOURADO

Capa: FABRÍCIO RIBEIRO

Imagem da capa: Very Large Array, por JEFFREY HELLERMAN, NRAO/AUI/NSF. Agradecemos por gentilmente ceder a imagem.

Texto em conformidade com as novas regras ortográficas do Acordo da Língua Portuguesa.

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

Zabot, Alexandre

Introdução à cosmologia moderna : um curso de graduação / Alexandre Zabot, Marcos Amarante Garcia Júnior. – 1. ed. – São Paulo : Livraria da Física, 2023.

Bibliografia.

ISBN 978-65-5563-323-8

1. Astrofísica 2. Astronomia 3. Cosmologia 4. Ensino superior 5. Física 6. Universo - Origem I. Garcia Júnior, Marcos Amarante. II. Título.

23-149899

CDD-523.1

Índices para catálogo sistemático:

1. Cosmologia : Universo : Astronomia 523.1

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

ISBN 978-65-5563-323-8

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.

Impresso no Brasil

Printed in Brazil



Editora Livraria da Física

Tel./Fax: +55 11 3459-4327 / 3936-3413

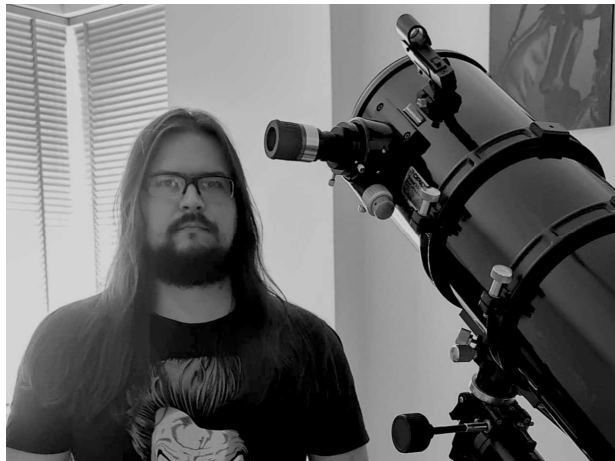
www.livrariadafisica.com.br

Os AUTORES

ALEXANDRE ZABOT — Sou Físico e tenho doutorado em Astrofísica. De 2010 a 2012 fui Professor na UFFS. Desde 2012 sou professor de Astrofísica, Física e Matemática na UFSC Joinville, atuando especialmente no Curso de Engenharia Aeroespacial. Desde 2001 desenvolvo atividades de ensino e divulgação de Astrofísica. Ministro cursos, palestras, observações do céu, oficinas de construção de telescópios etc. Sou criador e coordenador do Programa de Extensão “Astrofísica para Todos”, que oferece cursos presenciais e online na área para diversos públicos. Já tive mais de 30 mil alunos regularmente inscritos nas atividades, oriundos de mais de 1300 cidades brasileiras e diversos países.



MARCOS AMARANTE GARCIA JÚNIOR — Sou Mestre em Física e Matemática Aplicada com ênfase em Astrofísica. Atuo como Professor da rede particular de ensino há 17 anos. Além de professor, sou um estudioso das Ciências Exatas, tendo como hábito diário a demonstração de equações das áreas de Física e Matemática. Nos últimos anos, venho me dedicado à fotografia e à astrofotografia.



DEDICATÓRIAS

“Dedico este livro aos meus pais, Onévio e Ângela, que desde sempre incentivaram minha paixão pela Física. À minha esposa, Cristiane, que está sempre ao meu lado dando suporte e estímulo. E ao meu grande amigo João Carlos, por me mostrar o valor divino do estudo e do trabalho!” ALEXANDRE ZABOT.

“À memória de meus pais, Marcos e Dorotéia, que cada um às suas maneiras me inspiraram. Meu Pai me ensinou a ter disciplina em minhas tarefas e minha Mãe compartilhou comigo os encantos pela Ciência. À minha esposa, Amanda, que além de compartilharmos da mesma profissão, muito me apoia nos caminhos da Física.” MARCOS AMARANTE.

Agradecimentos

Além dos autores fizeram parte da construção do livro os revisores: Prof. Dr. Fabiano Wolf, Prof. MsC. Breno Sousa, Prof^a. Amanda Garcia e aos amigos Jorge Nagasaki, Célio Oppezzo e todos aqueles que contribuíram de algum modo. Saibam, vocês fazem parte desta obra.

PREFÁCIO

A Cosmologia desperta interesse em todos os públicos e ao longo dos anos surgiram animadas sobre temas de Cosmologia com pessoas das mais diversas áreas de formação. Muito disso se deve ao fato de que a cada dia aumenta a discussão de temas sobre a origem e a evolução do Universo nos meios de divulgação científica.

Acontece que, nas últimas décadas tem se firmando, entre físicos e astrofísicos, a percepção de que as grandes perguntas da Física estão todas relacionadas com as questões de fronteira da Cosmologia.

Sem dúvida, isso tem ocorrido, porque vivemos um momento especial na Astrofísica, com a ampliação de programas observacionais dedicados a varrer todo o céu. Um processo estimulado pelo impressionante avanço da computação. Aliás, todos estes dados só podem ser analisados de forma racional, justamente porque há muito mais opções de realizar grandes simulações numéricas.

A área da Cosmologia desperta interesse em diversos alunos, inclusive àqueles que não têm formação em ciências exatas. Muitos estudantes de graduação e pessoas já graduadas, se empenham em estudar de modo mais profundo a Teoria do Big Bang, Matéria e Energia Escuras, Radiação Cósmica de Fundo etc.

Entretanto, este estudo pode ser frustrado pela falta de material direcionado a um estudante em nível de graduação. A maioria dos materiais de Cosmologia estão em nível de divulgação científica, ou então de pós-graduação. Neste caso, existe uma grande ausência de textos voltados para

leitores da graduação. Notamos que, por mais que este material seja indicado para este nível, os alunos relatam que seu conteúdo fica cada vez mais complexo para a graduação. Na verdade, não é de se admirar que estes materiais sejam assim, já que os temas centrais da Cosmologia envolvem: Relatividade Geral, Mecânica Quântica, conhecimentos aprofundados em Eletromagnetismo e Termodinâmica; isso sem deixar de lado toda a parte de Astrofísica Extragaláctica. Pelo menos, estes temas são corpos respeitáveis de conhecimentos que, naturalmente, precisam de anos para serem construídos.

Apesar disso, lançamos para nós o desafio de preparar um livro voltado para pessoas com conhecimentos básicos em Cálculo I e Física I na graduação. Além disso, supomos que o leitor tenha algum conhecimento elementar sobre estrelas, galáxias e aglomerados de galáxias, e também, noções de física do Ensino Médio, como por exemplo, a Termodinâmica dos gases ideais, ondas etc. A adaptação didática de um conteúdo tipicamente de pós-graduação para um nível básico de graduação exigiu, naturalmente, que muitas questões fossem simplificadas, especialmente o tratamento matemático.

Na verdade, a transposição didática foi realizada e implementada por um de nós (Alexandre Zobot) em um Curso Online de Cosmologia¹. O retorno obtido dos alunos foi muito positivo e nos estimulou a transformar o curso em um livro, a partir das notas de aula elaboradas por outro de nós (Marcos Amarante). Este livro que oferecemos agora é, portanto, fruto de um trabalho intenso, que visa oferecer ao leitor um primeiro contato com a Cosmologia em nível de graduação. Esperamos que possa ser muito útil a tantas pessoas que se interessam por uma das mais fantásticas áreas da Física.

¹<https://astrofisica.ufsc.br/>

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	18
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

1

INTRODUÇÃO À COSMOLOGIA FÍSICA

“A Cosmologia visa explicar a origem e evolução de todo o conteúdo do Universo, os processos físicos subjacentes e, assim, obter uma compreensão mais profunda das leis da Física que se supõe serem válidas em todo o Universo. Infelizmente, temos apenas um Universo para estudar, aquele em que vivemos, e não podemos fazer experimentos com ele, apenas observações. Isso impõe limites sérios ao que podemos aprender sobre a origem. Se houver outros Universos, nunca saberemos.” (Roos , 2003)

A Cosmologia começou como um exercício de Filosofia, no sentido de usar apenas a razão e com uma quantidade de dados limitados colhidos através dos sentidos (visão, olfato, tato) mas, sem a verificação experimental. A Cosmologia nasceu do exercício de entender o Universo.

Segundo Neto (2020), a Astrofísica Extragaláctica surgiu no século XX, pois somente em 1920 as galáxias foram reconhecidas como objetos além da Via Láctea.

Na busca de resolver questionamentos tais como: O que é o Universo? Como o Universo começou? Qual a constituição do Universo? etc, a Cosmologia investigou o Universo através da Astrofísica.

A Física sofreu uma revolução muito grande no século XX, tal período também foi importante para a Astrofísica, pois nessa época conseguiu-se usar

o conhecimento da Astronomia aliado a tecnologia para investigar o Universo. Neste contexto, surgiu e evoluiu a Cosmologia como ciência física.

Para Novello (2010), “A Cosmologia tem como tarefa a refundação da Física”, assim sendo, a Cosmologia testa os limites da Física.

Alguns fenômenos cosmológicos são estudados na escala de tempo de dezenas de bilhões de anos, outros em escalas de tempo menores. Da mesma maneira, a Cosmologia analisa desde escalas de aglomerados de galáxias a todo o Universo observável.

Quando se estuda as escalas para tais limites, as leis físicas são testadas. A metodologia aplicada é bem ilustrada pela forma como a Teoria da Gravitação Universal de Newton foi criada. O físico inglês pôde deduzir as leis empíricas de Kepler. Este, por sua vez, as tinha encontrado verificando padrões nos dados observacionais de Tycho Brahe. São exemplos de aplicação do Método Científico¹:

- Dados observacionais coletados por Tycho Brahe.
- Extração de leis empíricas por Kepler.
- Teoria da Gravitação de Newton faz previsões e é testada.

Atualmente, sabe-se que as galáxias estão se afastando de nós, a partir desta observação chegamos a Lei de Hubble-Lemaître, que é uma lei empírica. Mas esta lei também pode ser obtida modelando o Universo com a Relatividade Geral e a hipótese cosmológica. É um novo exemplo, mais recente, de como a Cosmologia pode utilizar o Método Científico para se tornar uma disciplina Física e não apenas Filosófica.

Hoje, a Cosmologia utiliza das ferramentas da Astrofísica: usa dados de estrelas, aglomerados de galáxias, estruturas em grande escala, observáveis cosmológicos tais como a Radiação Cósmica de Fundo etc. Uma série de simulações numéricas também são usadas para integrar e conectar todas essas realidades, essa é a Cosmologia Física de hoje.

A Cosmologia está alicerçada em ideias testáveis, tais como:

- Observação de galáxias: o Universo está se expandindo.

¹ Observação, hipótese, modelo e verificação.

- Observação da Radiação Cósmica de Fundo: o Universo, no passado, teve uma fase muito quente.
- Princípio Cosmológico: em largas escalas o Universo é isotrópico e homogêneo.
- Leis Físicas gerais: A gravidade é descrita pela teoria da Relatividade Geral.

Baseada nos quatro princípios anteriores, a Cosmologia levanta grandes questões fundamentais, como, por exemplo, a existência da Matéria e Energia Escuras, a observação da assimetria entre matéria e antimatéria, a natureza do espaço e do tempo etc.

Hoje, não se pode justificar o valor específico das constantes físicas que governam o Universo, também não se sabe porque existem apenas quatro forças fundamentais: força nuclear forte, força eletromagnética, força nuclear fraca e força gravitacional. Enfim, não se sabe explicar porque o Universo é do jeito que é.

Sem a Cosmologia, tais questionamentos se reduziriam ao âmbito de escalas pequenas, sem poder investigar efeitos nas enormes dimensões espaciais e temporais do Universo. Segundo Angelis e Pimenta (2015), a Cosmologia provavelmente cresce mais do que qualquer outro campo da Física. Há um século atrás, acreditava-se que a Via Láctea era a única galáxia do Universo e hoje já temos uma visão totalmente diferente do cosmos.

Ryden (2003), afirma que, uma ciência que considera galáxias inteiras como pequenos objetos pode parecer, à primeira vista, muito distante das preocupações da humanidade. No entanto, a Cosmologia trata de questões fundamentais para a condição humana.

Ryden (2003) ainda afirma que a Cosmologia lida com questionamentos que intrigam a humanidade: “de onde viemos? O que nós somos? Para onde nós vamos?”. A Cosmologia procura solucionar tais questionamentos descrevendo o passado, explicando o presente e prevendo o futuro do Universo.

Tycho Brahe (1546-1601)

Tycho Brahe nasceu no Castelo de Knutstorp no sul da Suécia. Seu trabalho no desenvolvimento de instrumentos astronômicos e na medição das posições das estrelas abriram caminho para futuras descobertas. Suas observações, as mais precisas possíveis antes do advento do telescópio, incluíram um estudo abrangente do Sistema Solar e posições precisas de mais de 777 estrelas fixas (Eggen , 2022).

Johannes Kepler (1571-1630)

Kepler nasceu na cidade alemã de Weil der Stadt. Ele descobriu as três principais leis do movimento planetário. O próprio Kepler não chamou essas descobertas de “leis”, como se tornaria habitual depois que Isaac Newton as derivou de um conjunto novo e bastante diferente de princípios físicos gerais. Kepler considerava suas leis como harmonias celestiais que refletiam o desígnio de Deus para o Universo. As descobertas de Kepler transformaram o modelo astronômico copernicano, com o Sol no centro do Universo, em um Universo dinâmico com o Sol empurrando ativamente os planetas em órbitas não circulares (Westman , 2022b).