

ÍNDICE

<i>Prefácio</i>	11
<i>Siglas e acrónimos</i>	17
CAPÍTULO 1 — INTRODUÇÃO	19
1.1. O método científico	19
1.2. O alvorecer da astronomia	29
1.2.1. O Antigo Egito	31
1.2.2. A Mesopotâmia	36
1.3. Relógios e calendários	42
1.4. A ciência no mundo moderno	47
CAPÍTULO 2 — ASTRONOMIA CLÁSSICA	55
2.1. A visão grega do mundo	55
2.2. Cosmologia	58
2.3. O tamanho da Terra	70
2.4. Astronomia	72
2.5. Epíclis	82
2.6. Física aristotélica	88
2.7. Da Grécia ao mundo islâmico	93
CAPÍTULO 3 — DO RENASCIMENTO À CIÊNCIA MODERNA. . .	99
3.1. A visão do mundo na era medieval	99
3.2. Física medieval	106
3.3. Mikolaj Koppernigk	110
3.4. Tyge Brahe	121

3.5.	Johannes Kepler	127
3.6.	Galileu Galilei	135
3.6.1.	Física galileana	138
3.6.2.	Astronomia galileana	141
3.6.3.	Física <i>versus</i> filosofia	146
CAPÍTULO 4 — FÍSICA CLÁSSICA.		153
4.1.	Gravidade pré-newtoniana	153
4.2.	As Leis de Newton.	156
4.3.	Úrano e Neptuno	163
4.4.	Mercúrio e Vulcano	180
4.5.	A física da gravidade e dos satélites	186
4.6.	Asteróides e cometas.	199
CAPÍTULO 5 — A FÍSICA DA RELATIVIDADE		205
5.1.	O declínio da física clássica	205
5.2.	Relatividade restrita	216
5.3.	O Princípio de Equivalência e a Relatividade Geral	224
5.4.	Gravidade é geometria	229
5.5.	Consequências e testes	232
CAPÍTULO 6 — A FÍSICA DAS ESTRELAS E DAS GALÁXIAS		241
6.1.	A vida de uma estrela	242
6.2.	Nucleossíntese estelar	251
6.3.	Anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros.	256
6.4.	Galáxias e o Universo em expansão	266
CAPÍTULO 7 — A FÍSICA DO UNIVERSO.		275
7.1.	O modelo do <i>Big Bang</i>	275
7.2.	Principais testes observacionais	283
7.3.	O lado escuro do Universo.	290
7.4.	Campos escalares e dimensões adicionais	298
CAPÍTULO 8 — NOVAS FRONTEIRAS.		311
8.1.	Defeitos topológicos e paleontologia cósmica	311
8.2.	As leis da física são universais?	321
8.3.	O alvorecer da cosmologia em tempo real	334
8.4.	O mundo quântico	337
8.5.	A procura de vida no Universo	342

EXAME FINAL	355
I. Perguntas de escolha múltipla.....	355
II. Temas para ensaios.....	366
<i>Sugestões de leitura adicional</i>	369

PREFÁCIO

Nós educamo-nos da mesma forma que nos alimentamos. Procuramos uma refeição, pedimo-la ou preparamo-la, e assimilamo-la e digerimo-la nós mesmos.

Frank Rhodes (1926–2020)

Nos últimos dez anos, tive o prazer de leccionar diversos cursos de curta duração (entre 10 e 25 horas cada, dependendo do caso) para três tipos de público. Este livro surgiu do conteúdo destas aulas, com o incentivo de muitos dos formandos que as frequentaram.

O primeiro grupo é constituído por professores do ensino secundário, no âmbito de cursos de formação contínua, organizados regularmente pela Universidade do Porto e pelo parceiro do ESERO em Portugal, a Ciência Viva, e geralmente leccionados no CAUP. A frequência periódica de alguns destes cursos é obrigatória para os professores do ensino secundário progredirem na carreira, e, naturalmente, os cursos estão amplamente alinhados com os objectivos do currículo escolar nacional de física e química. (Infelizmente, Portugal não tem um currículo nacional de astronomia!) Estes são cursos formais, incluindo uma avaliação final (normalmente um exame escrito), e são validados por uma comissão pedagógica nacional antes de serem administrados. Cerca de 70% dos alunos que frequentam estes cursos são professores de física e química, enquanto os demais são professores de matemática e biologia/geologia.

O segundo grupo é formado por alunos da Universidade do Porto (cerca de dois terços estudam ciências ou engenharia, sendo os restantes

de todas as outras áreas) que frequentam cursos complementares oferecidos pela Unidade de Formação do CAUP. A maioria destes alunos são estudantes de licenciatura, com alguns ocasionais de mestrado ou doutoramento. Os alunos podem frequentar estes cursos em qualquer altura dos seus estudos, de forma voluntária: um exame final escrito é opcional, embora possa ser creditado, se os alunos optarem por fazer o exame e passarem (normalmente, cerca de um terço dos alunos faz o exame, e quase todos os que o fazem passam).

O terceiro grupo diz respeito a estudantes do ensino secundário (nos últimos três anos antes da universidade, aproximadamente com idades entre os 15 e os 18 anos), principalmente no contexto de uma Escola de Verão de astrofísica que criei em 2012 e que tenho organizado anualmente desde então na Paisagem Protegida Corno de Bico (em Paredes de Coura), o AstroCamp. Inicialmente, este projecto destinava-se apenas a estudantes portugueses, mas, gradualmente, tornou-se uma escola internacional, que aceita candidaturas de 42 países elegíveis, apoiada por parceiros internacionais como o ESO, além de vários parceiros nacionais.

Estes cursos são leccionados a grupos relativamente pequenos (em português e no máximo a 40 alunos por turma nos dois primeiros casos, em inglês e no máximo a 20 alunos por turma no terceiro caso), permitindo uma interacção detalhada com os alunos. As aulas são dadas principalmente através de apresentações multimédia, complementadas com o quadro sempre que necessário. Ocasionalmente, também usei várias partes deste material como palestras independentes, principalmente ao visitar escolas do ensino secundário, por exemplo, durante a Semana Mundial do Espaço (neste caso, os grupos são maiores, geralmente de 50 a 120 alunos). Cerca de metade deste material é sobre astrofísica moderna (física das estrelas, relatividade, o modelo-padrão do *Big Bang* e física além do modelo-padrão), enquanto a outra metade é sobre a história da astronomia (e, em menor grau, da física).

Na sequência das muitas perguntas dos formandos sobre onde poderiam encontrar informação adicional sobre os vários tópicos discutidos, chegou a hora de organizar melhor alguns destes conteúdos num livro. Este foi inicialmente escrito em inglês e publicado nessa língua pela Springer, em 2020. No entanto, tornou-se rapidamente claro que uma edição em português seria útil, pelo que, após a primeira publicação, empreendi, nos meus «tempos livres», a tradução para português.

O meu objectivo é fornecer ao leitor uma visita guiada à nossa visão actual do Universo, descrevendo como a desenvolvemos gradualmente e como os resultados da investigação actual (tanto minha como do resto da comunidade científica nesta área) pode ainda mudar esta visão. Para isso, é preciso reunir conceitos da física e da astronomia, incluindo um pouco da história de ambas. A parte histórica pode parecer de menor interesse para o leitor menos atento, mas é importante para entender onde estamos e como as coisas podem desenvolver-se no futuro. Na verdade, acredito fortemente que qualquer pessoa que estude física ou astronomia hoje e considere uma futura carreira profissional neste campo deve ser exposta à história (e filosofia) destas disciplinas, e, naturalmente, o mesmo aplica-se a qualquer outra disciplina científica. É responsabilidade das universidades fornecer tais possibilidades nos cursos que oferecem.

O nível do livro não é técnico. Embora eu não goste particularmente da palavra, ele poderia ser designado como «descritivo», no sentido em que o objectivo é sempre o de destacar os conceitos físicos cruciais. Costumo dizer aos alunos que, se alguém entende as ideias-chave num determinado contexto, pode sempre explorar a matemática mais tarde (se e quando ela for necessária), enquanto tentar começar com a matemática sem entender a física é muito mais difícil. Por esta razão, haverá muito pouca matemática explícita, e a maior parte dela será concentrada em algumas secções. Dito isto, o nível do livro não será tão simples quanto o dos livros típicos de ciência popular: o objectivo é apresentar as coisas com rigor, e, embora eu simplifique muitas delas, fiz o possível para evitar simplificar demasiado.

Imagino que os leitores típicos serão estudantes de licenciatura (não necessariamente de astronomia ou física, mas, ainda assim, com interesse nestas áreas e fazendo um curso introdutório sobre elas). O único pré-requisito é um conhecimento qualitativo de conceitos básicos da física, no nível da física do ensino secundário. O livro (ou alguns dos seus capítulos) poderá, portanto, ser útil para várias aulas introdutórias de astronomia e física ao nível da licenciatura. Este nível também deve tornar o livro relevante para professores do ensino secundário, que podem precisar de ensinar algumas partes do seu conteúdo ou simplesmente adquirir algum conhecimento prévio para responder a perguntas dos alunos mais interessados e curiosos. (No sistema escolar português, pelo menos alguns tópicos de astronomia são ensinados por professores de biologia/geologia, que, por vezes, têm um conhecimento limitado de

astronomia ou física.) Pela mesma razão, o livro deve ser atractivo para estudantes do ensino secundário altamente motivados e que desejem aprender mais sobre física e astronomia.

Tal como já foi mencionado, o livro tem como objectivo reunir materiais de vários cursos de curta duração, mas inclui essencialmente uma parte sobre a história da astronomia (e, em menor grau, da física) e outra sobre astrofísica e cosmologia modernas. Os primeiros capítulos não são puramente «históricos», uma vez que dificilmente poderiam ter sido escritos por um historiador de astronomia ou de física. Para que conste, sou um cientista activo, e não um historiador, e há muitos aspectos da história da ciência que os historiadores acham fascinantes que são de muito pouco interesse para mim (naturalmente, o oposto também será provavelmente verdadeiro). O objectivo de mergulhar na história do tema é o de introduzir, num contexto histórico, conceitos que são importantes para a nossa visão actual do Universo. Ao discutir como eles surgiram e, posteriormente, evoluíram, pode entender-se mais facilmente a sua relevância moderna.

Como forma conveniente de resumir alguns dos conceitos discutidos no livro, este inclui, no final, um pequeno questionário de escolha múltipla, juntamente com alguns pontos sugeridos para reflexão. O leitor pode pensar nestes últimos como convites para escrever pequenos ensaios sobre estes temas, como forma de consolidar ainda mais o conhecimento. As respostas ao questionário de escolha múltipla estão disponíveis no local indicado no final do teste. Algumas destas questões já foram usadas anteriormente nos exames que preparei para as várias edições dos cursos. Finalmente, algumas sugestões de leitura adicional são também fornecidas numa bibliografia geral.

Agradeço aos muitos alunos dos cursos que leccionei nos últimos anos, cujos comentários e perguntas me permitiram, gradualmente, desenvolver vários conteúdos em direcções relevantes e interessantes, a um nível apropriado para os vários públicos pretendidos. Agradeço particularmente ao meu colega Paulo Maurício, com quem tenho leccionado várias edições do curso de formação contínua História do Universo, por muitas discussões interessantes sobre os aspectos históricos, e aos meus alunos de licenciatura, mestrado e doutoramento, especialmente à Ana Catarina Leite e ao José Ricardo Correia, por discussões sobre os aspectos mais modernos.

O surgimento do livro deve muito a Angela Lahee e à sua equipa na Springer, cujas muitas sugestões foram importantes para o desenvolvimento da estrutura da versão original. No entanto, a versão em

português deve-se ao interesse e entusiasmo do João Moita, editor do Grupo Almedina. Agradeço também aos antigos alunos do AstroCamp, que leram vários capítulos da versão em inglês e/ou em português do livro e forneceram inúmeros comentários e sugestões úteis: Catarina Marques, Francesco Chiti, Liliana Sousa, Mariana Caseiro, Marlene Korner, Paloma Thevenet, Pedro Amaral, Siri Berge e Tiago Pereira.

Finalmente, o desenvolvimento das duas versões do livro beneficiou do apoio financeiro do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, através do programa COMPETE 2020 (com a referência POCI-01-0145-FEDER-028987), e da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (com a referência PTDC/FIS-AST/28987/2017), no âmbito do projecto CosmoESPRESSO.

Porto, Abril de 2022

CARLOS MARTINS

Centro de Astrofísica da Universidade do Porto

