# Astrofísica de Altas Energias

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

*Reitor* Vahan Agopyan
*Vice-reitor* Antonio Carlos Hernandes

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

*Pró-reitor* Edmund Chada Baracat

EDITORA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

*Diretor-presidente* Lucas Antonio Moscato

COMISSÃO EDITORIAL

*Presidente* Rubens Ricupero
*Vice-presidente* Valeria De Marco
Carlos Alberto Ferreira Martins
Clodoaldo Grotta Ragazzo
Maria Angela Faggin Pereira Leite
Ricardo Pinto da Rocha
Tânia Tomé Martins de Castro
*Suplentes* José Roberto Castilho Piqueira
Marta Maria Geraldes Teixeira
Sandra Reimão

*Editora-assistente* Carla Fernanda Fontana
*Chefe Div. Editorial* Cristiane Silvestrin

# Astrofísica de Altas Energias

## Uma *Première*

Jorge E. Horvath

edusp

PRÓ-REITORIA
DE GRADUAÇÃO

Copyright © 2020 by Jorge E. Horvath

Apoio da Pró-reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo
Programa de Incentivo à Produção de Livros Didáticos para o Ensino de Graduação

Ficha catalográfica elaborada pela
Associação Brasileira de Editoras Universitárias (Abeu)

Horvath, Jorge Ernesto.
Astrofísica de Altas Energias: Uma *Première* / Jorge E. Horvath. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2020.
352 p.; il.; 16 × 23 cm. – (Coleção Acadêmica, 102)

Inclui imagens.
ISBN 978-85-314-1771-9

1. Astronomia. 2. Astrofísica. 3. Altas Energias. I. Título.

CDD-539.7223

Direitos reservados à

Edusp – Editora da Universidade de São Paulo
Rua da Praça do Relógio, 109-A, Cidade Universitária
05508-050 – São Paulo – SP – Brasil
Divisão Comercial: Tel. (11) 3091-4008 / 3091-4150
www.edusp.com.br – e-mail: edusp@usp.br

Printed in Brazil 2020

Foi feito o depósito legal

*Para las tres ovejas …*
*… continuo sonhando o sonho dogmático de Kant …*

# Sumário

Agradecimentos ..... 15
Apresentação ..... 17

1. A Natureza do Mundo Físico: Partículas Elementares e Interações ..... 21
   1.1 Partículas Elementares e Interações Fundamentais: Uma Introdução ..... 21
   1.2 Interações Elementares de Alta Energia ..... 24
   1.3 O Modelo Padrão das Partículas Elementares ..... 30
   1.4 As Interações Fortes e a QCD (Cromodinâmica Quântica) ..... 32
   1.5 A Gravitação como Interação Fundamental ..... 36
   1.6 O Papel das Interações Fracas ..... 38
   Referências Bibliográficas ..... 42

2. Processos Fundamentais em Altas Energias ..... 45
   2.1 Gênese do Conceito do Fóton ..... 45
   2.2 Processos Relevantes para os Fótons de Alta Energia (Absorção e Espalhamento) ..... 47

2.2.1 Efeito Fotoelétrico ..... 48
2.2.2 Espalhamento Compton ..... 50
2.2.3 Produção de Pares ..... 54
2.2.4 Seção de Choque Total e Coeficiente de Absorção por Unidade de Massa ..... 56
2.3 Processos Relevantes para os Fótons de Alta Energia (Emissão) ..... 58
2.3.1 Radiação de Corpo Negro ..... 58
2.3.2 Radiação de *Bremsstrahlung* ..... 60
2.3.3 Radiação de Síncrotron ..... 65
2.3.4 Radiação de Čerenkov ..... 69
2.3.5 Fontes de Pósitrons e Aniquilação de Pares Linhas de Emissão) ..... 71
Referências Bibliográficas ..... 74

3. Detecção e Instrumentação em Altas Energias ..... 77
3.1 Domínios Espacial, Espectral e Temporal ..... 77
3.2 CCDs na Astronomia Óptica e Altas Energias ..... 81
3.3 O Problema do Foco (Imagem) para os Fótons de Altas Energias e suas Soluções ..... 84
3.4 Instrumentos e Missões Espaciais (Raios X e Gama) ..... 87
Referências Bibliográficas ..... 91

4. A Evolução Estelar até os Estágios Finais ..... 93
4.1 Astrofísica Estelar ..... 93
4.2 Fatos Básicos e Observações ..... 95
4.3 A Descrição da Estrutura Estelar ..... 99
4.4 Algumas Considerações Gerais a Respeito da Evolução Estelar ..... 112
4.5 Evolução Estelar (Baixa Massa) ..... 115
4.6 Evolução Estelar (Alta Massa) ..... 125
Referências Bibliográficas ..... 129

5. Supernovas ..... 131
5.1 Tipos de Supernova e Classificação ..... 131
5.2 Supernovas e Colapsos Gravitacionais (Tipo II, Ib e Ic) ..... 134
5.3 Supernovas Termonucleares (Tipo Ia) ..... 142

5.3.1 Supernovas Ia e Cosmologia.....150
5.4 Supernovas Superluminosas .....153
5.5 Expansão de Remanescentes de Supernova no Meio Interestelar .....156
Referências Bibliográficas .....160

6. Astrofísica dos Objetos Compactos .....163
6.1 Os Eventos de Formação de Objetos Compactos. Estatísticas.....163
6.2 Teoria e Observações de Anãs Brancas .....165
6.2.1 Os Primórdios.....165
6.2.2 A Matéria no Regime de Alta Densidade ($\rho \gtrsim 10^3$ g/cm$^3$) .....167
6.2.3 Estrutura das Anãs Brancas.....168
6.2.4 Limite de Chandrasekhar.....173
6.2.5 As Observações das Anãs Brancas.....175
6.2.6 Esfriamento e Cristalização de Anãs Brancas .....181
6.3 Estrelas de Nêutrons e Pulsares: Estrutura e Evolução...185
6.3.1 As Ideias Iniciais .....185
6.3.2 A Matéria no Regime da Neutronização ($\rho \gtrsim 10^{11}$ g/cm$^3$) .....186
6.3.3 Equações de Estrutura Relativísticas (TOV) e Estrelas de Nêutrons .....190
6.3.4 Modelos Estelares e Comparação com as Observações .....193
6.3.5 Pulsares e Outras Estrelas de Nêutrons .....197
6.4 A Física Básica dos Buracos Negros e suas Manifestações Observacionais .....204
6.4.1 A Construção do Conceito do Buraco Negro.....204
6.4.2 Afinal, o que Observamos dos Buracos Negros? .211
Referências Bibliográficas .....221

7. Acreção em Astrofísica.....225
7.1 O Problema de Roche e a Transferência de Massa .....225
7.2 O Acréscimo de Massa: Acreção Esférica e Discos de Acreção .....230

7.3 Binárias que Contêm Objetos Compactos: Classificação e Observações ..... 236
7.3.1 Variáveis Cataclísmicas (CV) ..... 236
7.3.2 LMXB e HMXB ..... 237
7.3.3 Sistemas Binários com Buracos Negros ..... 240
Referências Bibliográficas ..... 242

8. Núcleos Galácticos Ativos ..... 245
8.1 A Descoberta e Caracterização dos Quasares ..... 245
8.2 Tipos de Núcleos Galácticos Ativos (AGNs): O Modelo Unificado ..... 250
8.3 Núcleos Ativos de Galáxias e a Formação de Estrutura no Universo ..... 252
Referências Bibliográficas ..... 255

9. Astrofísica de Neutrinos ..... 257
9.1 Os Neutrinos e sua Detecção ..... 257
9.2 Fontes de Neutrinos: Os Neutrinos Solares ..... 261
9.3 Fontes de Neutrinos: A Supernova SN1987A ..... 269
Referências Bibliográficas ..... 276

10. Ondas Gravitacionais ..... 279
10.1 Radiação Gravitacional: A Física Básica ..... 279
10.2 Fontes de Radiação Gravitacional ..... 283
10.2.1 O Pulsar Binário PSR 1913+16 e as Ondas Gravitacionais ..... 285
10.3 Detectores de Ondas Gravitacionais ..... 288
10.3.1 Interferômetros e Massas Ressonantes: Do Sonho à Realidade ..... 288
10.4 As Detecções de Fusão de BH e NS: O Começo de uma Nova Era ..... 294
10.4.1 *Ouverture*: A Fusão de Buracos Negros GW150914 ..... 294
10.4.2 A Saga: A Fusão de Duas Estrelas de Nêutrons GW170817 ..... 297
Referências Bibliográficas ..... 300

11. Surtos Gama .....303
11.1 O Problema dos Surtos de Raios Gama:
Os Objetos mais Longínquos Visíveis no Universo .....303
11.2 Modelos para os Surtos .....309
11.3 As Observações mais Recentes e os Modelos .....312
Referências Bibliográficas .....315

12. Raios Cósmicos .....317
12.1 Os Mensageiros dos Maiores Aceleradores
do Universo: Os Raios Cósmicos .....317
12.2 Origem, Propagação e Aceleração .....319
12.3 O Regime de Ultra-Alta Energia .....329
Referências Bibliográficas .....340

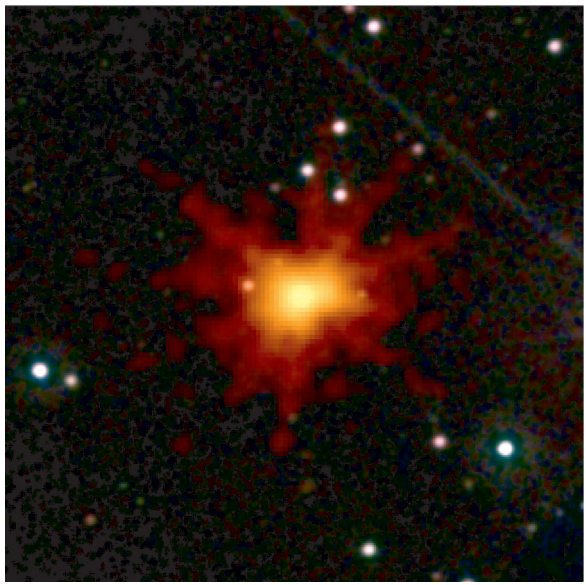
Sobre o Autor .....343

# Agradecimentos

Meu agradecimento a todos os colegas e alunos que me ensinaram Astrofísica durante todos estes anos, entre os quais estão Omar Benvenuto, José Antonio de Freitas Pacheco, Héctor Vucetich, Germán Lugones, Heman Mosquera Cuesta, Bete Dal Pino, Marcelo Allen, César Zen Vasconcellos, Adam Burrows, Márcio Catelan, Ignazio Bombaci, Rachid Ouyed, Ren-Xin Xu, Marco Limongi, S. O. Kepler, Mariano Méndez, F. C. Michel, Todd Thompson, Manuel Malheiro, Sérgio Barbosa Duarte, Genna Bisnovatyi-Kogan, Roberto Dell'Aglio Costa, Marcos Díaz, Maria Alejandra De Vito, Rodolfo Valentim, David Blaschke, Mark Alford, Paulo Sérgio Custódio, Dinah Moreira Allen, Thais Idiart, Gustavo Medina Tanco, Laura Paulucci, Márcio de Avellar, Rodrigo de Souza, Eduardo Janot Pacheco, entre muitos outros. Também gostaria de agradecer a Antônio Lucas Bernardo, quem oficiou de Monitor da disciplina e acrescentou bastante à sua realização. Finalmente, os alunos de AGA 315 contribuíram para o desenvolvimento deste texto na sua forma final. Agradeço à Pró-reitoria de Graduação da USP e à Edusp pela concessão do edital do Programa de Incentivo à Produção de Livros Didáticos para o Ensino de Graduação (PIPLDE) que permitiu que este trabalho visse a luz.

# Apresentação

O avanço vertiginoso da instrumentação astronômica nas últimas décadas do século século XX trouxe progressos sem precedentes para a Astrofísica e a Cosmologia. Como exemplos concretos podemos citar a descoberta da expansão acelerada do Universo e a detecção das ondas gravitacionais provenientes da fusão de buracos negros e estrelas de nêutrons. Se o atraso no ensino desses tópicos para os estudantes já era grande, sem dúvida ficou ainda maior. É imprescindível a reconexão das fronteiras com a Física e Astronomia fundamentais, deixando os estudantes em condições de empreender o estudo dos temas da Astrofísica de Altas Energias. Mas isso nem sempre é fácil, existe um alto grau de complexidade e especialização nos conceitos e nas técnicas daquela, e a tentação de abordar o ensino somente no nível mais avançado ou, pelo contrário, ficar apenas na superfície dos fenômenos e sua análise, é muito grande. Este texto pretende preencher essa lacuna, aproximando os estudantes de Ciências do Universo contemporâneo, repleto de objetos e sistemas fascinantes, mas utilizando as ideias e os cálculos da Física básica, a modo de porta de acesso. Os conteúdos desta publicação são abordados na disciplina AGA 315 Astrofísica de Altas Energias, ministrada pelo autor por vários anos e que serviu de base para o texto. Boa leitura.



Na imagem, o surto gama GRB 080319B produzido a uma distância de 7,5 bilhões de anos-luz. Esse evento poderia ter sido visto a olho nu por qualquer observador na Terra que estivesse olhando em sua direção na forma de um destelho com duração de ~ segundos.

LANÇAMENTO 2020

# JÁ DISPONÍVEL

LIVRARIA VIRTUAL

www.edusp.com.br/loja

LIVRARIAS

www.edusp.com.br/livrarias

INFORMAÇÕES

Divulgação Edusp

divulga@usp.br

edusp