



Antonio Capanema Guerra Galvão

**Multi-Messenger Perspectives on the
High-Energy Universe through Neutrinos,
Gamma Rays and Cosmic Rays**

Tese de Doutorado

Thesis presented to the Programa de Pós-graduação em Física of
PUC-Rio in partial fulfillment of the requirements for the degree
of Doutor em Ciências – Física .

Advisor: Prof. Arman Esmaili Taklimi

Rio de Janeiro
June 2024



Antonio Capanema Guerra Galvão

**Multi-Messenger Perspectives on the
High-Energy Universe through Neutrinos,
Gamma Rays and Cosmic Rays**

Thesis presented to the Programa de Pós-graduação em Física of PUC-Rio in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor em Ciências – Física . Approved by the Examination Committee:

Prof. Arman Esmaili Taklimi

Advisor

Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. Hiroshi Nunokawa

Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. Pedro Cunha de Holanda

Unicamp

Prof. Aion da Escóssia Melo Viana

USP

Prof. João Ramos Torres de Mello Neto

UFRJ

Rio de Janeiro, June 21st, 2024

All rights reserved.

Antonio Capanema Guerra Galvão

Bachelor of Science and Master of Science degrees in Physics
at the Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

Bibliographic data

Galvão, Antonio Capanema Guerra

Multi-messenger perspectives on the high-energy universe
through neutrinos, gamma rays and cosmic rays / Antonio
Capanema Guerra Galvão; advisor: Arman Esmaili Taklimi. –
2024.

211 f: il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio
de Janeiro, Departamento de Física, 2024.

Inclui bibliografia

1. Física – Teses. 2. Astrofísica Multimessageira. 3. Cas-
catas Eletromagnéticas. 4. Neutrinos Astrofísicos. 5. Raios
Cósmicos Ultra-Energéticos. I. Taklimi, Arman Esmaili. II.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departa-
mento de Física. III. Título.

CDD: 530

Abstract

Galvão, Antonio Capanema Guerra; Taklimi, Arman Esmaili (Advisor). **Multi-Messenger Perspectives on the High-Energy Universe through Neutrinos, Gamma Rays and Cosmic Rays**. Rio de Janeiro, 2024. 211p. Tese de Doutorado – Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As we enter the precision era of multi-messenger astronomy, new windows are opened for us to better understand the Universe, from quantum to cosmic scales. In particular, the study of high-energy astrophysical phenomena has allowed us to probe the most extreme environments known to mankind, as well as obtain unprecedented breakthroughs within the realm of particle physics. This thesis summarizes the important findings of multi-messenger astrophysics over the years, before focusing its attention to three relevant topics currently being investigated in the field. Firstly, we tackle the problem of γ -ray propagation in space. High center-of-momenta interactions during this process leads to the formation of electromagnetic cascades that develop over cosmological distances. We describe a semi-analytical code called “ γ -Cascade”, which calculates the fluxes at the Earth resulting from such cascades. We also explore the possibility of producing neutrinos in ultra-high-energy cascades. Secondly, we establish a new, original multi-messenger connection between the measured fluxes of TeV–PeV astrophysical neutrinos and ultra-high-energy cosmic rays. This is done by taking advantage of our precise γ -ray observations at sub-TeV energies, demonstrating the power of multi-messenger analyses. Finally, we study the evolution of the flavor composition of supernova neutrinos in a model-independent way. Our novel method allows for predictions of the neutrino flavor content measured at the Earth from supernovae, accounting for matter effects within its dense environment, while remaining completely agnostic about the outcome of self-induced flavor conversions in its core.

Keywords

Multi-Messenger Astrophysics; Electromagnetic Cascades; Astrophysical Neutrinos; Ultra-High-Energy Cosmic Rays.

Resumo

Galvão, Antonio Capanema Guerra; Taklimi, Arman Esmaili. **O Universo de Altas Energias sob a Perspectiva Multimessageira de Neutrinos, Raios Gama e Raios Cósmicos**. Rio de Janeiro, 2024. 211p. Tese de Doutorado – Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Conforme entramos na era de precisão da astronomia multimessageira, novas janelas se abrem para compreendermos melhor o Universo, desde a escala quântica até a escala cósmica. Em particular, o estudo de fenômenos astrofísicos de altas energias tem nos permitido acessar os ambientes mais extremos conhecidos pela humanidade, bem como obter avanços sem precedentes no domínio da física de partículas. Esta tese resume as descobertas importantes da astrofísica multi-messageira ao longo dos anos, e, em seguida, foca a sua atenção em três tópicos relevantes que estão atualmente sendo investigados neste campo. Primeiramente, abordamos o problema da propagação de raios gama no espaço. Interações durante este processo levam à formação de cascatas eletromagnéticas que se desenvolvem ao longo de distâncias cosmológicas. Apresentaremos um código semi-analítico chamado “ γ -Cascade”, que calcula os fluxos na Terra resultantes de tais cascatas. Também exploramos a possibilidade de se produzir neutrinos em cascatas ocorrendo a energias ultra-altas. Em segundo lugar, estabeleceremos uma relação multimessageira nova e original entre os fluxos medidos de neutrinos astrofísicos entre TeV–PeV e raios cósmicos ultra-energéticos. Para isso, utilizaremos nossas observações precisas de raios gama em energias abaixo de TeV, demonstrando o poder de uma análise multimessageira. Finalmente, estudaremos a evolução da composição de sabor de neutrinos produzidos em supernovas. Nosso novo método permite previsões genéricas sobre os possíveis sabores de neutrinos medidos na Terra. São levados em consideração os efeitos de matéria dentro dos ambientes densos de supernovas, enquanto permanecemos completamente agnósticos em relação ao resultado das conversões auto-induzidas de sabor em seus núcleos.

Palavras-chave

Astrofísica Multimessageira; Cascatas Eletromagnéticas; Neutrinos Astrofísicos; Raios Cósmicos Ultra-Energéticos.

Table of contents

Thesis Outline	20
1 Introduction	22
1.1 Multi-Messenger Astronomy: An Overview	23
1.1.1 Photons	23
1.1.2 Cosmic Rays	29
1.1.3 Neutrinos	37
1.1.4 Gravitational Waves	44
1.2 Revealing the Sources of High-Energy Astroparticles	45
1.2.1 Steady Sources	46
1.2.2 Transient Sources	49
1.2.3 Current Status of Multi-Messenger Source Searches	50
1.3 Multi-Messenger Production	53
1.3.1 Acceleration Mechanisms	54
1.3.2 Hadronic Processes in Astrophysical Sources	57
1.3.2.1 pp Channel	58
1.3.2.2 $p\gamma$ Channel	61
1.3.2.3 Neutrino- γ -ray Connection	63
1.3.3 The Waxman-Bahcall Bound	66
1.4 The Flavor Content of Astrophysical Neutrinos	67
1.4.1 Neutrino Oscillations in Vacuum	68
1.4.2 Matter Effects and the MSW Resonance	71
2 The Physics of Electromagnetic Cascades	75
2.1 Cosmic Voids are not Empty	75
2.1.1 Cosmic Microwave Background	76
2.1.2 Extragalactic Background Light	77
2.1.3 Cosmic Radio Background	81
2.1.4 Magnetic Fields	82
2.2 Particle Interactions in Electromagnetic Cascades	85
2.2.1 Electron Pair Production	86
2.2.2 Inverse Compton Scattering	89
2.2.3 Energy-Space Evolution of Cascades	91
2.2.4 Cascade Processes at Ultra-High Energies	93
2.3 γ -Cascade V4: Updating an EM Cascade Simulation Program	95
2.3.1 The γ -Cascade Library	96
2.3.2 Structure of the Main Code	98
2.3.2.1 On-The-Spot Approximation for Inverse Compton Scattering	99
2.3.3 Improvements in γ -Cascade V4 and Preliminary Results	104
2.4 Cascade Neutrinos from Muon Pair Production	105
2.4.1 Comparing Relevant Length Scales	106
2.4.2 Monte Carlo Simulations of UHE Cascades	109
2.4.3 Summary and Future Prospects	115

3	A γ-Ray Connection between Neutrinos and UHECRs	117
3.1	The Extragalactic γ -Ray Background	118
3.1.1	Conventional EGB Contributions	119
3.2	Cosmogenic γ rays from UHECRs	125
3.2.1	The Observed Composition of UHECRs	126
3.2.2	UHECR Propagation through Intergalactic Space	129
3.2.3	Simulations with CRPropa 3.2	132
3.3	The Electromagnetic Counterpart of Astrophysical Neutrinos	140
3.3.1	IceCube and its Astrophysical Neutrino Observations	140
3.3.1.1	Event Morphologies	142
3.3.1.2	Atmospheric Muon and Neutrino Backgrounds	143
3.3.1.3	IceCube Datasets	145
3.3.2	Corresponding Cascaded γ -ray Fluxes	147
3.4	Analysis Method and Preliminary Results	150
4	The Flavor Composition of Supernova Neutrinos	155
4.1	Self-Induced Flavor Conversions	155
4.2	Matter Effects in Supernovae	156
4.3	A Systematic Approach to Supernova Neutrino Flavor Evolution	157
4.3.1	Case 1: Flavor Coherence from Collective Effects	158
4.3.2	Case 2: Flavor Decoherence from Collective Effects	161
4.3.3	Supernova Antineutrino Flavor Ratios	162
4.4	Summary and Future Prospects	163
5	Bibliography	165
A	Neutrino Spectra from Muon Decay	197
B	Energy Conservation on a Grid	198
C	On-The-Spot Approximation on a Grid	201
D	γ-Cascade Functions	204
E	Neutrinos from Evaporating Primordial Black Holes	206

Essa tese não está completa, se encontra indisponível por questões de confidencialidade com data para ser liberada conforme está especificado no link <https://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/index.php?codAcervo=238848> .