



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FÍSICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA

Luan de Castro Torres

**Nuvens moleculares como fontes  
multi-mensageiras: raios cósmicos, raios gama e  
neutrinos**

Campina Grande, Paraíba, Brasil

10 de março de 2025

Luan de Castro Torres

**Nuvens moleculares como fontes multi-mensageiras: raios  
cósmicos, raios gama e neutrinos**

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Luiz Augusto Stuani Pereira, apresentada à Unidade Acadêmica de Física em complementação aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Professor Dr. Luiz Augusto Stuani Pereira

Campina Grande, Paraíba, Brasil

10 de março de 2025

T693n

Torres, Luan de Castro.

Nuvens moleculares como fontes multi-mensageiras: raios cósmicos, raios gama e neutrinos / Luan de Castro Torres. – Campina Grande, 2025.

110 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2025.

“Orientação: Prof. Dr. Luiz Augusto Stuani Pereira”.

Referências.

1. Astrofísica de Partículas. 2. Nuvens Moleculares. 3. Raios Cósmicos. 4. Raios Gama. 5. Neutrinos. 6. Geant4. I. Pereira, Luiz Augusto Stuani. II. Título.

CDU 52(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM FISICA

Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

**FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES**

**LUAN DE CASTRO TORRES**

**Nuvens moleculares como fontes multi-mensageiras: raios cósmicos, raios gama e neutrinos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em: 13/12/2024

**Luiz Augusto Stuani Pereira**  
Presidente da Comissão e Orientador

**Diego Alejandro Cogollo Aponte**  
Examinador Interno

**Rita de Cássia dos Anjos**  
Examinador Externo



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Augusto Stuani Pereira, Usuário Externo**, em 15/01/2025, às 13:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RITA DE CASSIA DOS ANJOS, Usuário Externo**, em 22/01/2025, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de](#)



Documento assinado eletronicamente por **DIEGO ALEJANDRO COGOLLO APONTE, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/01/2025, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5171085** e o código CRC **31F497EA**.

*Dedico este trabalho a todos os jovens cientistas e estudantes que, movidos pela curiosidade, sonham em construir um futuro onde o conhecimento e a ciência prevaleçam.*



# Agradecimentos

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Augusto Stuani Pereira, por ter me transmitido tanto conhecimento, confiando no meu potencial e me dando a oportunidade de desenvolver este trabalho. Luiz sempre será uma grande inspiração para que eu possa voar cada vez mais alto.

Ao meu colega e grande amigo Samuel Victor Bernardo da Silva, pela parceria ao longo dessa trajetória e pelo apoio incondicional nos momentos mais desafiadores deste processo.

Àqueles que me apoiaram financeiramente: à Divina Schinaider; minha avó, Maria Lúcia; e meu avô, Dionísio; junto com meus tios, Nicolau, Quintino e Gabriela, que sempre acreditaram e investiram em mim. Minha gratidão a todos vocês é eterna.

Ao meu irmão, Maycom Willian, que esteve ao meu lado desde a graduação e, mesmo de longe, sempre me ajudou e incentivou.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Campina Grande, uma instituição que desempenhou um papel fundamental na minha formação acadêmica, sendo o ambiente que me inspirou para expandir ainda mais meus conhecimentos e desenvolver cada vez mais minha paixão pela ciência.

*"Somos todos iguais, mas alguns de nós olham para as estrelas."*

*Oscar Wilde*

# Resumo

Nuvens moleculares são regiões interestelares formadas por gás e poeira e podem ser estudadas como possíveis fontes multi-mensageiras, emissoras de raios cósmicos, raios gama e neutrinos. Os raios cósmicos são partículas carregadas relativísticas, compostas principalmente por núcleos atômicos, como prótons e partículas alfa, e elétrons. Essas partículas, durante sua propagação pelo meio interestelar, podem interagir com nuvens moleculares, causando várias alterações físico-químicas, como aquecimento do gás e de grãos de poeira e formação e destruição de moléculas. A interação de raios cósmicos com nuvens moleculares gera a ionização do gás interestelar e aumenta a taxa de aquecimento, o que pode alterar a estabilidade da nuvem e facilitar ou inibir o colapso gravitacional, processo crucial para o nascimento de novas estrelas. Além do mais, a interação dos raios cósmicos com nuvens moleculares produz partículas secundárias hadrônicas, eletromagnéticas e muônicas via diferentes processos físicos. O objetivo deste trabalho é investigar os mecanismos físicos de interação de raios cósmicos, de diferentes composições químicas e energias, com uma nuvem molecular típica (massa de  $5400 M_{\odot}$  contendo átomos de H e C, tamanho de  $\sim 4,8$  pc e densidade numérica média de  $\sim 300 \text{ cm}^{-3}$ ) através do método de simulação de Monte Carlo Geant4. Assim, a energia depositada em diferentes camadas da nuvem e os espectros de hádrons, raios gama e neutrinos que emergem da mesma são investigados. Muitas nuvens moleculares estão relativamente próximas de remanescentes de supernovas, fontes intensas de raios cósmicos. A nuvem molecular de Perseus pode fornecer um ambiente ideal para estudar como esses eventos violentos impactam as nuvens próximas, enriquecendo o meio interestelar com elementos pesados e energia. Deste modo, investigou-se também a interação de raios cósmicos com a nuvem molecular de Perseus, a qual é uma região de formação estelar localizada na constelação de Perseus, a aproximadamente 1000 anos-luz da Terra. Ela é uma grande nuvem de gás e poeira interestelar, repleta de regiões densas e frias onde novas estrelas estão se formando.

**Palavras-chave:** Nuvens moleculares. Raios cósmicos. Raios gama. Neutrinos. Geant4.

# Abstract

Molecular clouds are interstellar regions formed by gas and dust and can be studied as possible multi-messenger sources, emitting cosmic rays, gamma rays, and neutrinos. Cosmic rays are relativistic charged particles, composed mainly of atomic nuclei, such as protons and alpha particles, and electrons. These particles, during their propagation through the interstellar medium, can interact with molecular clouds, causing various physicochemical changes, such as gas and grain heating and molecular formation and destruction. The interaction of cosmic rays with molecular clouds generates the ionization of interstellar gas and increases the heating rate, which can alter the stability of the cloud and facilitate or inhibit gravitational collapse, a crucial process for the birth of new stars. Furthermore, the interaction of cosmic rays with molecular clouds produces hadronic, electromagnetic, and muonic secondary particles via different physical processes. This work aims to investigate the physical mechanisms of cosmic-ray interaction, of different chemical compositions and energies, with a typical molecular cloud (mass  $5400 M_{\odot}$  containing H and C atoms, size of  $\sim 4.8$  pc and average number density  $\sim 300 \text{ cm}^{-3}$ ) using the Geant4 Monte Carlo simulation method. Thus, the energy deposited in different cloud layers and the spectra of hadrons, gamma rays, and neutrinos that emerge from the cloud are investigated. Many molecular clouds are relatively close to supernova remnants, which are intense sources of cosmic rays. The Perseus molecular cloud may provide an ideal environment to study how these violent events impact nearby clouds, enriching the interstellar medium with heavy elements and energy. In this way, we also investigated the interaction of cosmic rays with the Perseus molecular cloud, which is a star-forming region located in the constellation Perseus, approximately 1000 light-years from Earth. It is a large cloud of interstellar gas and dust, filled with dense, cold regions where new stars are forming.

**Keywords:** Molecular clouds. Cosmic rays. Gamma rays. Neutrinos. Geant4.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Espectro de energia dos raios cósmicos. Fonte: [35]. . . . .	26
Figura 2 – Abundância elementar dos raios cósmicos em comparação com a composição do sistema solar. As abundâncias estão normalizadas em relação ao Si=103. Fonte: [55]. . . . .	28
Figura 3 – Ilustração esquemática do processo de aceleração difusa dos raios cósmicos. Fonte: Autor. . . . .	29
Figura 4 – Representação do mecanismo de aceleração de Fermi de segunda ordem. Fonte: Autor (adaptado de [63]). . . . .	30
Figura 5 – Representação do mecanismo de aceleração de Fermi de primeira ordem. Fonte: Autor (adaptado de [63]). . . . .	30
Figura 6 – Espectro de raios cósmicos primários coletados de diferentes missões espaciais. Fonte: Autor. . . . .	34
Figura 7 – Temperatura do gás em diferentes camadas de uma nuvem molecular. Fonte: Autor. . . . .	41
Figura 8 – Temperatura dos grãos de poeira em diferentes camadas de uma nuvem molecular. Fonte: Autor. . . . .	42
Figura 9 – Produção de neutrinos e raios gama em uma nuvem molecular hipotética através de raios cósmicos provenientes de remanescentes de supernova. Fonte: Autor. . . . .	49
Figura 10 – Cascata de partículas produzidas na interação de raios cósmicos com uma nuvem molecular. Fonte: Adaptado de [151]. . . . .	49
Figura 11 – Imagem da nuvem molecular de Perseus fornecida pelo Telescópio Espacial Spitzer da NASA no espectro infravermelho. Fonte: [163]. . . . .	52
Figura 12 – Representação Geométrica da Nuvem Molecular hipotética. Fonte: Autor. . . . .	61
Figura 13 – Representação geométrica da nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	65
Figura 14 – Modelos hadrônicos disponíveis no Geant4. Fonte: [187]. . . . .	67
Figura 15 – Imagem via Geant4 de um feixe de elétrons (linha sólida vermelha) incidindo perpendicularmente em relação ao plano da nuvem molecular, produzindo raios gama e neutrinos eletrônicos (linhas sólidas verdes). Fonte: Autor. . . . .	70
Figura 16 – Distribuição da energia incidente (linha sólida preta) e depositada (linha sólida vermelha) por partículas de raios cósmicos primárias na nuvem molecular. Fonte: Autor. . . . .	71
Figura 17 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre $1^\circ$ e $10^\circ$ . Fonte: Autor. . . . .	72

Figura 18 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 10.1° e 20°. Fonte: Autor. . . . .	73
Figura 19 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 20.1° e 30°. Fonte: Autor. . . . .	73
Figura 20 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 30.1° e 40°. Fonte: Autor. . . . .	74
Figura 21 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 40.1° e 50°. Fonte: Autor. . . . .	74
Figura 22 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 50.1° e 60°. Fonte: Autor. . . . .	75
Figura 23 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 60.1° e 70°. Fonte: Autor. . . . .	75
Figura 24 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 70.1° e 80°. Fonte: Autor. . . . .	76
Figura 25 – Energia depositada por raios cósmicos na nuvem molecular para diferentes faixas de ângulo de incidência. Fonte: Autor. . . . .	77
Figura 26 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para elétrons como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	78
Figura 27 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para prótons como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	79
Figura 28 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para núcleos de He como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	79
Figura 29 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para núcleos de C como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	80
Figura 30 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para núcleos de Fe como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	80
Figura 31 – Partículas que emergiram da nuvem a partir de próton como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	81
Figura 32 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por elétrons. Fonte: Autor. . . . .	82
Figura 33 – Distribuição em energia das partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por prótons. Fonte: Autor. . . . .	82

Figura 34 – Distribuição em energia das partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por núcleos de He. Fonte: Autor. .....	83
Figura 35 – Distribuição em energia das partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por núcleos de C. Fonte: Autor. .....	83
Figura 36 – Distribuição em energia das partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por núcleos de Fe. Fonte: Autor. .....	84
Figura 37 – Distribuição da energia incidente e depositada por partículas de raio cósmicos primárias na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . .	86
Figura 38 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 1° e 10° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	87
Figura 39 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 10.1° e 20° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	87
Figura 40 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 20.1° e 30° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	88
Figura 41 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 30.1° e 40° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	88
Figura 42 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 40.1° e 50° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	89
Figura 43 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 50.1° e 60° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	89
Figura 44 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 60.1° e 70° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	90
Figura 45 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 70.1° e 80° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	90
Figura 46 – Energia depositada por diferentes tipos de raio cósmico na nuvem molecular de Perseus para diferentes faixas de ângulo de incidência. Fonte: Autor. . . . .	91

Figura 47 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para elétrons como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	92
Figura 48 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para prótons como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	93
Figura 49 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para núcleos de He como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	93
Figura 50 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para núcleos de C como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	94
Figura 51 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para núcleos de Fe como raio cósmico primário. Fonte: Autor. . . . .	94
Figura 52 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por elétron. Fonte: Autor. . . . .	96
Figura 53 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por prótons. Fonte: Autor. . . . .	96
Figura 54 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por núcleos de He. Fonte: Autor. . . . .	97
Figura 55 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por núcleos de C. Fonte: Autor. . . . .	97
Figura 56 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por núcleos de Fe. Fonte: Autor. . . . .	98

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades em cada camada da nuvem molecular. Fonte: Autor. . .	58
Tabela 2 – Propriedades em cada camada da nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor. . . . .	65
Tabela 3 – Partículas absorvidas, transmitidas e refletidas proveniente de raios cósmicos. Fonte: Autor. . . . .	81
Tabela 4 – Comparação da energia média de neutrinos de diferentes sabores pro- duzidos por raios cósmicos como próton e núcleo de Fe. Fonte: Autor. .	84



# Lista de abreviaturas e siglas

UHECRs	Raios C3smicos de Ultra-Alta Energia
GRBs	Explos3es de Raios Gama
CTA	Cherenkov Telescope Array
Geant4	GEometry ANd Tracking
CMB	Radia33o C3smica de Fundo
MC	Nuvem Molecular
CR	Raio C3smico
GPS	General Particle Source
ISM	Meio Interestelar
AGNs	N3cleos Ativos de Gal3xias
CAE	Chuveiro Atmosf3rico Extenso

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>RAIOS CÓSMICOS</b>	<b>25</b>
2.1	Origem e Espectro de Energia	25
2.2	Composição Química	27
2.3	Fontes e Mecanismos de Aceleração	28
2.4	Propagação	31
2.5	Detecção	33
<b>3</b>	<b>NUVENS MOLECULARES</b>	<b>39</b>
3.1	Composição Química de Nuvens Moleculares	39
3.2	Temperatura das Nuvens Moleculares	40
3.3	Massa das Nuvens Moleculares	41
3.4	Efeitos da Ionização do Gás em Nuvens Moleculares	43
<b>4</b>	<b>ASTROFÍSICA MULTI-MESSAGEIRA</b>	<b>45</b>
4.1	Nuvens Moleculares como Fontes Multi-mensageiras	46
4.2	Interações Hadrônicas em Nuvens Moleculares	47
<b>5</b>	<b>NUVEM MOLECULAR DE PERSEUS</b>	<b>51</b>
5.1	Composição Química da Nuvem Molecular de Perseus	52
5.2	Temperatura na Nuvem Molecular de Perseus	53
5.3	Densidade da Nuvem Molecular de Perseus	54
5.3.1	Densidade Colunar da Nuvem Molecular de Perseus	55
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>57</b>
<b>6.1</b>	<b>Geant4</b>	<b>57</b>
6.1.1	Geometria de uma Típica Nuvem Molecular	57
6.1.2	Geometria da Nuvem Molecular de Perseus	60
6.1.3	Processos Físicos do Geant4	66
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>69</b>
7.1	Interação de Raios Cósmicos com Nuvens Moleculares e a Deposição de Energia	69
7.2	Partículas Secundárias Produzidas e que Emergiram da Nuvem Molecular	77

7.3	Interação de Raios Cósmicos com a Nuvem Molecular de Perseus e Deposição de Energia . . . . .	85
7.4	Partículas Secundárias que Emergem da Nuvem Molecular de Perseus	92
8	CONCLUSÕES . . . . .	99
	REFERÊNCIAS . . . . .	101



# 1 Introdução

Em 1912, o físico austríaco Victor Franz Hess voou várias vezes em um balão em áreas próximas do solo e em altitudes mais elevadas, realizando medidas da ionização do ar atmosférico [1]. Hess, munido de um eletroscópio associado a um detector de ionização, constatou que a uma altitude de 5300 m a taxa de ionização era cerca de três vezes maior que a do nível do mar e concluiu que a radiação penetrante na atmosfera vinha de cima, de algum ponto do espaço. Hess concluiu, após suas investigações, que a ionização observada era devida à ação de uma radiação desconhecida, altamente penetrante, proveniente do espaço, os raios cósmicos. Pela descoberta da radiação cósmica, Victor Hess recebeu o Prêmio Nobel em 1936 [2].

Os raios cósmicos são partículas relativísticas, altamente energéticas, que se propagam pelo espaço galáctico e intergaláctico. São compostos majoritariamente por núcleos atômicos, como prótons, partículas alfa e elementos mais pesados, e elétrons e pósitrons [3, 4]. Os raios cósmicos se comportam como fonte de calor ao se propagarem pelo meio interestelar, em particular em nuvens moleculares densas [5]. Os raios cósmicos de origem galáctica e extragaláctica, ao interagirem com tais nuvens, depositam energia em suas camadas, ionizando o gás de hidrogênio molecular [6, 7]. A ionização causada pelos raios cósmicos contribui para o aquecimento do gás interestelar, o que pode alterar a taxa de colapso gravitacional e, conseqüentemente, o processo de formação estelar. Este efeito tem sido amplamente estudado, pois os raios cósmicos podem afetar a estabilidade das nuvens e modificar a distribuição da massa de gás necessária para a formação de estrelas [8].

Nuvens moleculares são compostas por gás e grãos de poeira, geralmente formadas por hidrogênio ionizado e carbono [9]. Embora haja outros elementos, como nitrogênio, oxigênio e ferro, sua influência é insignificante. Acredita-se que esses grãos de poeira de carbono tenham um diâmetro da ordem de  $10^{-7}$  m, e seu percentual em nuvens moleculares é inferior a 1% [10, 11]. Apesar da grande variedade de moléculas, a maioria está presente em nuvens de maior densidade, o que pode ser de grande interesse para a astroquímica [12] e astrobiologia [13].

A irradiação de nuvens moleculares por raios cósmicos resulta em várias alterações físicas e físico-químicas que vão desde a energia depositada que aquece a nuvem e formação de partículas (cascatas intranucleares) até ruptura molecular e eventual formação de novas espécies [14, 5]. Todas as partículas produzidas durante as interações (prótons, nêutrons, múons, píons, elétrons, fótons, etc.) interagem com o meio via diferentes processos físicos, depositando energia de forma direta ou indireta. Vários esforços foram realizados com o objetivo de compreender a deposição de energia em diferentes regiões da nuvem por

diferentes partículas de raios cósmicos [5, 10, 15, 16, 17, 18, 19].

A nuvem molecular de Perseus é uma das regiões de formação estelar mais próximas e acessíveis da Terra, o que a torna essencial para o estudo dos raios cósmicos e suas interações com nuvens moleculares. A nuvem molecular de Perseus oferece uma oportunidade única para estudar a propagação dos raios cósmicos em uma nuvem molecular densa, fornecendo informações sobre o comportamento desses raios em ambientes que bloqueiam parte de sua entrada. A densidade e a composição da nuvem afetam como os raios cósmicos se espalham e interagem com as partículas locais, permitindo aos cientistas investigar como essas partículas se dissipam em diferentes regiões da galáxia e contribuem para a evolução do meio interestelar [20]. A realização de simulações da penetração e propagação de raios cósmicos ajuda a compreender melhor como essas partículas perdem energia, ionizam o gás e se espalham em nuvens moleculares densas. Esses estudos têm implicações para o ciclo de vida das nuvens e a formação de estruturas estelares dentro delas, uma área fundamental para entender o impacto dos raios cósmicos em galáxias com nuvens moleculares semelhantes [21].

Em geral, as nuvens moleculares são cada vez mais vistas como fontes multi-mensageiras de informação astrofísica, pois emitem diferentes tipos de sinais [22, 23, 24]. A interação de raios cósmicos com o gás da nuvem gera emissões de raios gama, que podem ser detectadas por telescópios como o Fermi-LAT<sup>1</sup> [25], H.E.S.S.<sup>2</sup> (*The High Energy Stereoscopic System*) [26] e MAGIC<sup>3</sup> (*Major Atmospheric Gamma-Imaging Cherenkov Telescope*) [27] e outros detectores de alta energia. Essas emissões são fundamentais para entender o papel dos raios cósmicos na evolução das nuvens moleculares e na distribuição de partículas energéticas no espaço interestelar [28]. Além disso, pode ocorrer também a produção de neutrinos em regiões de formação estelar intensa, que são partículas de difícil detecção devido à sua baixa interação com a matéria [29, 30]. A detecção de neutrinos vindos de áreas próximas a nuvens moleculares ajudaria a identificar regiões de atividade astrofísica extrema e eventos como explosões de supernovas e fusões de objetos compactos.

O conteúdo abordado nesta dissertação é dividido da seguinte forma: no capítulo 2, abordamos a física dos raios cósmicos, como composição química e os mecanismos de propagação e aceleração destas partículas. No capítulo 3, investigamos como as nuvens moleculares são formadas, sua composição química, densidade e temperatura. Os processos físicos envolvidos na interação dos raios cósmicos com nuvens moleculares são descritos no capítulo 4, o estudo da nuvem molecular de Perseus juntamente com os processos físicos responsáveis pela interação dos raios cósmicos com a nuvem no capítulo 5, enquanto o *software* de análise das interações é abordado no capítulo 6. Os resultados obtidos neste trabalho, como a deposição de energia pelos raios cósmicos em diferentes regiões da nuvem

---

<sup>1</sup> <<https://glast.sites.stanford.edu/>>

<sup>2</sup> <<https://www.mpi-hd.mpg.de/HESS/>>

<sup>3</sup> <<http://www.magic.iac.es/>>

molecular, bem como os espectros de hádrons, raios gama e neutrinos que emergem da nuvem são descritos no capítulo 7.



## 2 Raios C3smicos

Os raios c3smicos s3o part3culas carregadas altamente energ3ticas originadas dentro e fora da nossa gal3xia, os quais chegam 3 Terra com um espectro de energia que se estende desde 10 MeV at3 acima de  $10^{20}$  eV [31]. S3o constitu3dos majoritariamente por pr3tons e por outros n3cleos at3micos, mas h3 tamb3m el3trons, p3sitr3ns, antipr3tons, neutrinos e f3tons gama. As part3culas de raios c3smicos viajam a velocidades pr3ximas 3 da luz e algumas delas s3o as part3culas mais energ3ticas j3 observadas na natureza [32]. Embora os raios c3smicos tenham sido descobertos em 1912, suas fontes e mecanismos de propaga33o s3o ainda um mist3rio a ser desvendado. Assim, este cap3tulo fornece uma vis3o geral das propriedades dos raios c3smicos e descreve as teorias mais comuns a respeito dos mecanismos de acelera33o e propaga33o destas part3culas.

### 2.1 Origem e Espectro de Energia

O espectro de energia dos raios c3smicos se estende desde 10 MeV at3 acima de  $10^{20}$  eV, e pode ser descrito por uma lei de pot3ncia  $dN/dE \propto E^{-\alpha}$ , indicando processos f3sicos de acelera33o n3o t3rmica de part3culas [33]. O 3ndice espectral 3 da ordem de  $\alpha \approx 2,7$  abaixo da regi3o do *joelho* do espectro em  $5 \times 10^{15}$  eV, e  $\alpha \approx 3$  entre a regi3o do *joelho* e *tornozelo* em  $3 \times 10^{18}$  eV. Acima da regi3o do *tornozelo* do espectro,  $\alpha \approx 2,6$  seguido por uma supress3o no fluxo de raios c3smicos para energias acima de  $4 \times 10^{19}$  eV [34]. A Figura 1 mostra um compilado de resultados experimentais do espectro diferencial de energia dos raios c3smicos de diferentes compos33es qu3micas. A compreens3o da origem das caracter3sticas do fluxo de raios c3smicos 3 fundamental para identificar as fontes gal3cticas e extragal3cticas emissoras destas part3culas, bem como os mecanismos f3sicos de acelera33o e propaga33o de part3culas.

At3 a regi3o do *joelho* do espectro de energia, o fluxo de part3culas 3 suficientemente alto, sendo poss3vel medir sua compos33o de forma direta [36]. V3rios pesquisadores acreditam que os raios c3smicos com energia abaixo da regi3o do *joelho* 3 de origem gal3ctica [37], enquanto para energias maiores as part3culas s3o de origem extragal3ctica [38]. Para energias a partir de 1 EeV, o fluxo de part3culas 3 da ordem de 1 part3cula por metro quadrado por ano, impossibilitando sua detec33o de maneira direta. Assim, o espectro de energia pode ser obtido indiretamente atrav3s de medidas das propriedades dos chuveiros atmosf3ricos extensos induzidos pela part3cula de raio c3smico no topo da atmosfera [39, 40]. A regi3o do *joelho* pode ser interpretada como uma superposi33o do espectro de energia de diferentes n3cleos, os quais exibem um corte em diferentes energias.

Assumindo que o espectro de energia dos raios c3smicos abaixo de  $10^{15}$  eV 3 de

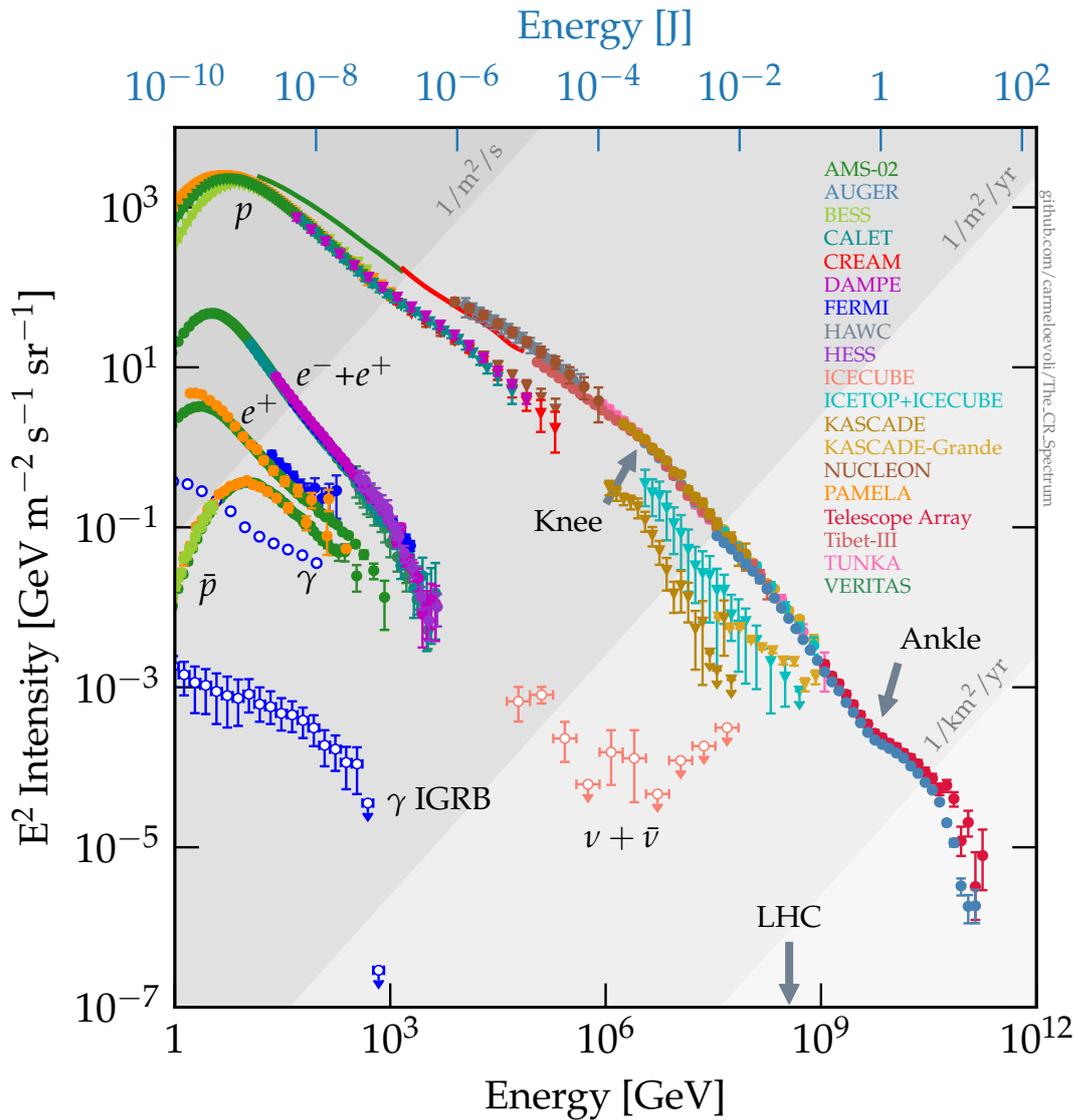


Figura 1 – Espectro de energia dos raios cósmicos. Fonte: [35].

origem galáctica, a região do *joelho* reflete que a maioria dos aceleradores cósmicos na galáxia atingiu seu limite para aceleração de prótons de raios cósmicos [41]. Alguns tipos de remanescentes de supernova são considerados como não eficazes para acelerar prótons acima de  $10^{15}$  eV [42]. Além do mais, efeitos de propagação e confinamento na galáxia também precisam ser considerados [43]. Os experimentos KASCADE-Grande (*KArlsruhe Shower Core and Array DEtector – Grande*)<sup>1</sup> [44] e Fly’s Eye<sup>2</sup> [45] reportaram observações de um segundo *joelho* no espectro de energia em aproximadamente  $4 \times 10^{17}$  eV.

Em relação à região do *tornozelo* em aproximadamente  $10^{19}$  eV, uma possível explicação para o achatamento do espectro é a sobreposição de uma população de partículas mais energéticas sobre uma população menos energética, i.e., um fluxo de partículas

<sup>1</sup> <<https://www.iap.kit.edu/kascade/english/index.php>>

<sup>2</sup> <<http://astro.vaporia.com/start/flyseye.html>>

extragalácticas começa a dominar sobre um fluxo galáctico [46]. Uma outra possível explicação é a interação de prótons extragalácticos com a radiação cósmica de microondas (*Cosmic Microwave Background* - CMB),  $p + \gamma \rightarrow e^- + e^+ + p$ , a 2,7 K [47]. Entretanto, a origem da região do *tornozelo* não é totalmente compreendida, e, portanto, é um assunto de fundamental importância para a pesquisa em raios cósmicos [48].

Se o fluxo de raios cósmicos a altas energias é de origem cosmológica, portanto, deveria haver uma supressão do espectro para energias a partir de  $5 \times 10^{19}$  eV previsto pelo corte GZK (devido ao nome dos pesquisadores que o propuseram, Greisen-Zatsepin-Kuzmin, nos anos 1960) [49, 50], resultante das interações inelásticas de prótons ultra energéticos com os fótons da CMB. O produto destas colisões será uma ressonância que irá decair em um próton de mais baixa energia e em um pión neutro com energia da ordem de 300 MeV [51].

## 2.2 Composição Química

A composição química dos raios cósmicos, em uma primeira aproximação, é bastante semelhante àquela do meio interestelar. Todos os elementos químicos presentes na tabela periódica estão presentes na composição dos raios cósmicos galácticos, sendo aproximadamente 87% de prótons, 12% de partículas alfas e apenas 1% de núcleos pesados. A composição química dos raios cósmicos, para energias até alguns TeV, pode ser estudada por meio de experimentos envolvendo balões estratosféricos [52] e satélites [53]. A Figura 2 mostra a abundância relativa de núcleos que compõem os raios cósmicos, com número atômico até 40, em comparação com a abundância relativa do sistema solar. Podemos observar uma similaridade entre as distribuições, implicando que a origem de sua composição é a nucleossíntese estelar<sup>3</sup>. Entretanto, há certos grupos de elementos que estão em maior abundância nos raios cósmicos, como Ti, Sc, B, Be, Li. A variação na abundância de tais elementos deve-se à interação dos raios cósmicos com a matéria galáctica devido ao processo de espalação<sup>4</sup>. Logo, esses elementos são conhecidos como elementos secundários na composição química dos raios cósmicos [51].

Outro ponto crucial é a diferença entre as abundâncias relativas de H e He, os quais são menos abundantes nos raios cósmicos do que no sistema solar. Esta discrepância pode ser explicada pela alta energia de ionização destes elementos. Entretanto, vale ressaltar que a composição química dos raios cósmicos varia com a energia do raio cósmico primário [54]. Esta variação torna-se um ponto importante na compreensão dos mecanismos de aceleração

<sup>3</sup> Processo de formação de elementos químicos mais pesados a partir de elementos mais leves dentro das estrelas, através de reações nucleares que ocorrem em seus núcleos ou camadas externas, dependendo da fase evolutiva da estrela.

<sup>4</sup> Reação nuclear natural que ocorre causando a nucleossíntese, que é o processo de criação de novos núcleos atômicos a partir dos núcleos pré-existentes (prótons e nêutrons) [51].

e propagação destas partículas. Assim, podemos concluir que a maior abundância de elementos que compõem os raios cósmitos são H, He, N, O, Ne, Mg, Si e Fe.

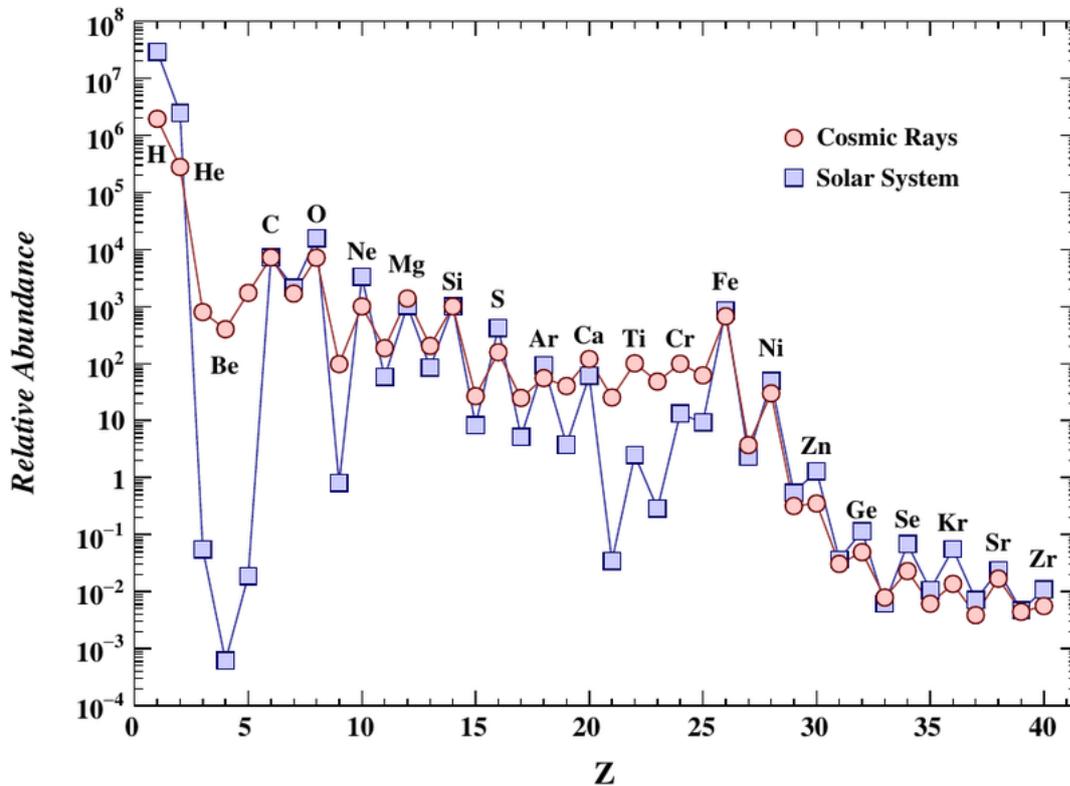


Figura 2 – Abundância elementar dos raios cósmitos em comparação com a composição do sistema solar. As abundâncias estão normalizadas em relação ao Si=103. Fonte: [55].

## 2.3 Fontes e Mecanismos de Aceleração

Existem duas perguntas fundamentais em relação à aceleração de raios cósmitos: quais são as fontes capazes de acelerá-los, e quais mecanismos de aceleração estão em ação. A partir de métodos indiretos, determinou-se o Sol como fonte emissora de raios cósmitos na faixa de energia até  $10^9$  eV [56], denominados de raios cósmitos solares. Para energias acima de  $10^9$  eV, devemos expandir a busca por tais fontes, e dentro da nossa galáxia podemos encontrá-las [51]. Os raios cósmitos de origem galáctica podem ser acelerados por remanescentes de supernova<sup>5</sup> devido a estes remanescentes apresentarem um campo magnético com alta intensidade [57], maior que o do meio interestelar. Acredita-se que partículas com o espectro de energia entre  $10^9$  eV e  $10^{16}$  eV são aceleradas pelos remanescentes de supernovas [58]. O mecanismo de aceleração destes raios cósmitos é a

<sup>5</sup> Remanescente de supernova é a estrutura que sobra após a explosão de uma estrela massiva em uma supernova. Ele é composto pelos detritos ejetados pela explosão, juntamente com a onda de choque que esses detritos geram ao se expandirem pelo espaço interestelar.

aceleração estatística, a qual é conhecida como mecanismo de aceleração de Fermi. Este mecanismo foi proposto por Enrico Fermi em 1949 [59], para tentar explicar como as partículas relativísticas ganham energia através de colisões com nuvens interestelares [60]. O ganho de energia ocorre após as partículas serem repetidamente espalhadas por nuvens interestelares. Estas nuvens atuam como espelhos magnéticos refletindo as partículas. A Figura 3 mostra uma ilustração esquemática do processo de aceleração difusa dos raios cósmicos.

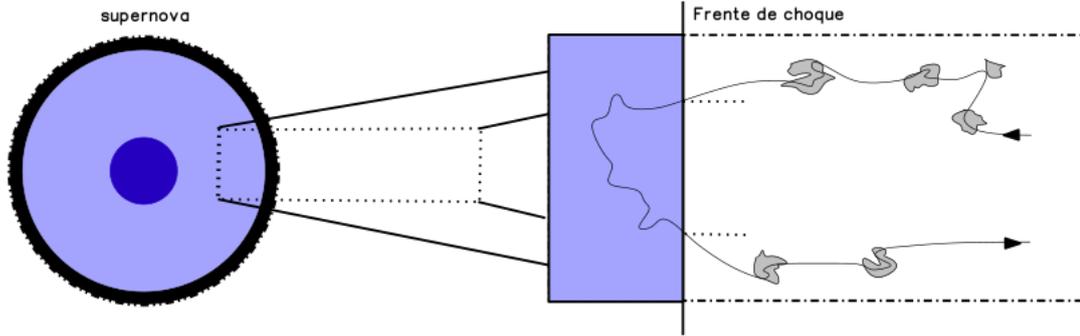


Figura 3 – Ilustração esquemática do processo de aceleração difusa dos raios cósmicos.  
Fonte: Autor.

O ganho de energia médio da partícula após uma colisão é [61]:

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{8}{3} \left( \frac{V}{c} \right)^2, \quad (2.1)$$

onde  $V$  é a velocidade da nuvem e a partícula se move com velocidade relativística,  $v \approx c$ . Este processo de aceleração é conhecido como o mecanismo de aceleração de Fermi de segunda ordem (vide Figura 4) visto que a energia depende da velocidade ao quadrado com que a nuvem magnetizada se move.

A partir da Equação 2.1, podemos derivar a taxa de energia calculando o tempo médio entre as colisões da partícula como:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3} \left( \frac{v^2}{cL} \right) E = \alpha E, \quad (2.2)$$

sendo  $L$  o caminho livre médio entre as nuvens [61]. Resolvendo a equação de perda difusa em estado estacionário e, levando em consideração essa taxa de energia, podemos determinar o espectro de energia  $N(E)$  como [61]:

$$N(E)dE = const. \times E^{-(1+1/\alpha\tau_{esc})} dE, \quad (2.3)$$

onde  $\tau_{esc}$  é o tempo característico para uma partícula permanecer na região de aceleração.

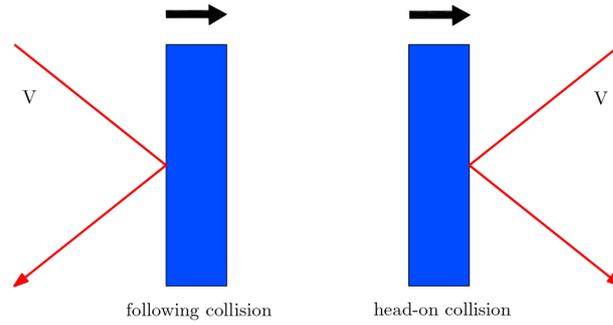


Figura 4 – Representação do mecanismo de aceleração de Fermi de segunda ordem. Fonte: Autor (adaptado de [63]).

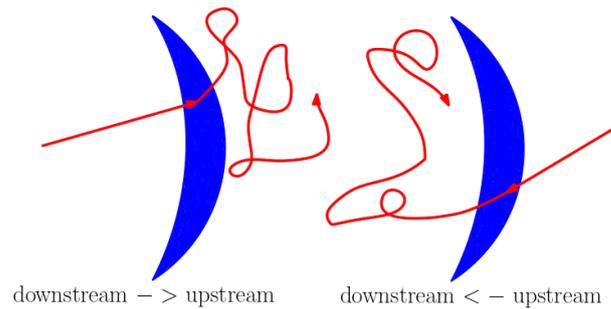


Figura 5 – Representação do mecanismo de aceleração de Fermi de primeira ordem. Fonte: Autor (adaptado de [63]).

Embora o mecanismo de Fermi de segunda ordem consiga explicar o espectro de energia descrito por uma lei de potência, ele é ineficiente para acelerar partículas carregadas a energias ultra altas. Além do mais, este mecanismo falha em explicar o índice espectral de 2,7 na lei de potência do espectro. Este índice é obtido através da incerteza na combinação de  $\alpha\tau_{esc}$  [60]. Assim, este modelo foi modificado em 1970 [62] com o objetivo de descrever os processos de aceleração de maneira mais eficiente, o qual é conhecido como mecanismo de aceleração de Fermi de primeira ordem.

Para o mecanismo de aceleração de Fermi de primeira ordem, o ganho médio de energia das partículas para cada colisão é linear em  $\frac{V}{c}$ , o que torna o processo de aceleração mais eficiente, principalmente para valores relativamente altos de  $V$  [61]. Quando a partícula altamente energética colide com uma frente de onda de cima para baixo ou debaixo para cima, há uma forte simetria devido à distribuição isotrópica de velocidades da partícula no sistema referencial onde a nuvem interestelar está em repouso em ambos os lados da onda de choque, como mostra a Figura 5.

O ganho médio de energia da partícula em ambas as formas de atravessar as ondas de choque é dado por:

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4}{3} \left( \frac{V}{c} \right). \quad (2.4)$$

A energia média da partícula após uma colisão é definida como  $E = \beta E_0$ , com  $\beta = \frac{V}{c}$  e  $E_0$  a energia inicial da partícula.

Considerando  $P_{esc}$  a probabilidade de que a partícula escape da região de aceleração após uma colisão e  $(1 - P_{esc})$  a probabilidade da partícula permanecer na região de aceleração [61]. Pela teoria cinética,

$$P_{esc} = \frac{4}{3} \left( \frac{v}{c} \right). \quad (2.5)$$

O espectro de energia pode ser obtido como,

$$N(E) = dE = const. \times E^{-1 + \frac{\ln P_{esc}}{\ln \beta}} dE. \quad (2.6)$$

Substituindo as Equações 2.4 e 2.5 na Equação 2.6 temos [61],

$$N(E)dE = const. \times E^{-2} dE. \quad (2.7)$$

O mecanismo de aceleração de Fermi de primeira ordem é bastante eficiente, visto que baseia-se na colisão de partículas carregadas com ondas de choque, as quais estão presentes em distintos ambientes astrofísicos. Embora o índice espectral obtido seja diferente do observado (2,7), ele é um valor numérico fixo e não uma expressão como no mecanismo de Fermi de segunda ordem.

As possíveis fontes no cenário astrofísico que envolve o mecanismo de primeira ordem são as explosões de raios gama (*Gamma-Ray Bursts* - GRBs)<sup>6</sup> [64], os núcleos ativos de galáxias (*Active Galactic Nuclei* - AGNs)<sup>7</sup> [65] e Pulsos Magnéticos em Estrelas de Nêutrons (Magnetares)<sup>8</sup> [66]. Ambas podem emitir partículas carregadas e até mesmo neutrinos com energias muito elevadas.

## 2.4 Propagação

O raio cósmico, ao sair da fonte astrofísica, deve atravessar o meio interestelar até chegar à Terra, caso a partícula seja produzida na nossa galáxia. Se a origem da mesma for extragaláctica, ela deve atravessar o meio interestelar da galáxia que a originou, o meio intergaláctico e o meio interestelar da nossa galáxia até atingir a Terra [51].

Quando falamos da propagação de raios cósmicos, levamos em consideração alguns processos físicos que ocorrem, como a difusão dessas partículas relativísticas com um coeficiente dado por [67]:

<sup>6</sup> São eventos cósmicos extremamente energéticos que emitem grandes quantidades de radiação na forma de raios gama em curtos períodos de tempo.

<sup>7</sup> São regiões extremamente luminosas no centro de algumas galáxias, alimentadas pela presença de um buraco negro supermassivo.

<sup>8</sup> Magnetares são um tipo especial de estrelas de nêutrons que possuem campos magnéticos extremamente intensos.

$$D = \frac{c\beta\gamma}{3}, \quad (2.8)$$

sendo  $D$  o coeficiente de difusão dos raios cósmitos,  $c$  a velocidade da luz,  $\beta = v/c$  relacionando  $v$  como a velocidade relativa da partícula e  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$  o fator de Lorentz. Outro fator é o processo de transporte das partículas carregadas, que chamamos de convecção dos raios cósmitos, o qual é responsável por mostrar como o fluxo dessas partículas varia à medida que elas se propagam no meio interestelar, o qual pode ser descrito como [67]:

$$\nabla \cdot \vec{u}N_i(E) \quad (2.9)$$

sendo  $\nabla$  representando o transporte de partículas devido ao seu movimento macroscópico no meio e  $\vec{u}N_i(E)$  a velocidade da partícula no meio interestelar. A Equação 2.9 representa o movimento da partícula no meio em que ela se encontra. A taxa de mudança na energia da partícula no processo de propagação,  $\frac{dE}{dt}$ , sofre processos na perda de energia e também de re-aceleração. No processo de perda de energia, consideramos  $\frac{dE}{dt}$  como negativo, e no processo de re-aceleração, como positivo.<sup>9</sup>  $b_i(E)$ , no geral, representa a variação da energia das partículas devido aos processos físicos de aceleração e re-aceleração, assim, temos que [67]:

$$b_i(E) = \frac{dE}{dt}. \quad (2.10)$$

Além disso, devemos levar em consideração a fonte  $Q_i(E, t)$  e as perdas dos núcleos por colisão ou até mesmo decaimento, ou seja [67]:

$$p_i N_i \quad (2.11)$$

representando perdas por colisões ou decaimentos dos núcleos:

$$p_i = \frac{v\rho\sigma_i}{m} + \frac{1}{\gamma\tau_i} = \frac{v\rho}{\lambda_i} + \frac{1}{\gamma\tau_i}, \quad (2.12)$$

sendo  $\rho$  a densidade do meio e  $v$  a velocidade da partícula. O termo  $\lambda_i = m/\rho\sigma_i$  representa o caminho livre médio da partícula e  $1/\gamma\tau_i$  o decaimento das partículas instáveis. Devemos ressaltar também que o termo referente à cascata dos raios cósmitos de alta energia é dado por [67]:

$$\frac{v\rho}{m} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(E, E')}{dE} n_k(E') dE'. \quad (2.13)$$

O somatório descreve a produção de partículas secundárias devido à interação de partículas, como partículas  $k$  podem gerar partículas  $i$ . O termo integrado  $d\sigma_{i,k}(E, E')/dE$

<sup>9</sup> O processo de re-aceleração ocorre principalmente quando os raios cósmitos estão sujeitos a campos magnéticos intensos, podendo ganhar energia enquanto o processo de aceleração relacionado a colisões das partículas.

representa a seção de choque diferencial indicando processos de transferência de energia de partículas do tipo  $k$  para  $i$  e  $n_k(E')$  densidade das partículas  $k$  com uma dada energia.

Podemos ter uma expressão única que descreva todos os processos relacionados à física de propagação dos raios cósmicos com todos os efeitos mencionados acima, conforme observado em [67]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} = & \nabla \cdot (D_i \nabla N_i) - \frac{\partial}{\partial E} [b_i(E) N_i(E)] - \nabla \cdot \vec{u} N_i(E) + \\ & + Q_i(E, t) - p_i N_i + \frac{v_p}{m} \sum_{K \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(E, E')}{dE} N_k(E') dE'. \end{aligned} \quad (2.14)$$

A equação 2.14 contém todos os processos responsáveis pela propagação dos raios cósmicos como: difusão, ganho e perda de energia, convecção, fontes iniciais, as perdas por colisões e a cascata intranuclear das partículas que são geradas.

## 2.5 Detecção

Para fluxos de raios cósmicos com energia abaixo de  $10^{14}$  eV, medidas diretas são aplicáveis com detectores operando a níveis elevados da atmosfera. Porém, para energias maiores, o fluxo de partículas é menor, sendo necessárias medições indiretas através das propriedades do Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE). Esta técnica de medição permite a utilização de grandes detectores, operando no solo, para uma melhor aquisição dos dados estatísticos, referentes aos fluxos em altas energias. Atualmente, um dos maiores observatórios responsáveis pela aquisição desses dados é o observatório Pierre Auger, localizado no oeste da Argentina<sup>10</sup>.

Neste trabalho foram utilizados fluxos de raios cósmicos de diferentes composições químicas obtidos por diferentes missões espaciais (AMS-02<sup>11</sup>, CALET<sup>12</sup>, Fermi-LAT<sup>13</sup>, CREAM<sup>14</sup>, PAMELA, TRACER<sup>15</sup>, DAMPE<sup>16</sup> e BESS-Polar II), que estão presentes no Cosmic Ray Data base [68]. Estes dados foram utilizados como entrada na simulação via Geant4 (*for GEometry ANd Tracking 4*)<sup>17</sup>, o qual é um kit de ferramentas que permite simular detectores e meios onde partículas podem interagir. Os espectros de raios cósmicos utilizados na simulação são mostrados na Figura 6. Uma breve descrição das missões espaciais utilizadas neste projeto é feita abaixo.

<sup>10</sup> <<https://www.auger.org/>>

<sup>11</sup> <<https://ams02.space>>

<sup>12</sup> <<https://calet.phys.lsu.edu>>

<sup>13</sup> <<https://fermi.gsfc.nasa.gov>>

<sup>14</sup> <<https://cosmicray.umd.edu>>

<sup>15</sup> <<https://stratocat.com.ar>>

<sup>16</sup> <<https://dpnc.unige.ch>>

<sup>17</sup> <<https://geant4.web.cern.ch/>>

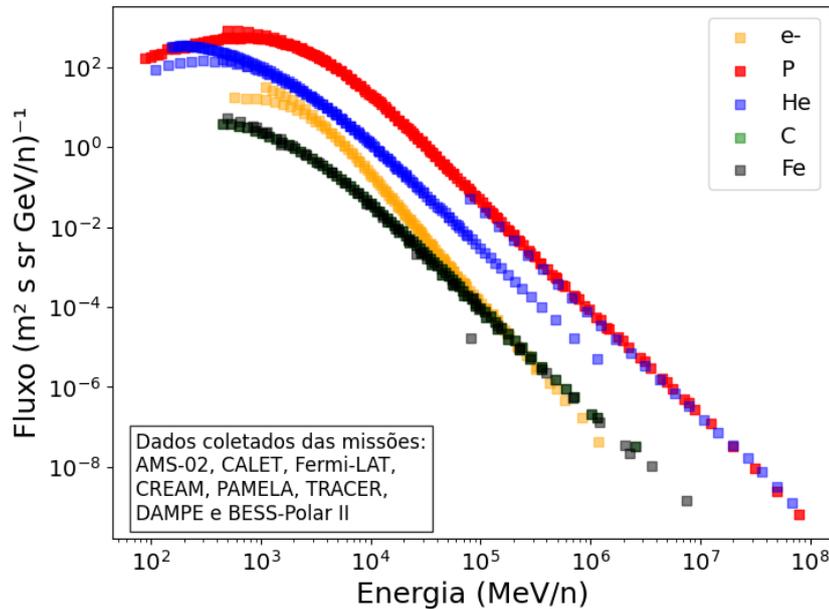


Figura 6 – Espectro de raios cósmicos primários coletados de diferente missões espaciais. Fonte: Autor.

O Experimento AMS-02 (*Alpha Magnetic Spectrometer*), ativo desde 2011, foi projetado para estudar raios cósmicos de alta energia no espaço. O objetivo principal do AMS-02 é entender a composição e o comportamento dos raios cósmicos, buscar evidências de matéria escura e tentar identificar antimatéria primordial no universo. Este experimento auxilia nos estudos sobre a formação do universo, busca pela evidência de matéria escura assim como investigação da antimatéria. Ele se destacou por coletar os primeiros dados de anti-Hélio, antes nunca detectados [69]. Dados de medidas de elétrons, prótons e núcleos de He, C e Fe coletados pelo experimento AMS-02 [68] foram utilizados neste trabalho. O experimento segue em operação e continua gerando dados valiosos para a astrofísica e a física de partículas.

O experimento CALET (*Calorimetric Electron Telescope*) é um telescópio espacial projetado para investigar partículas de alta energia no espaço, como elétrons, prótons e núcleos de raios cósmicos [70]. Foi lançado em agosto de 2015 e tem como principal objetivo estudar a origem, aceleração e propagação de raios cósmicos no universo, além de procurar sinais indiretos de matéria escura e fenômenos astrofísicos extremos. O experimento mede com alta precisão fluxos de elétrons e pósitrons em energias entre 1 GeV e 20 TeV [71], que ajudam a identificar fontes astrofísicas, como pulsares ou explosões de supernova, que podem produzir partículas energéticas na busca por matéria escura. Ele analisa a abundância de elementos nos raios cósmicos, desde o hidrogênio [72] até o ferro [73] ( $Z = 1$  a 40), para entender melhor os processos de aceleração e transporte no espaço interestelar. Além do mais, também detecta raios gama de alta energia [74], permitindo observar eventos

como explosões de raios gama [75] e emissões de outras fontes exóticas. Dados de medidas de prótons e núcleos de C e Fe coletados pelo CALET [68] foram utilizados neste trabalho.

O Fermi é um telescópio espacial da NASA de raios gama designado a explorar a energia do universo. Ele foi lançado em junho de 2008 e revolucionou a astrofísica de altas energias, permitindo a observação de eventos e objetos extremos, como pulsares, buracos negros, explosões de raios gama e interações de partículas de alta energia. Os objetivos científicos do Fermi são identificar e mapear objetos emissores de raios gama, buscar por sinais indiretos de aniquilação ou decaimento de partículas de matéria escura [76], especialmente na emissão de raios gama no centro da Via Láctea e investigar fenômenos como aceleração de partículas em jatos relativísticos [77] e emissões de buracos negros supermassivos. O LAT (*Large Area Telescope*) é seu principal instrumento e foi projetado para detectar raios gama em energias de 20 MeV a mais de 300 GeV. Outro componente do satélite Fermi é o GBM (*Gamma-ray Burst Monitor*) que detecta explosões de raios gama em energias mais baixas, entre 8 keV e 40 MeV. Ativo desde 2008, o Fermi-LAT contribuiu com medidas do espectro de energia de elétrons e pósitrons na faixa de energia entre 7 GeV e 2 TeV [78].

O CREAM (*Cosmic Ray Energetics and Mass*) é um experimento para determinar a composição química dos raios cósmicos até a região do joelho ( $\sim 10^{15}$  eV) do espectro de energia [79], que está associado a limitações nos mecanismos de aceleração ou propagação. Esta região do espectro pode ser explicada pela aceleração de partículas por supernova de acordo com o mecanismo de aceleração de Fermi [80]. Observações do CREAM sugeriram que a mudança na inclinação do espectro de energia dos raios cósmicos acima de 1 PeV pode estar relacionada à perda de confinamento de partículas em campos magnéticos galácticos. Outros objetivos científicos do CREAM são analisar como os raios cósmicos interagem com o meio interestelar ao longo de seu percurso, incluindo efeitos de espalhamento e perda de energia e, determinar as abundâncias relativas de elementos leves (como hidrogênio) até elementos mais pesados (como ferro) em energias acima de 1 TeV por núcleo. Entre 2004 e 2016, o CREAM foi transportado por balões estratosféricos em missões na Antártica [81]. Essas missões coletaram dados importantes sobre partículas de raios cósmicos em altitudes de cerca de 40 km. Uma versão modificada foi enviada para a ISS (*International Space Station*) em 2017 [82] para fornecer medições contínuas e de longa duração em um ambiente livre de distúrbios atmosféricos. Os dados que obtemos para este trabalho são referentes a núcleos de Fe [68].

PAMELA (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) foi um experimento espacial lançado em junho de 2006 a bordo do satélite russo Resurs-DK1. Foi o primeiro experimento em satélite dedicado à detecção de raios cósmicos, com foco em identificar antimatéria (como pósitrons e antiprótons) e medir a composição de núcleos leves. Foi uma missão espacial que durou entre os anos de 2006 e 2016. Dentre

seus 10 anos de operação, mediu os espectros de antiprótons até 200 GeV, pósitrons até 200 GeV, elétrons até 600 GeV e prótons e núcleos de hélio numa faixa de energia entre 1.2 e 0.6 TeV/n [83]. O PAMELA observou um excesso inesperado de pósitrons de alta energia em relação aos elétrons nos raios cósmicos, o que pode estar relacionado à aniquilação de partículas de matéria escura [84] ou a fontes astrofísicas como pulsares [85]. Além do mais, dados sobre núcleos de hidrogênio e hélio ajudaram a refinar modelos de propagação de raios cósmicos no meio interestelar [86]. A missão PAMELA trouxe como contribuição para este trabalho dados dos raios cósmicos primários de elétrons, prótons, núcleos de He e Fe [68].

O TRACER (*Transition Radiation Array for Cosmic Energetic Radiation*) foi um experimento em balão construído e projetado na Universidade de Chicago para medir raios cósmicos de alta energia, focando em partículas carregadas pesadas (como carbono, oxigênio e ferro) em uma faixa ampla de energias, que vai de 1 GeV/nucleon a mais de 10 TeV/nucleon [87]. Seu principal objetivo é investigar a composição e a propagação dos raios cósmicos galácticos para entender melhor sua origem e os processos de aceleração [88]. O TRACER foi transportado em missões de balão de longa duração, principalmente na Antártica e na Suécia, onde operou em altitudes de cerca de 40 km. Essas missões ofereceram condições ideais para evitar os efeitos da atmosfera terrestre na detecção de raios cósmicos. A missão de maior destaque ocorreu na Antártica em 2003, coletando dados por 24 dias contínuos. Dados adicionais foram obtidos em missões subsequentes. O TRACER mediu com alta precisão o espectro energético de núcleos como O, Ne, Si e Fe em energias extremas, contribuindo para a compreensão dos processos de aceleração. Além do mais, as observações confirmaram que o fluxo de núcleos diminui com o aumento da energia, mas com variações dependentes do elemento, sugerindo diferentes processos ou ambientes de aceleração. Neste trabalho, foi utilizado o espectro de energia para núcleo de Fe medido entre 2003 e 2006 [68].

O satélite DAMPE (*Dark Matter Particle Explorer*), também conhecido como Wukong (referência ao Rei Macaco da mitologia chinesa), é um satélite científico lançado em dezembro de 2015 pela China. Foi projetado para estudar partículas de alta energia no cosmos, com foco na detecção indireta de sinais de matéria escura e na análise detalhada dos raios cósmicos e raios gama [89]. Os objetivos científicos do DAMPE [90] consistem na detecção de sinais de aniquilação ou decaimento de partículas de matéria escura, como a emissão de pósitrons e fótons em energias características, investigação da composição e o espectro de partículas carregadas (prótons, núcleos, elétrons e pósitrons) em energias de até 100 TeV, mapeamento de fontes astrofísicas de raios gama de alta energia, como pulsares, remanescentes de supernova e núcleos ativos de galáxias e, análise das quebras espectrais em raios cósmicos, como a região do *joelho* no espectro de energia, para entender os mecanismos de aceleração e propagação. Neste trabalho foram utilizados dados de prótons e núcleos de He coletados pelo DAMPE [68].

Por fim, a missão BESS-Polar II (*Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer Polar II*) foi lançada durante a campanha de balonismo polar na Antártica no final de 2007, após o sucesso de sua antecessora, BESS-Polar I, em 2004. A missão tem como objetivos científicos [91] a busca por sinais de núcleos de anti-hélio, cuja detecção indicaria a presença de antimatéria em larga escala no universo, fornecendo informações sobre a formação do cosmos e a assimetria matéria-antimatéria; medição dos fluxos de partículas carregadas, como prótons, antiprótons, elétrons e pósitrons, para melhorar os modelos de propagação no meio interestelar; a investigação do espectro de antiprótons nos raios cósmicos, o que pode fornecer pistas sobre a aniquilação de matéria escura ou sobre processos de aceleração em fontes astrofísicas; o estudo de partículas secundárias geradas por interações de raios cósmicos com o meio interestelar, contribuindo para compreender melhor sua composição e origem [92]. Os resultados e as tecnologias desenvolvidas para o BESS-Polar II têm impacto direto em experimentos subsequentes, como o AMS-02 e o DAMPE. Desta missão, utilizamos os dados de raios cósmicos de núcleos de He [68].



## 3 Nuvens Moleculares

Nuvens Moleculares são extensas regiões no espaço onde gases frios e densos se aglomeram devido à influência da gravidade, funcionando como locais propícios para o nascimento de uma protoestrela<sup>1</sup> [93]. Esses objetos interestelares são compostos por grãos de poeira formados por carbono (C) e gás de hidrogênio ionizado (H<sub>2</sub>). Embora tenham uma estrutura bastante complexa e sejam difíceis de serem detectadas, por serem moléculas homonucleares<sup>2</sup>, a composição gasosa é a mais abundante na nuvem molecular, representando mais de 99% de toda a sua estrutura, enquanto os grãos de poeira compõem menos de 1% [10].

### 3.1 Composição Química de Nuvens Moleculares

As nuvens moleculares são nuvens de gás e poeira cujas condições físico-químicas permitem a formação de moléculas. Nas regiões mais quentes das nuvens moleculares, a temperatura varia em torno de 100 a 300 K [94], facilitando a formação de moléculas no interior das nuvens. Nas regiões mais frias, é comum, nas nuvens moleculares densas, ocorrer a excitação de moléculas em torno de  $T \sim 3$  K [95].

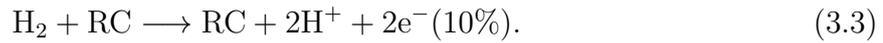
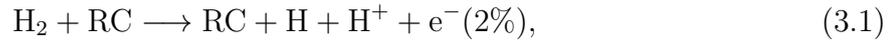
Em geral, as nuvens moleculares apresentam uma cor azulada devido à dispersão da luz pelas moléculas e átomos, mas também podem ter uma cor avermelhada devido ao espalhamento da radiação por grãos de poeira [96]. Existe uma diversidade de moléculas presentes em nuvens moleculares que podem conter: hidretos, óxidos simples, sulfetos, derivados de acetileno, aldeídos, álcoois, éteres, moléculas cíclicas e radicais [97].

Moléculas que podemos usar para investigar as nuvens moleculares vão das mais simples que são as moléculas diatômicas como CO, CN e OH até as mais complexas estruturas como CH<sub>3</sub> e CH<sub>2</sub> [98, 99]. Essas moléculas são detectadas a partir de suas linhas espectrais que são geradas em processos de transições entre os níveis eletrônicos. Sua detecção, então, pode ser obtida pela faixa do infravermelho, micro-ondas ou até mesmo rádio [94].

Moléculas interestelares são formadas em nuvens moleculares, e o agente ionizante nestas nuvens são os raios cósmicos (RCs) [94]. Os processos físico-químicos nas nuvens ocorrem geralmente pela presença do hidrogênio ionizado que é capaz de desencadear reações que sintetizam uma grande parte das espécies moleculares observadas. Os processos ionizantes mais comuns que observamos nas nuvens são [100]:

<sup>1</sup> Protoestrela é um protótipo de estrela, ou seja, um objeto candidato que se tornará estrela caso sua massa seja grande o suficiente.

<sup>2</sup> Moléculas formadas por átomos do mesmo elemento químico.



Os íons têm um papel importante na química entre os íons e moléculas nas nuvens, auxiliando na estabilidade contra o colapso gravitacional [11]. Além disso, as partículas de poeira presentes nas nuvens moleculares funcionam como catalisadores importantes, podendo agregar mantos de grãos de gelo com acreção e reação de átomos e moléculas de gás [11, 101] e funcionam também como “protetoras” das moléculas contra a radiação que poderia destruí-las [98] que são constituídas principalmente por carbono. Os grãos de poeira também contêm “gelo sujo”, que é uma mistura de água contaminada com traços de amônia e metano [98].

## 3.2 Temperatura das Nuvens Moleculares

Raios cósmicos, como mostramos, são os principais agentes ionizantes em nuvens moleculares. Além disso, estas partículas carregadas são responsáveis pelo aquecimento de grãos de poeira nas nuvens [10]. Colisões entre grãos e raios cósmicos compostos por núcleos mais pesados, como núcleos de C e Fe, a energias até 100 MeV podem elevar a temperatura das nuvens moleculares para entre 50 e 200 K, evaporando algumas espécies de gelos mais simples [11].

A temperatura das nuvens moleculares é baixa e pode chegar a cerca de 10 graus acima do zero absoluto [102]. Embora saber a temperatura das nuvens moleculares não seja uma tarefa simples, ela pode variar de acordo com o tamanho e a densidade das nuvens.

Estudos [11] mostram que raios cósmicos compostos por núcleos de Fe e C, com energia entre 10 – 100 MeV e um fluxo da ordem de  $10^{-4}$  partículas/cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>sr<sup>-1</sup>, podem atingir grãos de poeira pelo menos uma vez, aquecendo regiões locais em nuvens moleculares. A escala de tempo para um raio cósmico atingir um grão de raio  $a$  é dada por [11]:

$$\tau_{\text{RC}} = 8 \times 10^4 \left( \frac{1000 \text{ \AA}}{a} \right)^2 \text{ anos.} \quad (3.4)$$

Para um núcleo de Fe com energia de aproximadamente 100 MeV, o depósito de energia nos grãos de poeira é dado por [11]:

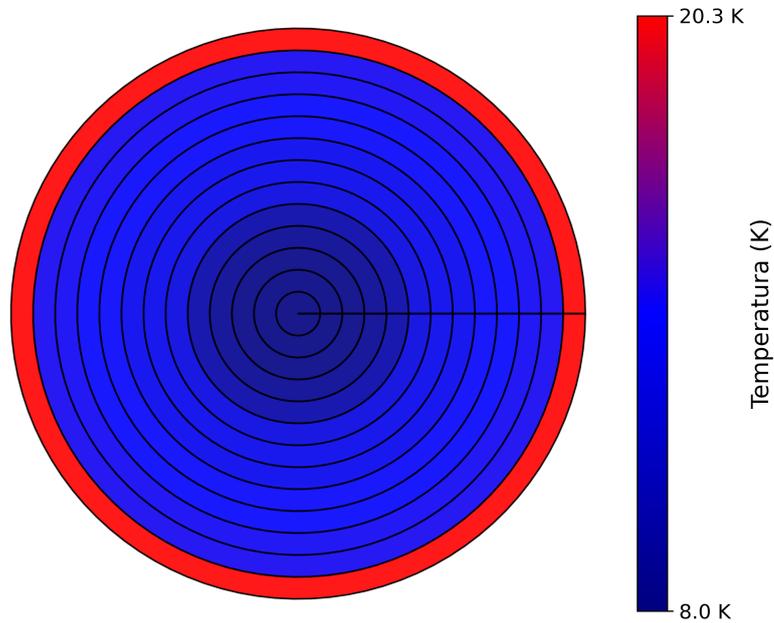


Figura 7 – Temperatura do gás em diferentes camadas de uma nuvem molecular. Fonte: Autor.

$$\Delta E = 5 \times 10^4 \left( \frac{a}{1 \mu\text{m}} \right) \text{ eV}, \quad (3.5)$$

podendo aquecer esses grãos de poeira a temperaturas na faixa de 35 K. Aquecê-los a essa temperatura seria o suficiente para sublimar mantos de gelo de quantidades muito pequenas dos elementos como CO, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.

Em nuvens moleculares, a temperatura pode depender de diversos fatores, o que sabemos é que as nuvens são regiões frias e sua temperatura está associada à interação do gás e poeira com raios cósmicos [10]. Segundo [10], para uma nuvem molecular típica, a temperatura pode variar entre aproximadamente 6 K - 20 K nas diferentes camadas da nuvem (veja as Figuras 7 e 8).

### 3.3 Massa das Nuvens Moleculares

O hidrogênio ionizado é a molécula mais abundante nas nuvens, mas não é um bom traçador para estimar sua massa. Para determinar a massa de uma nuvem molecular,

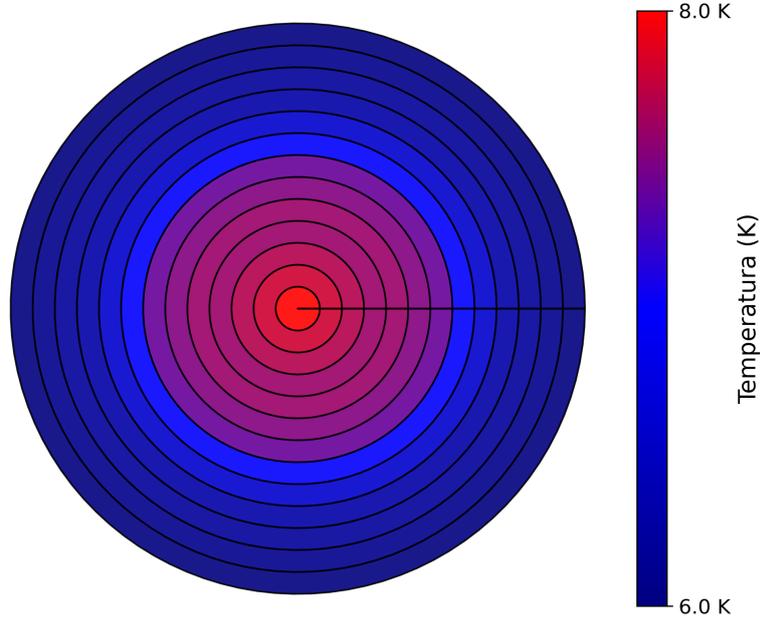


Figura 8 – Temperatura dos grãos de poeira em diferentes camadas de uma nuvem molecular. Fonte: Autor.

podemos investigar outras moléculas como o CO, mesmo sendo um milhão de vezes menos abundante que H<sub>2</sub> [98].<sup>3</sup>

A densidade colunar é a medida da quantidade de material que é possível observar e pode ser usada para descrever a densidade de massa de um determinado meio interestelar, como as nuvens moleculares. A densidade colunar de CO pode ser determinada como [11]

$$N_{\text{CO}} = 7.5 \times 10^{14} \left( \frac{T_B \Delta v}{\text{K km s}^{-1}} \right) \text{cm}^{-2}, \quad (3.6)$$

onde  $T_B$  é a temperatura de brilho e  $\Delta v$  é a largura à meia altura da linha de transição.

Como o hidrogênio ionizado é mais abundante que o CO, podemos usar o valor médio da razão entre as abundâncias dessas moléculas para estimar a densidade colunar de H<sub>2</sub>, obtendo a razão:

$$^{12}\text{C}^{18}\text{O}/\text{H}_2 \approx 1.7 \times 10^{-7}. \quad (3.7)$$

<sup>3</sup> Poderíamos usar outras moléculas como HCN, HN<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O entre outras presentes nas nuvens.

Assim, a densidade colunar de  $H_2$  é dada por:

$$N(H_2) = 4.4 \times 10^{21} \left( \frac{T_B \Delta v}{K \text{ km s}^{-1}} \right) \text{ cm}^{-2} \quad (3.8)$$

e a massa da nuvem molecular é obtida por meio de:

$$M = \mu m_H \int_{\Omega} N_H d\Omega, \quad (3.9)$$

sendo  $N_H$  a densidade colunar de hidrogênio em diferentes pontos da nuvem quando integrada,  $\Omega$  a área sólida projetada na nuvem e  $\mu$  representa o peso molecular médio e  $m_H$  a massa do átomo de hidrogênio. Essa relação da Equação. 3.8 mostra que, se soubermos a densidade colunar  $H_2$ , é possível calcular a massa da nuvem molecular.

### 3.4 Efeitos da Ionização do Gás em Nuvens Moleculares

O grau de ionização em nuvens moleculares depende da taxa de ionização por raios cósmicos  $\xi_{CR}$  e da taxa de neutralização  $K_N$ . Os raios cósmicos ionizam átomos e moléculas, gerando íons que, por sua vez, podem reagir quimicamente ou ser neutralizados ao recombinar-se com elétrons. Essa interação é fundamental para manter o equilíbrio ionização-neutralização nas regiões densas de nuvens moleculares. A expressão para o grau de ionização da nuvem molecular é dada por [103]:

$$\chi = \left( \frac{\xi_{CR}}{K_N n} \right)^{1/2}, \quad (3.10)$$

onde  $n$  é a densidade numérica total de partículas.

Através da Equação 3.10 é possível observar que a interação de raios cósmicos com nuvens moleculares de alta densidade resulta em um baixo grau de ionização. Isso reflete diretamente no campo magnético das nuvens, devido às consequências diretas no processo de difusão ambipolar<sup>4</sup> e estabilidade dos núcleos que compõem as nuvens [11].

O meio interestelar tem uma densidade média de cerca de  $\sim 10^{-24} \text{ g/cm}^3$ . Em nuvens moleculares, a densidade varia de acordo com os processos dinâmicos, como as frentes de ondas de choque provocadas por supernovas e seu campo magnético [104]. Em média, essas nuvens possuem uma densidade que pode variar entre  $10^{-22} \text{ g/cm}^3$  e  $10^{-15} \text{ g/cm}^3$  [10].

Vale ressaltar que a densidade das nuvens moleculares influencia na formação estelar e também na composição química das nuvens [11], embora a densidade seja extremamente baixa comparada a outros objetos astrofísicos.

<sup>4</sup> Em astrofísica, difusão ambipolar refere-se ao desacoplamento de partículas neutras de plasma na fase inicial de formação de estrelas.



## 4 Astrofísica Multi-mensageira

A astrofísica multi-mensageira é um campo da astrofísica que combina informações provenientes de diferentes tipos de “mensageiros” astrofísicos, como ondas gravitacionais (ondulações no tecido do espaço-tempo), ondas eletromagnéticas (luz em todas as suas formas, desde rádio até raios gama), raios cósmicos e neutrinos<sup>1</sup>, para estudar fenômenos do universo. Processos astrofísicos antes inacessíveis, como as ondas gravitacionais [105], hoje têm sido estudados com mais detalhes [106, 107].

Além das ondas gravitacionais, a astrofísica multi-mensageira tem obtido informações valiosas ao considerar que o fluxo de raios gama e neutrinos está diretamente conectado ao assumir que os mesmos são produzidos pela mesma cadeia de produção foto-hadrônica [108]. Os neutrinos são partículas não carregadas, assim como os raios gama, e, portanto, não são afetados por campos magnéticos. Isto faz com que muita da informação sobre suas origens seja preservada nas suas viagens até os detectores na Terra. Como os neutrinos só podem ser gerados por meio de interações hadrônicas, sua detecção pode nos ajudar a obter informações mais precisas sobre a composição, fontes aceleradoras e energia dos raios cósmicos [105].

Acredita-se que os aceleradores de raios cósmicos com energia abaixo de  $10^{15}$  eV (PeV) estão localizados dentro da galáxia. Identificar os aceleradores de raios cósmicos até energias da ordem de PeV (chamados de PeVatrons) é fundamental para compreender a origem dos raios cósmicos na galáxia. Em particular, remanescentes de supernova têm sido considerados potenciais fontes galácticas de raios cósmicos [109]. A detecção dos produtos de decaimento de píons fornece evidências diretas de que prótons podem ser acelerados em remanescentes de supernova [110]. Contudo, o espectro de energia de raios gama altamente energéticos ( $E \geq 0,1$  TeV) de mais de dez jovens remanescentes de supernova contém quebras em energias abaixo de 10 TeV. Isto levantou dúvidas sobre a habilidade de remanescentes de supernovas operarem como PeVatrons [111]. Outros possíveis candidatos para PeVatrons hadrônicos incluem o centro galáctico [112], aglomerados de estrelas massivas jovens [111], dentre outras. Em suma, são necessárias mais observações para identificar PeVatrons hadrônicos.

O Observatório LHASSO (*Large High Altitude Air Shower Observatory*)<sup>2</sup>, localizado a 4410 m acima do nível do mar em Sichuan na província da China, detectou uma fonte de raios gama ultra energéticos (20 - 200 TeV), LHASSO J2108+5157 [113]. A posição da emissão de raios gama está correlacionada com uma nuvem molecular gigante, o que favorece a origem hadrônica. A fonte LHASSO J2108+5157 está localizada próxima

<sup>1</sup> Os neutrinos são partículas subatômicas de pouca massa e com interação extremamente fraca.

<sup>2</sup> <<http://english.ihep.cas.cn/lhaaso>>

ao centro da nuvem molecular [MML2017]4607 [114]. A emissão de raios gama ultra energéticos pode ser produzida pela colisão de prótons acelerados até energias da ordem de PeV com o gás denso do ambiente, i.e., os raios gama observados podem ser atribuídos ao decaimento do méson  $\pi^0$  produzido nas colisões inelásticas entre prótons acelerados e o gás na [MML2017]4607 [113].

## 4.1 Nuvens Moleculares como Fontes Multi-mensageiras

Nuvens moleculares na vizinhança de aceleradores de raios cósmicos são alvos densos para interações de raios cósmicos, gerando emissão de raios gama e neutrinos, o que possibilita a identificação de fontes de raios cósmicos [115, 116, 117].

O plano da nossa galáxia é uma fonte plausível de neutrinos. Recentemente, a colaboração do Observatório IceCube<sup>3</sup> descobriu um sinal de neutrino com uma significância de  $4,5\sigma$  vindo do plano galáctico utilizando 10 anos de observação (2011-2021) [118]. O espectro de raios gama observado no centro do plano galáctico exhibe uma inclinação mais dura quando comparado ao derivado do espectro de raios cósmicos observado na Terra [119]. Entretanto, para neutrinos, a situação não é muito bem compreendida. A origem deste fluxo de neutrinos pode ser proveniente do decaimento de píons secundários, produzidos na interação de raios cósmicos com o gás interestelar [120, 121, 122, 123] ou nas interações de raios cósmicos galácticos na vizinhança de seus aceleradores na nossa galáxia [122, 123, 124, 125, 126]. Em ambos os casos, a emissão de neutrinos é acompanhada por raios gama produzidos no processo de decaimento de píons neutros [120, 127].

A detecção de neutrinos no plano galáctico é fundamental para compreender a origem dos raios cósmicos galácticos e a natureza de suas fontes. As observações do fluxo de neutrinos nos ajudam a investigar o transporte de raios cósmicos na nossa galáxia e suas interações com o gás que permeia o meio interestelar, campos de radiação e campos magnéticos [128, 129, 130].

A dificuldade em determinar a origem do fluxo de neutrinos vindos da nossa galáxia é devido a ambiguidade na possível origem dos raios cósmicos que produzem estes neutrinos. Por um lado, a interação de raios cósmicos galácticos com gás e elementos de poeira interestelar produz principalmente emissões difusas. Por outro lado, raios cósmicos recém-acelerados de suas fontes interagem com o material denso aos redores, contribuindo também com o fluxo de neutrinos. Após os resultados obtidos por instrumentos de raios gama no regime de muito alta e ultra alta energia, as fontes mais plausíveis de raios cósmicos galácticos acelerados são [111, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140]: remanescentes de supernova, aglomerados estelares jovens e massivos, jovens estrelas massivas, microquasares e também nebulosas de vento de pulsar, etc. Em suma, regiões

---

<sup>3</sup> <<https://icecube.wisc.edu>>

galácticas de gás denso, provavelmente irradiadas por raios cósmicos galácticos, são fundamentais para compreender a origem dos fluxos de raios gama e neutrinos [141].

Emissões de raios gama de nuvens moleculares galácticas têm sido usadas para sondar o espectro de raios cósmicos em vários locais da nossa galáxia [142]. A importância de populações de nuvens moleculares galácticas para a emissão difusa de raios gama e neutrinos também é apoiada pelo fato de que nuvens moleculares individuais podem produzir raios gama secundários via colisões inelásticas próton-próton [143, 144, 145]. Portanto, conectar informações sobre neutrinos e raios gama nos permite investigar a origem da emissão de neutrinos em conexão com o espectro de raios cósmicos [146, 147, 148].

## 4.2 Interações Hadrônicas em Nuvens Moleculares

Uma assinatura direta que temos acerca da presença de prótons acelerados em ambientes astrofísicos como nuvens moleculares é fornecida pela presença de raios gama e neutrinos. Esses multi-mensageiros são gerados devido ao decaimento de píons carregados e neutrinos [149], respectivamente. Esses mésons são produzidos em colisões próton-próton via:

$$p + p \longrightarrow \pi^\pm, \pi^0, K^\pm, K^0, p, n, \dots, \quad (4.1)$$

no qual (...) representa a presença de mésons e bárions de maior massa.

Outro processo nesses ambientes astrofísicos que produz mésons secundários ocorre quando prótons de alta energia acabam interagindo com fótons de baixa energia nas mediações das fontes. Conhecido como fótoprodução, bem semelhante a interação de raios cósmicos compostos por prótons interagindo com fótons da CMB [149].

Fótons ambientes são partículas de luz que estão presentes em uma grande quantidade ao redor de fontes astrofísicas como buracos negros, estrelas de nêutrons e supernovas. Esses fótons podem ter diferentes energias, podendo ser de rádio, infravermelho, visível e até mesmo ultravioleta, os quais são gerados principalmente por elétrons acelerados movendo-se nas regiões com campos magnéticos intensos.

Assim, quando os prótons de alta energia, acelerados em regiões próximas a essas fontes, colidem com os fótons ambientes (reações de fótoprodução) e geram partículas do tipo píons através da ressonância  $\Delta^+$ , que se desintegra rapidamente e gera píons neutros e prótons, ou píons carregados e nêutrons:

$$p + \gamma_A \longrightarrow \Delta^+ \longrightarrow \pi^0 + p \quad (4.2)$$

ou,

$$p + \gamma_A \longrightarrow \Delta^+ \longrightarrow \pi^+ + n, \quad (4.3)$$

onde  $\gamma_A$  refere-se aos fótons do ambiente [149].

Os píons carregados possuem uma meia-vida de  $\sim 2.6 \times 10^{-8}$  s, e portanto, decaem em:

$$\pi^+(\pi^-) \longrightarrow \mu^+(\mu^-) + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu), \quad (4.4)$$

enquanto os múons decaem via:

$$\mu^+(\mu^-) \longrightarrow e^+(e^-) + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu). \quad (4.5)$$

Os píons neutros, também observados em nuvens moleculares, possuem uma meia-vida de  $\sim 8.4 \times 10^{-17}$  s e decaem em dois fótons:

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma. \quad (4.6)$$

As nuvens moleculares são como materiais-alvo que podem indicar os remanescentes de supernova como potenciais candidatos a fontes emissoras de neutrinos, conforme mostrado em [150]. A Figura 9 mostra uma representação esquemática da interação de raios cósmicos com a estrutura de uma nuvem molecular hipotética produzindo partículas secundárias como raios gama e neutrinos (vide Figura 10 para mais detalhes sobre a cascata de partículas produzidas na nuvem molecular).

Os neutrinos também são observados a partir do decaimento de partículas secundárias no interior de nuvens moleculares. Isso significa que o fluxo de neutrinos pode ser descrito em função de três parâmetros: a energia do próprio neutrino, a posição da nuvem molecular e o tempo [150]. Ou seja,

$$\phi(E_\nu, R', t') = c \cdot n \cdot \int_{E_\nu}^{\infty} \sigma_{\text{inel}}(E_p) J_p(E_p, R', t') F_\nu \left( \frac{E_\nu}{E_p}, E_p \right) \frac{dE_p}{E_p}, \quad (4.7)$$

onde:  $c$  é a velocidade da luz,  $n$  é a densidade de prótons presentes na nuvem molecular,  $\sigma_{\text{inel}}(E_p)$  é a seção de choque,  $J_p(E_p, R', t')$  é a densidade de corrente de prótons,  $F_\nu \left( \frac{E_\nu}{E_p}, E_p \right)$  é o espectro de energia dos neutrinos, e  $\frac{dE_p}{E_p}$  é o elemento de volume integrado no espaço que varre todas as energias de prótons até infinito [150].

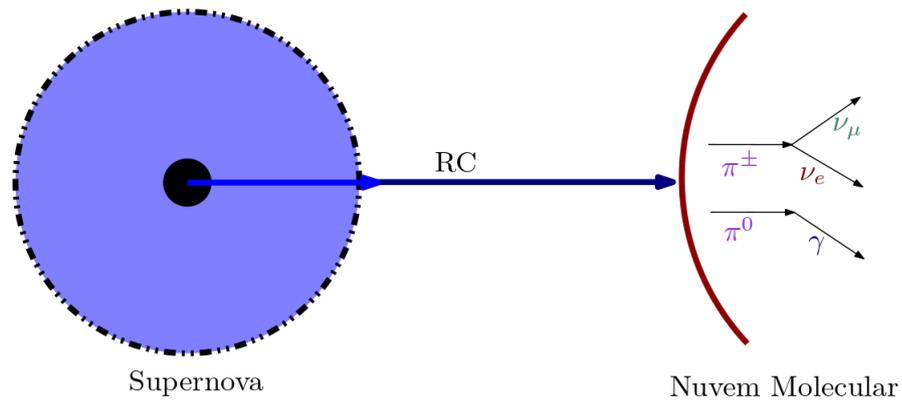


Figura 9 – Produção de neutrinos e raios gama em uma nuvem molecular hipotética através de raios cósmicos provenientes de remanescentes de supernova. Fonte: Autor.

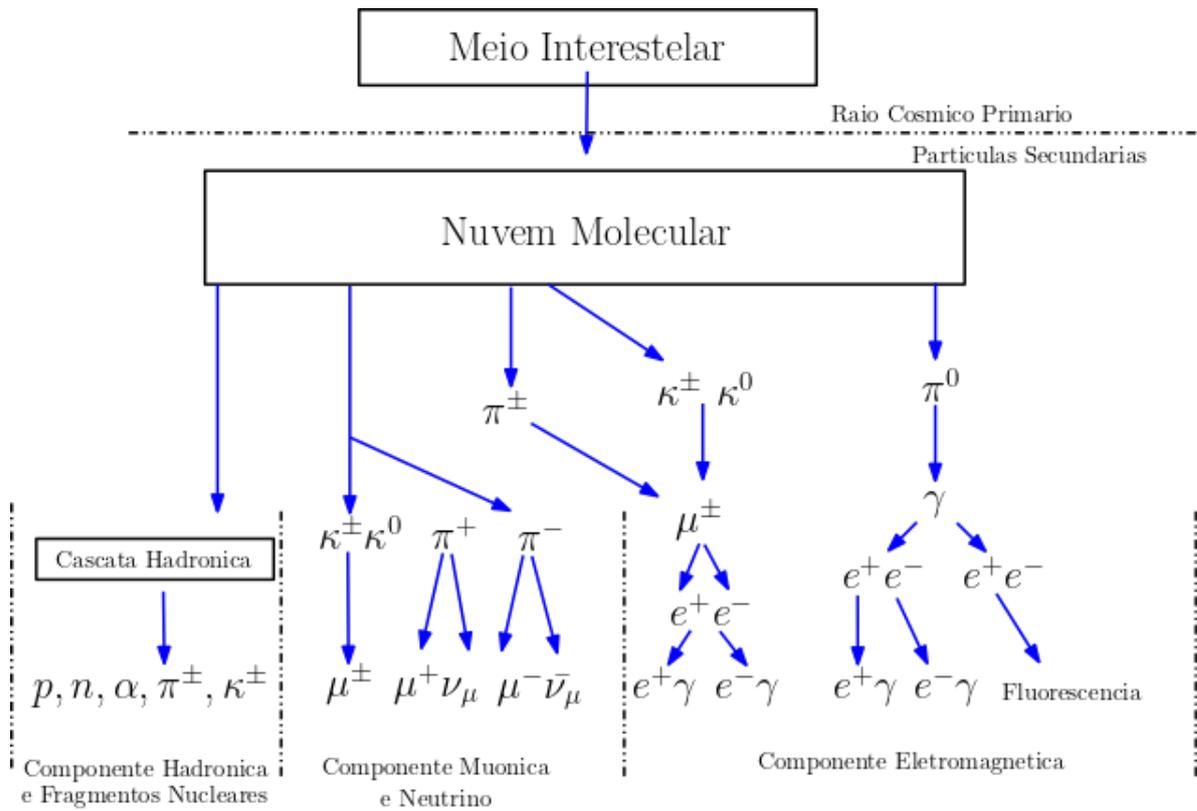


Figura 10 – Cascata de partículas produzidas na interação de raios cósmicos com uma nuvem molecular. Fonte: Adaptado de [151].



## 5 Nuvem Molecular de Perseus

A nuvem molecular de Perseus é uma das regiões interestelares mais estudadas da nossa galáxia, pois abriga um berçário de estrelas jovens em formação e está relativamente próxima do sistema solar, a uma distância de  $\sim 300$  pc sendo a nuvem molecular mais próxima da Terra [152]. Por estar tão próxima, a nuvem molecular de Perseus apresenta uma riqueza de dados observacionais que têm grande impacto na análise da interação de raios cósmicos com diversas regiões [153, 154, 155].

A nuvem de Perseus revelou detalhes sobre a transição do hidrogênio atômico (H) para o hidrogênio molecular ( $H_2$ ) [156], fornecendo informações importantes para entender como esses ambientes astrofísicos se comportam em diferentes faixas de temperatura, o que ajuda a compreender melhor as nuvens moleculares. Além disso, a descoberta da emissão de monóxido de carbono (CO) em 1970 [157] foi crucial para investigar o hidrogênio ionizado, que não é um bom traçador. Por meio do CO, é possível analisar a densidade colunar e entender a quantidade de hidrogênio ionizado presente em diferentes regiões de uma nuvem molecular [11].

O diâmetro da nuvem molecular de Perseus é de cerca de 153 parsecs [152], e ela contém uma grande quantidade de protoestrelas (vide Figura 11) e estrelas com idades entre 2 e 3 milhões de anos [158]. A nuvem molecular de Perseus é uma região importante para estudar a formação estelar e os processos que ocorrem no meio interestelar, pois é rica em hidrogênio ionizado e funciona como um laboratório natural para observar objetos estelares jovens (OEJs) em diferentes estágios de evolução [159].

Estudo recente [160] mostrou o uso de linhas de emissão, como a do cianeto de hidrogênio HCN ( $J = 1 \rightarrow 0$ ), que é um rastreador importante de gás molecular denso. Esse tipo de estudo permite identificar regiões da nuvem molecular com densidades suficientemente altas para promover o colapso gravitacional da nuvem. Estudar a emissão de HCN e a densidade de  $H_2$  na nuvem de Perseus é importante, pois revela como os grãos de poeira na nuvem afetam a distribuição do gás, a formação de estrelas [161] e a interação de raios cósmicos, uma vez que estas partículas vão colidir ao menos uma vez com os grãos de poeira da nuvem [151].

Cada nuvem molecular tem características interessantes a serem estudadas. A de Perseus, por exemplo, sugere que regiões densas da nuvem são particularmente eficientes em reter moléculas de HCN, que são usadas para traçar as estruturas da nuvem molecular. Isso ajuda a entender melhor o funcionamento interno de uma nuvem molecular.

Os dados obtidos a partir das observações da nuvem molecular de Perseus podem ser integrados em simulações no Geant4. Ao definir dados de densidade e composição



Figura 11 – Imagem da nuvem molecular de Perseus fornecida pelo Telescópio Espacial Spitzer da NASA no espectro infravermelho. Fonte: [163].

molecular de Perseus, é possível modelar diferentes tipos de radiação, como raios cósmicos, e como eles interagem com o meio denso da nuvem. Usar os dados de uma nuvem molecular, como no caso de Perseus, nos ajuda a modelar os processos de colisão e reações que ocorrem no interior dessas nuvens, fornecendo valiosos *insights* na astrofísica de partículas.

Compreender a nuvem molecular de Perseus por meio de simulações de Monte Carlo permite extrapolar os resultados e aprimorar modelos de nuvens moleculares que investigam a interação de raios cósmicos com essas nuvens, buscando entender a energia depositada e as partículas multi-mensageiras que emergem delas. Compreender a composição química, a densidade, a temperatura e os processos físico-químicos presentes na nuvem molecular de Perseus é importante, uma vez que sabemos que a matéria dessa nuvem possui diferentes seções de choque para reações como ionização e processos inelásticos, que geram partículas secundárias, como raios gama e neutrinos [162].

## 5.1 Composição Química da Nuvem Molecular de Perseus

As nuvens moleculares são regiões propícias à formação de moléculas, desde as mais simples até as mais complexas. Estudo recente [164] mostrou a composição química da nuvem molecular de Perseus, onde as moléculas mais abundantes na parte interna da nuvem são o hidrogênio molecular  $H_2$ , que representa cerca de 90% do gás da nuvem, seguido pelo hélio (He), com cerca de 9%. Segundo [165], também são encontradas moléculas como hidroxila (OH), água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e amônia ( $NH_3$ ), além de várias moléculas contendo carbono, que desempenham um papel importante na produção de hidrocarbonetos mais complexos e moléculas prebióticas, como cianeto de hidrogênio (HCN), etano ( $C_2H_6$ ) e benzeno ( $C_6H_6$ ) [165].

Os grãos de poeira presentes nas nuvens têm uma escala nanométrica, conforme mostrado em [11], e, de forma geral, podem ser compostos por silicatos, gelo e carbono, podendo também conter amônia, água e metano. Na nuvem molecular de Perseus, os grãos são predominantemente formados por carbono, que representa cerca de 1% de toda a composição de grãos na região.

Compreender a interação de raios cósmicos com nuvens moleculares é fundamental para entender a composição química e outras grandezas físicas dessas nuvens. A interação entre os raios cósmicos e os componentes da nuvem fornece informações valiosas sobre os processos hadrônicos e eletromagnéticos que ocorrem em seu interior. Dessa forma, a partir dos dados encontrados na literatura, definimos uma composição química homogênea para o gás e a poeira da nuvem molecular, bem como a temperatura e a densidade em diferentes regiões da nuvem molecular de Perseus.

## 5.2 Temperatura na Nuvem Molecular de Perseus

A temperatura do gás e da poeira em nuvens moleculares desempenham um papel crucial na compreensão dos processos físicos que ocorrem no interior desses objetos interestelares, especialmente no que se refere ao agente ionizante principal das nuvens, como vimos anteriormente: os raios cósmicos.

A temperatura do gás na nuvem de Perseus está principalmente associada às regiões de alta densidade. Para o gás, a temperatura pode variar entre 60 K e 75 K, dependendo da densidade, da composição e da região específica da nuvem de Perseus.

Estudos sugerem [166, 167] que a temperatura dos grãos de poeira na nuvem de Perseus varia entre 16 K e 22 K. Diferentemente de uma nuvem molecular hipotética, como discutido no Capítulo 3, onde a temperatura do gás aumenta significativamente à medida que se adentra nas regiões internas da nuvem, a temperatura na nuvem de Perseus segue um padrão diferente. Isso se deve ao fato de que essas nuvens funcionam como berçários estelares, e a presença de estrelas, especialmente as mais jovens, aquece mais intensamente algumas regiões do que outras.

Na nuvem de Perseus, há uma região com uma grande quantidade de estrelas do tipo B<sup>1</sup> [168]. Isso faz com que a temperatura na região mais interna da nuvem seja, paradoxalmente, mais baixa do que o esperado para uma nuvem molecular hipotética. Essa região, conhecida como IC 348<sup>2</sup>, tem sido objeto de estudos recentes, que mostraram avanços significativos na busca por hidrogênio atômico nesse gás [169].

<sup>1</sup> Estrelas do tipo B são estrelas azuis, luminosas e com um tempo de vida relativamente curto.

<sup>2</sup> A região IC 348 é uma das regiões mais estudadas de formação estelar próxima da Terra. Situada a uma distância aproximada de 870 anos-luz, é um aglomerado jovem e denso com estrelas em diferentes estágios de formação.

### 5.3 Densidade da Nuvem Molecular de Perseus

Nuvens moleculares, de maneira geral, apresentam características semelhantes entre si, principalmente devido à sua função como berçários estelares. De acordo com [166], a densidade da nuvem de Perseus pode variar dependendo da sua região. Embora determinar a densidade exata seja uma tarefa difícil, estudos como [170] fornecem uma aproximação dessa densidade para a nuvem de Perseus, que varia entre 5 e 120  $\text{cm}^{-3}$ . Considerando que  $\sim 90\%$  da nuvem é composta por  $\text{H}_2$ , derivamos a equação de estado do gás ideal<sup>3</sup> para a densidade, ou seja,

$$PV = nRT, \quad (5.1)$$

onde

$$n = \frac{N}{N_A}. \quad (5.2)$$

Substituindo a Equação 5.2 na Equação 5.1

$$PV = \frac{N}{N_A}RT. \quad (5.3)$$

Sabemos que:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (5.4)$$

e

$$m = n \cdot M. \quad (5.5)$$

Com as substituições da Equação 5.5 na Equação 5.4, além de aplicar a Equação 5.2, podemos relacionar a densidade da seguinte forma:

$$\rho = n \cdot \frac{M}{N_A}. \quad (5.6)$$

Assim, para o  $\text{H}_2$ , usando a densidade estimada por [170] em  $\text{g}/\text{cm}^3$ , temos para uma densidade de 5  $\text{cm}^{-3}$ :

$$\rho = 5 \text{ cm}^{-3} \cdot \frac{2 \text{ g/mol}}{6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \quad (5.7)$$

o que resulta em uma densidade de  $\sim 1.65 \times 10^{-23} \text{ g}/\text{cm}^3$ .

Analogamente, para uma densidade 120  $\text{cm}^{-3}$ :

$$\rho = 120 \text{ cm}^{-3} \cdot \frac{2 \text{ g/mol}}{6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \quad (5.8)$$

resultando em uma densidade de  $\sim 3.98 \times 10^{-22} \text{ g}/\text{cm}^3$ .

Com isso, realizamos uma distribuição dessas densidades em diferentes regiões da nuvem, uma vez que sabemos que, quanto menor a temperatura, maior a densidade da nuvem [170].

<sup>3</sup> A equação do estado do gás ideal descreve o comportamento macroscópico de um gás sob certas condições de temperatura, pressão e volume.

### 5.3.1 Densidade Colunar da Nuvem Molecular de Perseus

Para medir a densidade colunar de uma nuvem molecular, são utilizados diversos modelos, como o mapeamento de extinção no infravermelho próximo, o mapeamento de emissão térmica no *far-IR*<sup>4</sup> e o mapeamento da intensidade de isótopos de CO [171].

Como mostramos na Seção 3.3, o hidrogênio ionizado é mais abundante do que o CO. Podemos, portanto, utilizar o valor médio da razão entre as respectivas abundâncias na nuvem molecular de Perseus e, dessa forma, estimar a densidade colunar da nuvem. Usando a razão de abundância relativa do isótopo  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}/\text{H}_2$ , conseguimos determinar com precisão a densidade colunar para a nuvem molecular de Perseus, conforme mostrado na Equação 3.8.

---

<sup>4</sup> *far-IR*: Infra-vermelho distante que refere-se à radiação emitida por objetos ou materiais a temperaturas relativamente baixas.



## 6 Metodologia

A construção geométrica da nuvem molecular foi realizada utilizando as estruturas do software Geant4, o que possibilitou a realização de simulações das interações eletromagnéticas e hadrônicas envolvidas neste trabalho. Dados do espectro de energia dos raios cósmicos de diferentes composições químicas obtidos por diferentes instrumentos, como CALET, DAMPE, AMS-02, PAMELA, BESS-Polar II, CREAM, TRACER e o Fermi-LAT, foram utilizados como entrada na simulação via Geant4 (representando o feixe de partículas primário).

### 6.1 Geant4

O Geant4 é uma ferramenta desenvolvida pelo CERN que permite simular a passagem de partículas pela matéria, utilizando a linguagem de programação C++ [172]. Suas aplicações abrangem áreas como física de altas energias, física nuclear, construção de detectores e até mesmo física médica [173]. Utilizando o Geant4, analisamos a deposição de energia e a distribuição de partículas produzidas na nuvem molecular, que é tratada como um absorvedor na simulação. Para realizar a simulação, utilizamos objetos que são definidos como detectores, nos quais os processos físicos são modelados para que as interações físicas ocorram de acordo com as características da nuvem molecular.

#### 6.1.1 Geometria de uma Típica Nuvem Molecular

A nuvem molecular hipotética modelada neste trabalho foi baseada em [151], a qual é modelada geometricamente como uma esfera com um diâmetro de 4.8 pc, composta por 13 camadas concêntricas, com diferentes raios, onde a densidade varia com  $r^{-1,2}$ , com  $r$  sendo o raio médio de cada camada. O valor do índice -1,2 foi considerado como um índice médio para o perfil de distribuição de densidade de nuvens moleculares [151, 174]. A massa total da nuvem molecular é de aproximadamente  $5400 M_{\odot}$ , valor que está dentro da faixa de massas de nuvens moleculares observadas [175].

A composição química da nuvem molecular modelada corresponde a uma mistura de  $H_2$  e grãos carbonáceos (expressos em termos de átomos de H e C). Os grãos apresentam uma densidade de  $2,1 \text{ g/cm}^3$  e raio de 50 nm. Cada camada da nuvem é composta por 99.83% de átomos de  $H_2$  e 0.17% átomos de C (a proporção de poeira para massa de gás é da ordem de 1/100). Esta proporção na Via Láctea foi estabelecida aproximadamente como 1:100 no meio interestelar difuso [176], com tamanhos típicos abaixo de  $1 \mu\text{m}$  em nuvens moleculares [177].

Os átomos de carbono são os representantes típicos de poeira astrofísica (grãos carbonáceos). O átomo de carbono é a espécie mais abundante de grãos de poeira no espaço [178, 179, 180], seguido por outros elementos como Cr, Ca, Al, Mg, Si, O e Fe.

A Tabela 1 mostra as densidades, temperaturas do gás e poeira para cada camada da nuvem molecular.

Composição da nuvem molecular				
Camadas	H <sub>2</sub>	C	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura do gás e poeira (K)
Camada 1	99.83%	0.17%	$6.50 \times 10^{-22}$	20.3 & 6.0
Camada 2	99.83%	0.17%	$1.49 \times 10^{-21}$	13.2 & 6.1
Camada 3	99.83%	0.17%	$4.85 \times 10^{-21}$	13.3 & 6.2
Camada 4	99.83%	0.17%	$1.03 \times 10^{-20}$	14.0 & 6.3
Camada 5	99.83%	0.17%	$2.37 \times 10^{-20}$	14.4 & 6.6
Camada 6	99.83%	0.17%	$7.68 \times 10^{-20}$	14.5 & 7.0
Camada 7	99.83%	0.17%	$1.63 \times 10^{-19}$	14.1 & 7.4
Camada 8	99.83%	0.17%	$3.75 \times 10^{-19}$	12.6 & 7.5
Camada 9	99.83%	0.17%	$1.28 \times 10^{-18}$	9.9 & 7.6
Camada 10	99.83%	0.17%	$2.59 \times 10^{-18}$	8.8 & 7.6
Camada 11	99.83%	0.17%	$5.95 \times 10^{-18}$	8.2 & 7.7
Camada 12	99.83%	0.17%	$1.93 \times 10^{-17}$	8.0 & 7.8
Camada 13	99.83%	0.17%	$5.69 \times 10^{-15}$	8.1 & 8.0

Tabela 1 – Propriedades em cada camada da nuvem molecular. Fonte: Autor.

A implementação da modelagem da nuvem molecular no Geant4 segue como:

Listing 6.1 – Implementação da composição química na nuvem molecular.

```
void DetectorConstruction::DefineMaterials()
{
G4NistManager* man = G4NistManager::Instance();
G4Material* CloudMaterial1 = new G4Material("G4_MC1", 6.50e-22 * g / cm3,
2, kStateGas, 20.3* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial1->AddMaterial(Hydrogen1, 99.83 * perCent);
CloudMaterial1->AddMaterial(Carbon1, 0.17 * perCent);
}
G4Material* CloudMaterial2 = new G4Material("G4_MC2", 1.49e-21 * g / cm3,
2, kStateGas, 13.2 * kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial2->AddMaterial(Hydrogen2, 99.83 * perCent);
CloudMaterial2->AddMaterial(Carbon2, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial3 = new G4Material("G4_MC3", 4.85e-21 * g / cm3,
2, kStateGas, 13.2* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial3->AddMaterial(Hydrogen3, 99.83 * perCent);
CloudMaterial3->AddMaterial(Carbon3, 0.17 * perCent);
```

```
G4Material* CloudMaterial4 = new G4Material("G4_MC4", 1.03e-20 * g / cm3,
2, kStateGas, 14.0* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial4->AddMaterial(Hydrogen4, 99.83 * perCent);
CloudMaterial4->AddMaterial(Carbon4, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial5 = new G4Material("G4_MC5", 2.37e-20 * g / cm3,
2, kStateGas, 14.4* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial5->AddMaterial(Hydrogen5, 99.83 * perCent);
CloudMaterial5->AddMaterial(Carbon5, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial6 = new G4Material("G4_MC6", 7.68e-20 * g / cm3,
2, kStateGas, 14.5* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial6->AddMaterial(Hydrogen6, 99.83 * perCent);
CloudMaterial6->AddMaterial(Carbon6, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial7 = new G4Material("G4_MC7", 1.63e-19 * g / cm3,
2, kStateGas, 14.1* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial7->AddMaterial(Hydrogen7, 99.83 * perCent);
CloudMaterial7->AddMaterial(Carbon7, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial8 = new G4Material("G4_MC8", 3.75e-19 * g / cm3,
2, kStateGas, 12.6* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial8->AddMaterial(Hydrogen8, 99.83 * perCent);
CloudMaterial8->AddMaterial(Carbon8, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial9 = new G4Material("G4_MC9", 1.28e-18 * g / cm3,
2, kStateGas, 9.9* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial9->AddMaterial(Hydrogen9, 99.83 * perCent);
CloudMaterial9->AddMaterial(Carbon9, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial10 = new G4Material("G4_MC10", 2.59e-18 * g / cm3,
2, kStateGas, 8.8* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial10->AddMaterial(Hydrogen10, 99.83 * perCent);
CloudMaterial10->AddMaterial(Carbon10, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial11 = new G4Material("G4_MC11", 5.95e-18 * g / cm3,
2, kStateGas, 8.2* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial11->AddMaterial(Hydrogen11, 99.83 * perCent);
CloudMaterial11->AddMaterial(Carbon11, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial12 = new G4Material("G4_MC12", 1.93e-17 * g / cm3
```

```

2, kStateGas, 8.0* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial12->AddMaterial(Hydrogen12, 99.83 * perCent);
CloudMaterial12->AddMaterial(Carbon12, 0.17 * perCent);

G4Material* CloudMaterial13 = new G4Material("G4_MC13", 5.69e-15 * g / cm3,
2, kStateGas, 8.1* kelvin, 99.83 * perCent);
CloudMaterial13->AddMaterial(Hydrogen13, 99.83 * perCent);
CloudMaterial13->AddMaterial(Carbon13, 0.17 * perCent);

```

A parte externa da nuvem foi representada por uma caixa, que simboliza o universo, como mostrado na Figura 12.<sup>1</sup> As dimensões foram definidas de acordo com as características do meio interestelar e as constantes físicas pertinentes.

Listing 6.2 – Implementação das grandezas físicas do universo.

```

//Vacuum and from PhysicalConstants.hh
G4double density      = universe_mean_density;
G4double pressure     = 3.e-18*pascal;
G4double temperature  = 2.73*kelvin;
G4Material* Galactic =
new G4Material("Galactic", 1., 1.008*g/mole, density,
              kStateGas,temperature,pressure);
fMaterialUniverse = Galactic;

```

## 6.1.2 Geometria da Nuvem Molecular de Perseus

Na seção anterior (6.1.1), apresentamos como uma nuvem molecular pode ser definida geometricamente, destacando as características de uma nuvem molecular hipotética nas condições utilizadas. Nesta seção, detalhamos a construção realizada no Geant4, baseada nas condições observadas na nuvem de Perseus, utilizando dados disponíveis na literatura [181, 182, 183, 184].

A nuvem molecular de Perseus possui um diâmetro de aproximadamente  $\sim 153,20$  pc. De acordo com [185], sua massa supera  $10.000 M_{\odot}$ . Após a construção de um modelo geométrico para uma nuvem molecular hipotética, foi possível adaptá-lo às condições específicas da nuvem escolhida para estudo. No caso da nuvem de Perseus, a modelagem implementada foi definida como:

Listing 6.3 – Implementação da composição química na nuvem molecular de Perseus.

```

void DetectorConstruction::DefineMaterials()
{

```

<sup>1</sup> A representação geométrica da Figura 12 mostra as 13 camadas concêntricas, sendo a última camada representada em amarelo para facilitar a visualização.

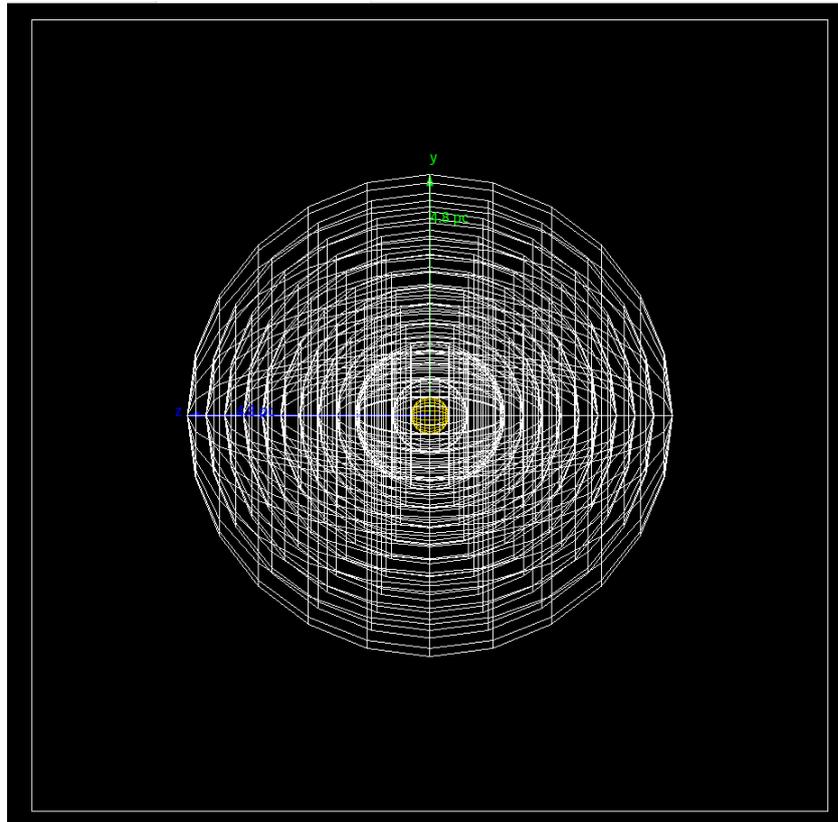


Figura 12 – Representação Geométrica da Nuvem Molecular hipotética. Fonte: Autor.

```
G4NistManager* man = G4NistManager::Instance();

// Camada 1 - Nuvem Molecular de Perseus
G4Element* H1 = man->FindOrBuildElement("H");
G4Material* Hydrogen1 = new G4Material("G4_MC_H", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 75.0 * kelvin, 90.0 * perCent);
Hydrogen1->AddElement(H1, 2);
Hydrogen1->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(15.43 * eV);

G4Element* He1 = man->FindOrBuildElement("He");
G4Material* Helium1 = new G4Material("G4_MC_He", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 75.0 * kelvin, 9.0 * perCent);
Helium1->AddElement(He1, 1);
Helium1->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(41.81 * eV);

G4Element* C1 = man->FindOrBuildElement("C");
G4Material* Carbon1 = new G4Material("G4_MC_C", 1.0 * g / cm3,
1, kStateSolid, 22.0 * kelvin, 1.0 * perCent);
Carbon1->AddElement(C1, 1);
Carbon1->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(11.26 * eV);
```

```
G4Material* CloudMaterial1 = new G4Material("G4_MC1", 1.65e-23 * g / cm3,
3, kStateGas, 75.0 * kelvin, 99.0 * perCent);
CloudMaterial1->AddMaterial(Hydrogen1, 90.0 * perCent);
CloudMaterial1->AddMaterial(Helium1, 9.0 * perCent);
CloudMaterial1->AddMaterial(Carbon1, 1.0 * perCent);

// Camada 2 - Nuvem Molecular de Perseus
G4Material* Hydrogen2 = new G4Material("G4_MC_H2", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 72.0 * kelvin, 90.0 * perCent);
Hydrogen2->AddElement(H1, 2);
Hydrogen2->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(15.43 * eV);

G4Material* Helium2 = new G4Material("G4_MC_He2", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 72.0 * kelvin, 9.0 * perCent);
Helium2->AddElement(He1, 1);
Helium2->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(41.81 * eV);

G4Material* Carbon2 = new G4Material("G4_MC_C2", 1.0 * g / cm3,
1, kStateSolid, 20.8 * kelvin, 1.0 * perCent);
Carbon2->AddElement(C1, 1);
Carbon2->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(11.26 * eV);

G4Material* CloudMaterial2 = new G4Material("G4_MC2", 2.07e-22 * g / cm3,
3, kStateGas, 72.0 * kelvin, 99.0 * perCent);
CloudMaterial2->AddMaterial(Hydrogen2, 90.0 * perCent);
CloudMaterial2->AddMaterial(Helium2, 9.0 * perCent);
CloudMaterial2->AddMaterial(Carbon2, 1.0 * perCent);

// Camada 3 - Nuvem Molecular de Perseus
G4Material* Hydrogen3 = new G4Material("G4_MC_H3", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 69.0 * kelvin, 90.0 * perCent);
Hydrogen3->AddElement(H1, 2);
Hydrogen3->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(15.43 * eV);

G4Material* Helium3 = new G4Material("G4_MC_He3", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 69.0 * kelvin, 9.0 * perCent);
Helium3->AddElement(He1, 1);
Helium3->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(41.81 * eV);

G4Material* Carbon3 = new G4Material("G4_MC_C3", 1.0 * g / cm3,
1, kStateSolid, 19.6 * kelvin, 1.0 * perCent);
```

```
Carbon3->AddElement(C1, 1);
Carbon3->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(11.26 * eV);

G4Material* CloudMaterial3 = new G4Material("G4_MC3", 2.48e-22 * g / cm3,
3, kStateGas, 69.0 * kelvin, 99.0 * perCent);
CloudMaterial3->AddMaterial(Hydrogen3, 90.0 * perCent);
CloudMaterial3->AddMaterial(Helium3, 9.0 * perCent);
CloudMaterial3->AddMaterial(Carbon3, 1.0 * perCent);

// Camada 4 - Nuvem Molecular de Perseus
G4Material* Hydrogen4 = new G4Material("G4_MC_H4", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 66.0 * kelvin, 90.0 * perCent);
Hydrogen4->AddElement(H1, 2);
Hydrogen4->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(15.43 * eV);

G4Material* Helium4 = new G4Material("G4_MC_He4", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 66.0 * kelvin, 9.0 * perCent);
Helium4->AddElement(He1, 1);
Helium4->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(41.81 * eV);

G4Material* Carbon4 = new G4Material("G4_MC_C4", 1.0 * g / cm3,
1, kStateSolid, 18.4 * kelvin, 1.0 * perCent);
Carbon4->AddElement(C1, 1);
Carbon4->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(11.26 * eV);

G4Material* CloudMaterial4 = new G4Material("G4_MC4", 2.89e-22 * g / cm3,
3, kStateGas, 66.0 * kelvin, 99.0 * perCent);
CloudMaterial4->AddMaterial(Hydrogen4, 90.0 * perCent);
CloudMaterial4->AddMaterial(Helium4, 9.0 * perCent);
CloudMaterial4->AddMaterial(Carbon4, 1.0 * perCent);

// Camada 5 - Nuvem Molecular de Perseus
G4Material* Hydrogen5 = new G4Material("G4_MC_H5", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 63.0 * kelvin, 90.0 * perCent);
Hydrogen5->AddElement(H1, 2);
Hydrogen5->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(15.43 * eV);

G4Material* Helium5 = new G4Material("G4_MC_He5", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 63.0 * kelvin, 9.0 * perCent);
Helium5->AddElement(He1, 1);
Helium5->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(41.81 * eV);
```

```
G4Material* Carbon5 = new G4Material("G4_MC_C5", 1.0 * g / cm3,
1, kStateSolid, 17.2 * kelvin, 1.0 * perCent);
Carbon5->AddElement(C1, 1);
Carbon5->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(11.26 * eV);

G4Material* CloudMaterial5 = new G4Material("G4_MC5", 3.30e-22 * g / cm3,
3, kStateGas, 63.0 * kelvin, 99.0 * perCent);
CloudMaterial5->AddMaterial(Hydrogen5, 90.0 * perCent);
CloudMaterial5->AddMaterial(Helium5, 9.0 * perCent);
CloudMaterial5->AddMaterial(Carbon5, 1.0 * perCent);

// Camada 6 - Nuvem Molecular de Perseus
G4Material* Hydrogen6 = new G4Material("G4_MC_H6", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 60.0 * kelvin, 90.0 * perCent);
Hydrogen6->AddElement(H1, 2);
Hydrogen6->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(15.43 * eV);

G4Material* Helium6 = new G4Material("G4_MC_He6", 1.0 * g / cm3,
1, kStateGas, 60.0 * kelvin, 9.0 * perCent);
Helium6->AddElement(He1, 1);
Helium6->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(41.81 * eV);

G4Material* Carbon6 = new G4Material("G4_MC_C6", 1.0 * g / cm3,
1, kStateSolid, 16.0 * kelvin, 1.0 * perCent);
Carbon6->AddElement(C1, 1);
Carbon6->GetIonisation()->SetMeanExcitationEnergy(11.26 * eV);

G4Material* CloudMaterial6 = new G4Material("G4_MC6", 3.98e-22 * g / cm3,
3, kStateGas, 60.0 * kelvin, 99.0 * perCent);
CloudMaterial6->AddMaterial(Hydrogen6, 90.0 * perCent);
CloudMaterial6->AddMaterial(Helium6, 9.0 * perCent);
CloudMaterial6->AddMaterial(Carbon6, 1.0 * perCent);
```

A nuvem de Perseus foi modelada como composta por seis camadas concêntricas (vide Tabela 2 para informações físico-químicas da nuvem). Essa escolha é uma simplificação que considera a nuvem como um objeto esférico, o que nos permite manipular as propriedades de cada camada de forma a refletir com maior precisão a complexidade e a heterogeneidade da nuvem. Embora essa abordagem seja simplificada, ela oferece uma representação útil da estrutura da nuvem molecular, que não apresenta um formato simples e uniforme. Suas características físicas e químicas variam consideravelmente entre as diferentes regiões da nuvem, o que justifica a adoção de um modelo em camadas.

A configuração das camadas foi cuidadosamente reestruturada para garantir que a simulação seja realizada de maneira precisa, com as condições que mais se aproximam da realidade da nuvem molecular de Perseus. Essa abordagem permite que as propriedades específicas de cada camada sejam levadas em consideração, assegurando que as interações entre os raios cósmicos e os diversos componentes da nuvem sejam modeladas de forma mais fiel.

Composição da nuvem molecular de Perseus					
Camadas	H <sub>2</sub>	He	C	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura gás e poeira (K)
Camada 1	90%	9%	1%	$1.65 \times 10^{-23}$	75 & 22.0
Camada 2	90%	9%	1%	$2.07 \times 10^{-22}$	72 & 20.8
Camada 3	90%	9%	1%	$2.48 \times 10^{-22}$	69 & 19.6
Camada 4	90%	9%	1%	$2.89 \times 10^{-22}$	66 & 18.4
Camada 5	90%	9%	1%	$3.30 \times 10^{-22}$	63 & 17.2
Camada 6	90%	9%	1%	$3.98 \times 10^{-22}$	60 & 16.0

Tabela 2 – Propriedades em cada camada da nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

Uma vez que todas as propriedades da nuvem de Perseus foram definidas, com base nos dados coletados e no modelo estabelecido, estamos prontos para dar início à simulação das interações utilizando o Geant4. A Figura 13 apresenta a construção da geometria da nuvem molecular de Perseus no software Geant4, onde um raio cósmico composto por núcleo de Fe incide na nuvem com energia de 5 GeV. Após a interação, observa-se uma cascata de partículas secundárias se formando dentro da nuvem. As linhas sólidas vermelhas representam os elétrons, enquanto as verdes indicam possíveis raios gama.

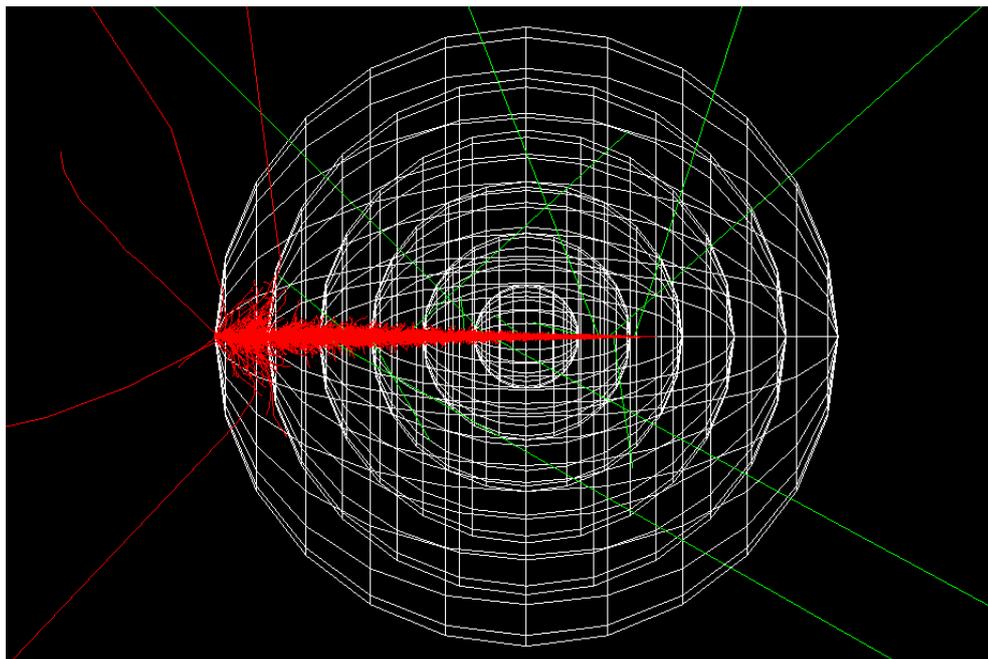


Figura 13 – Representação geométrica da nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

As condições do universo implementadas no Geant4 foram mantidas inalteradas. Com as propriedades conhecidas, os resultados da simulação para a nuvem molecular de Perseus são apresentados na Seção 7.3.

### 6.1.3 Processos Físicos do Geant4

A ferramenta Geant4 possui uma capacidade poderosa de realizar interações com diferentes faixas de energia para partículas, carregadas e neutras, que incidem na matéria. Os processos físicos descrevem como as partículas interagem com a matéria e o Geant4 fornece pelo menos sete categorias principais de processos [186], sendo eles:

1. **Eletromagnético** - refere-se à simulação de interações de partículas carregadas e neutras com a matéria, mediadas pela força eletromagnética;
2. **Hadrônico** - refere-se à simulação de interações de partículas hadrônicas (como prótons, nêutrons, píons e núcleos atômicos) com a nuvem molecular. A Figura 14 mostra os modelos hadrônicos disponíveis no Geant4;
3. **Transporte** - refere-se à movimentação de partículas através de materiais ou volumes, considerando as interações físicas relevantes e os efeitos geométricos;
4. **Decaimento** - refere-se à simulação de partículas instáveis que se desintegram espontaneamente em outras partículas, obedecendo às leis de conservação de energia, momento linear, momento angular e carga. ;
5. **Óptico** - refere-se à simulação da interação de fótons ópticos (tipicamente com energias na faixa de 1 eV a 10 eV) com materiais. Fótons ópticos são tratados de maneira especial no Geant4, pois seus comportamentos são determinados mais pela óptica geométrica (reflexão, refração, espalhamento) do que pela interação com os átomos de forma quântica;
6. **Lepto-hadrônico** - refere-se a interações que envolvem fótons, léptons (como elétrons e múons), e hádrons (como prótons e núcleos). Tais processos podem incluir a produção de léptons por fótons em interações com núcleos e a produção de hádrons em colisões de fótons com léptons ou outros hádrons;
7. **Parametrização** - refere-se a uma técnica avançada que permite simplificar simulações, economizando tempo de computação e recursos, especialmente para geometrias complexas e eventos repetitivos.

Todos esses processos são derivados da classe “G4VProcess”. A interação de raios cósmicos e nuvens moleculares depende dos processos hadrônicos e eletromagnéticos. As interações utilizadas neste trabalho fazem parte do pacote de física “Physics List” definido

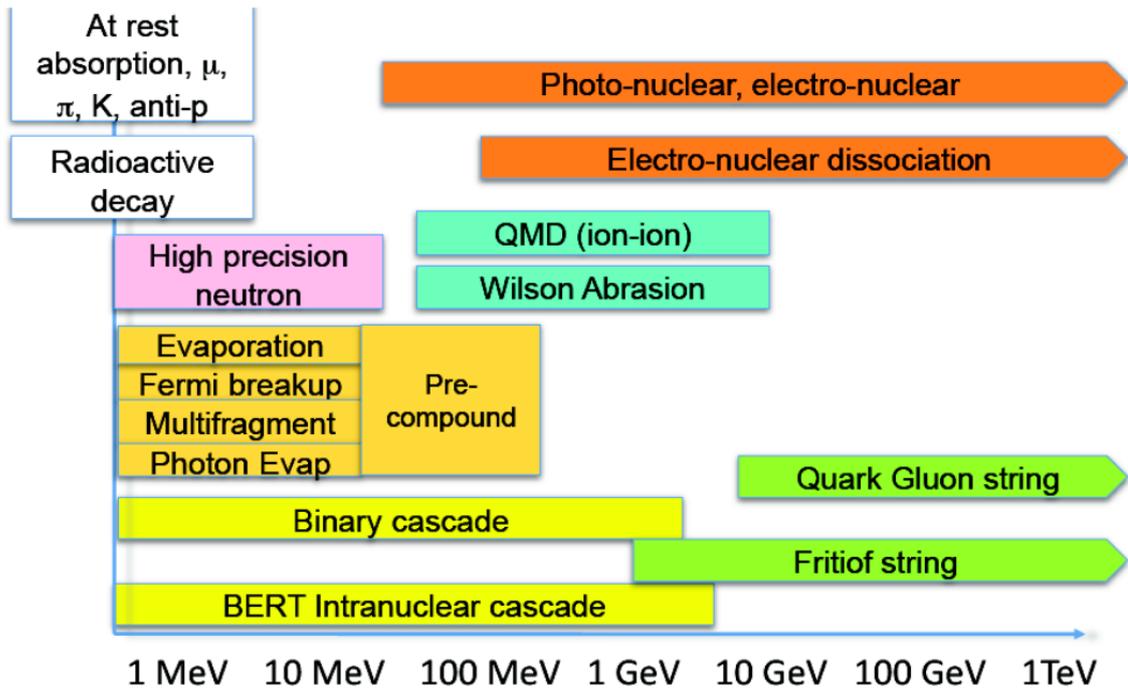


Figura 14 – Modelos hadrônicos disponíveis no Geant4. Fonte: [187].

no Geant4 para a faixa de energia desde GeV até TeV. A “Physics List” é uma classe responsável por especificar todas as partículas que serão usadas na aplicação da simulação, juntamente com a lista de processos físicos atribuídos a cada partícula de forma individual [188]. As classes que utilizamos para a simulação, foram respectivamente:

Listing 6.4 – Implementação das classes utilizadas a partir dos processos hadrônicos e eletromagnéticos via Geant4.

```
#include "HadronElasticPhysicsHP.hh"
#include "G4HadronPhysicsFTFP_BERT_HP.hh"
#include "G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP.hh"
#include "G4HadronInelasticQBBC.hh"
#include "G4HadronPhysicsINCLXX.hh"
#include "G4IonElasticPhysics.hh"
#include "G4IonPhysicsXS.hh"
#include "G4IonINCLXXPhysics.hh"
#include "G4StoppingPhysics.hh"
#include "GammaNuclearPhysics.hh"
#include "GammaNuclearPhysicsLEND.hh"
#include "ElectromagneticPhysics.hh"
#include "G4EmStandardPhysics.hh"
#include "G4EmStandardPhysics_option3.hh"
#include "G4DecayPhysics.hh"
#include "RadioactiveDecayPhysics.hh"
```

```
#include "G4RadioactiveDecayPhysics.hh"
```

## 7 Resultados e Discussões

Os resultados obtidos nesta dissertação contribuem para estudos da propagação de raios cósmicos na nossa galáxia, investigando a interação de raios cósmicos com nuvens moleculares. Um dos principais resultados é a consideração das nuvens moleculares como potenciais candidatos na produção de partículas multi-mensageiras, incluindo raios gama e neutrinos. Essa contribuição representa um avanço significativo na área de astrofísica, uma vez que há ainda muitas indagações.

### 7.1 Interação de Raios Cósmicos com Nuvens Moleculares e a Deposição de Energia

A Figura 15 mostra uma imagem via Geant4 de um feixe de elétrons (linha sólida vermelha) incidindo perpendicularmente em relação ao plano da nuvem molecular, produzindo partículas neutras como raios gama e neutrinos eletrônicos (linhas sólidas verdes). Os elétrons apresentam um espectro de energia descrito por uma lei de potência, com energias variando desde 1 GeV até 1 TeV. Além de elétrons como partículas primárias interagindo com a nuvem molecular, consideramos prótons e núcleos de He, C e Fe com energias entre  $10^8$  eV até  $10^{14}$  eV. O espectro de energia para os raios cósmicos primários foi obtido por meio de dados coletados por diferentes instrumentos de detecção de radiação, conforme descrito na Seção 2.5. Vale ressaltar que o feixe de partículas incidiu sobre a nuvem molecular com diferentes ângulos de entrada desde  $1^\circ$  (incidência quase perpendicular) até  $80^\circ$  (incidência quase rasante). Para cada partícula primária foram simulados 80000 eventos.

Na simulação considerando núcleos mais pesados foi observada, além da produção de raios gama e neutrinos, a produção de outras partículas hadrônicas como prótons e nêutrons, e outros núcleos mais leves. A quantidade de partículas secundárias produzidas na nuvem, e que também emergem da mesma, depende do tipo de partícula primária, de sua energia e, também, do ângulo de incidência na nuvem.

Na astrofísica multi-mensageira, obter essas informações e tentar analisar questões em aberto como a origem dos raios cósmicos e a produção de raios gama e neutrinos a partir destes tem sido um grande desafio com o conhecimento que temos hoje. Estudar as nuvens moleculares e tentar correlacionar esses dados para um estudo cada vez mais preciso através do software Geant4 pode contribuir com esse tipo de investigação.

As reações químicas que ocorrem dentro das nuvens moleculares estão relacionadas com as interações de raios cósmicos [189]. Sabemos que a densidade e composição da nuvem

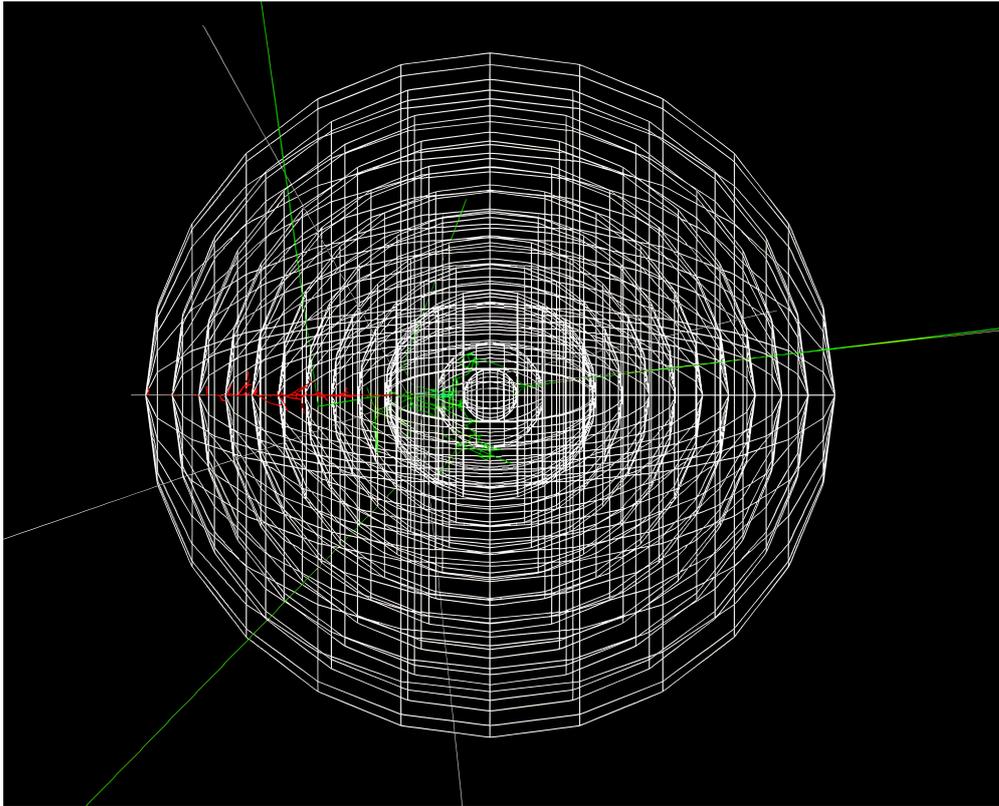


Figura 15 – Imagem via Geant4 de um feixe de elétrons (linha sólida vermelha) incidindo perpendicularmente em relação ao plano da nuvem molecular, produzindo raios gama e neutrinos eletrônicos (linhas sólidas verdes). Fonte: Autor.

têm um grande impacto na deposição de energia. Verificamos que a energia depositada em cada camada por partículas de raios cósmicos, como elétrons, prótons e núcleos de He, aumenta significativamente conforme a partícula primária penetra regiões mais densas da nuvem. Enquanto para núcleos de C e Fe, observa-se que o depósito de energia diminui à medida que a partícula adentra as camadas mais internas da nuvem molecular.

A Figura 16 mostra as distribuições das energias depositadas por diferentes partículas de raio cósmico na nuvem molecular (linha sólida vermelha). Podemos observar que a energia depositada aumenta significativamente com o aumento do número atômico da partícula primária. Sabendo que a perda de energia por unidade de comprimento cresce com o quadrado da carga da partícula, logo, uma partícula com carga maior perde mais energia por unidade de caminho que uma partícula de carga menor. Vale ressaltar que o depósito de energia nas camadas da nuvem depende do ângulo de incidência da partícula primária. Para ângulos quase perpendiculares, o depósito de energia é maior nas camadas mais internas da nuvem, enquanto para ângulos quase rasantes, o depósito de energia ocorre quase em sua totalidade nas camadas mais iniciais.

Quando analisamos a energia média depositada pelos raios cósmicos na nuvem molecular com ângulo de incidência entre  $1^\circ$  até  $10^\circ$  nas treze camadas (veja a Figura 17),

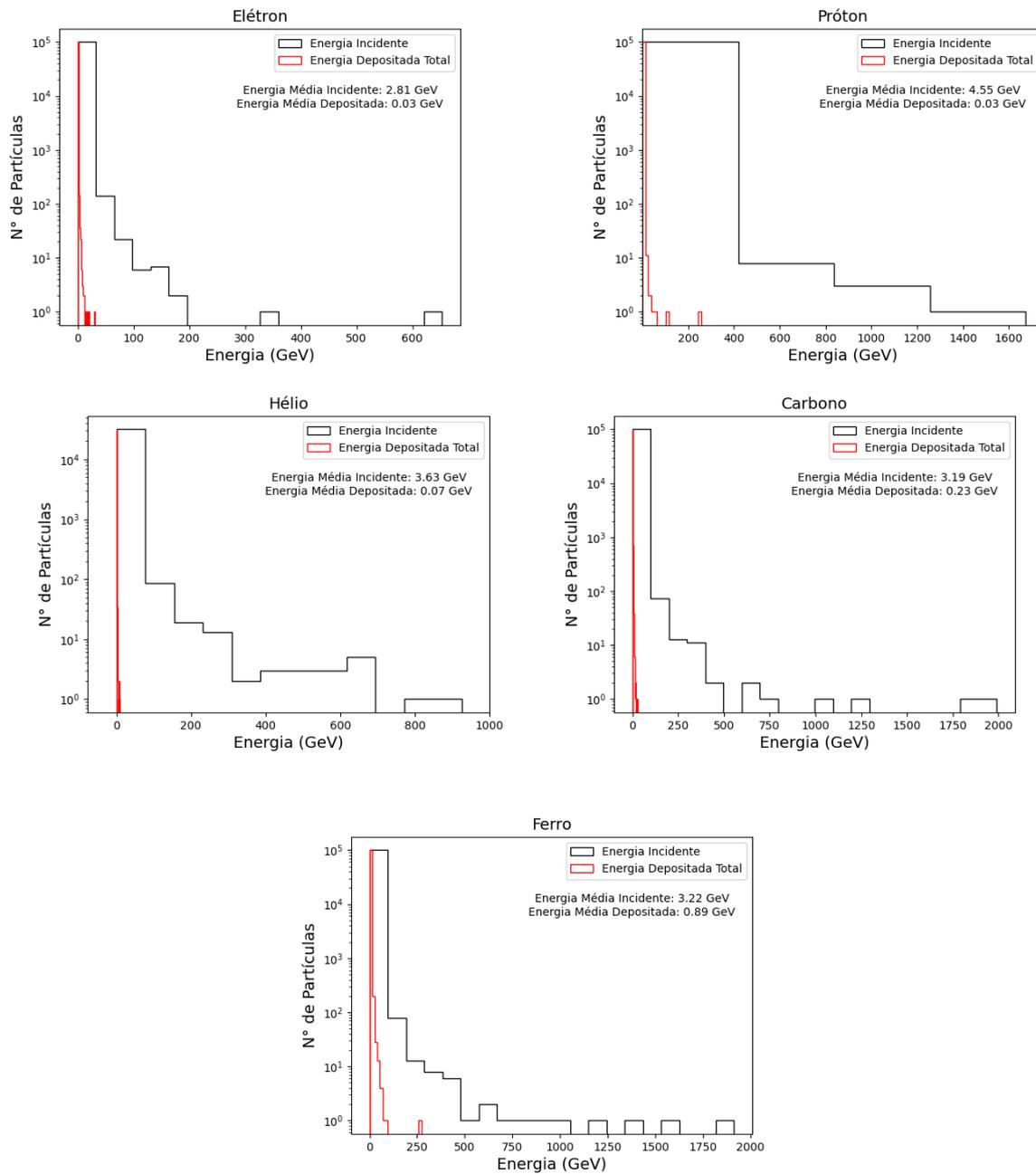


Figura 16 – Distribuição da energia incidente (linha sólida preta) e depositada (linha sólida vermelha) por partículas de raios cósmicos primárias na nuvem molecular. Fonte: Autor.

observamos que, conforme as partículas primárias penetram nas camadas mais internas da nuvem, a energia depositada aumenta. Além do mais, a figura mostra que, nas camadas mais profundas, a incerteza no valor médio da energia depositada é maior do que nas primeiras camadas. As bandas coloridas no gráfico correspondem ao erro de  $1\sigma$ , as quais são regiões que incluem 68% de todos os pontos de dados em curvas de distribuição normal.

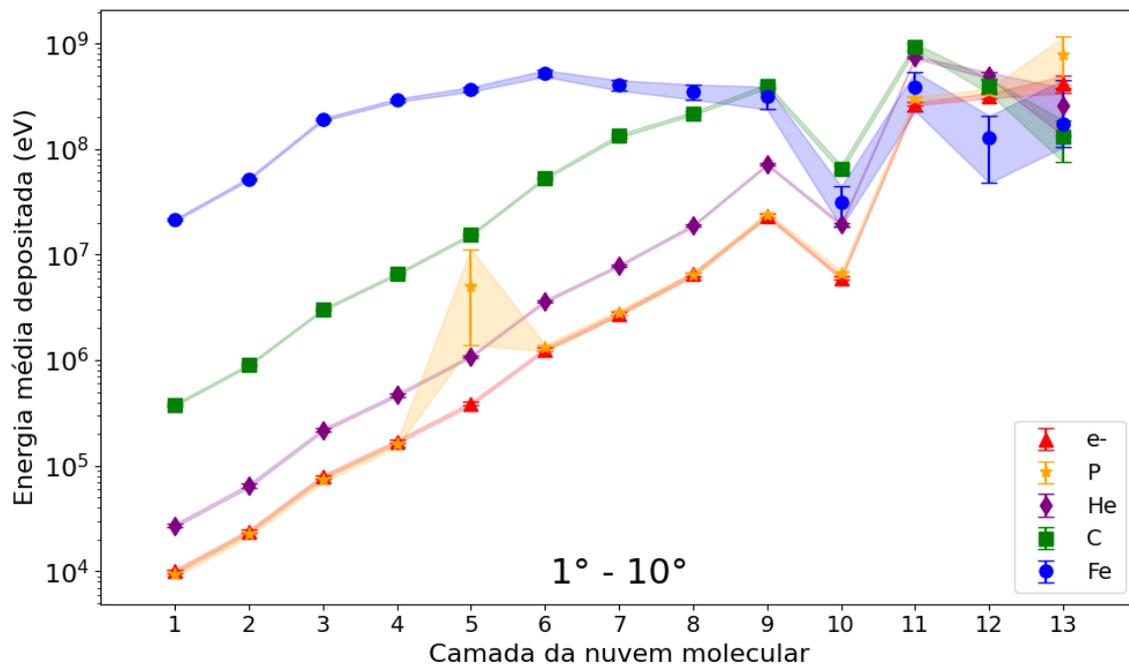


Figura 17 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre  $1^\circ$  e  $10^\circ$ . Fonte: Autor.

Conforme aumenta-se o ângulo de incidência, observa-se um comportamento bastante aleatório no depósito de energia média nas camadas da nuvem, além também de haver camadas com nenhum depósito de energia (camadas mais internas da nuvem). Isto pode ser observado nas Figuras 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24. Além do aumento da flutuação da energia depositada média numa análise de camada a camada da nuvem, as incertezas no valor médio também aumentam de maneira significativa, principalmente a partir da quinta camada. Para núcleos de Fe, o depósito de energia é o mais uniforme por ser um primário mais pesado e, portanto, consegue penetrar nas camadas mais densas da nuvem molecular.

Observamos, nos resultados da energia média depositada por faixa de ângulo de incidência, que na camada 10 ocorre uma pequena flutuação na energia média depositada. Acreditamos que essa flutuação esteja relacionada a interações específicas de partículas, uma vez que depende da energia do raio cósmico primário e das diferentes interações que ocorrem nas regiões mais densas da nuvem molecular, como aquelas recorrentes na camada 10. Entre essas interações, podemos destacar processos de espalhamento inelástico, nos

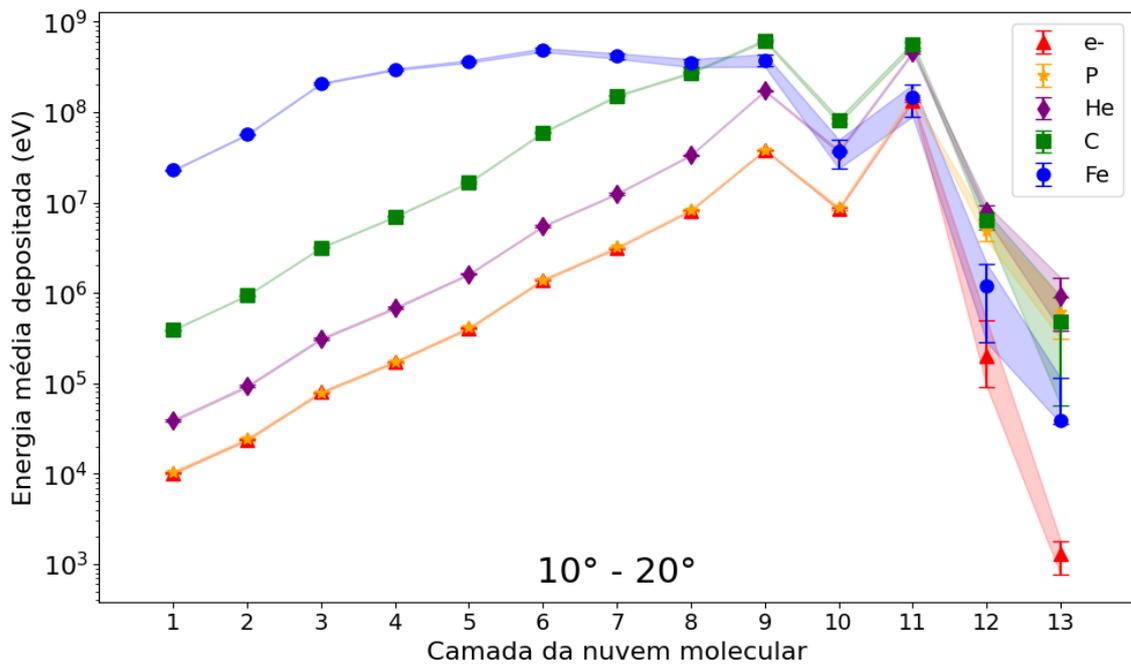


Figura 18 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre  $10.1^\circ$  e  $20^\circ$ . Fonte: Autor.

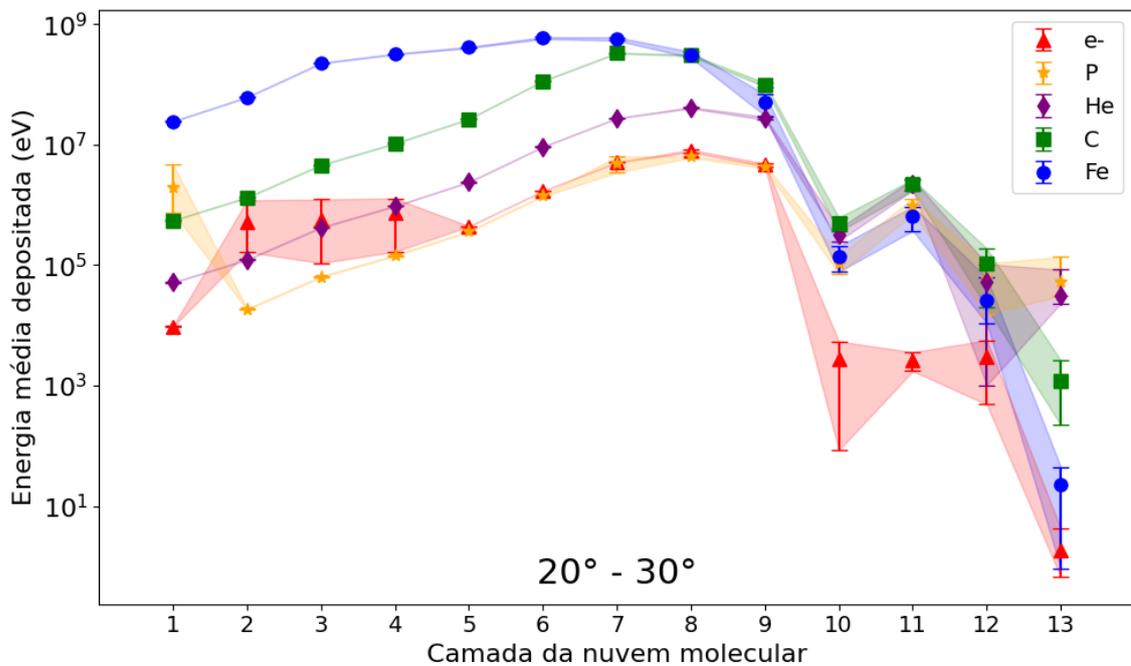


Figura 19 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre  $20.1^\circ$  e  $30^\circ$ . Fonte: Autor.

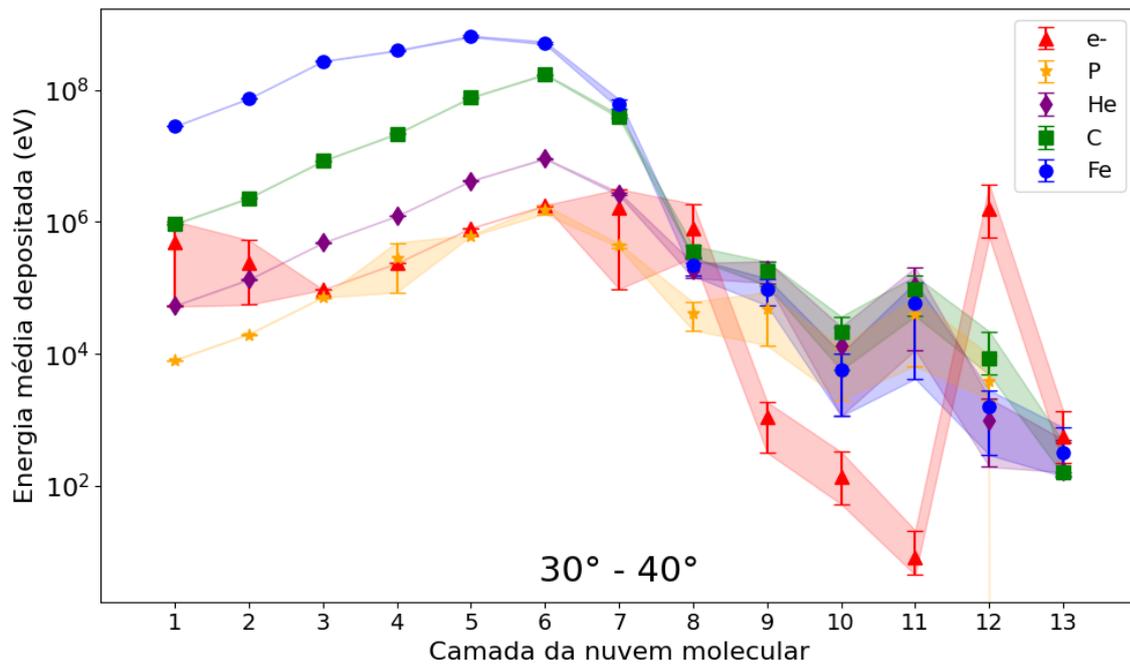


Figura 20 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 30.1° e 40°. Fonte: Autor.

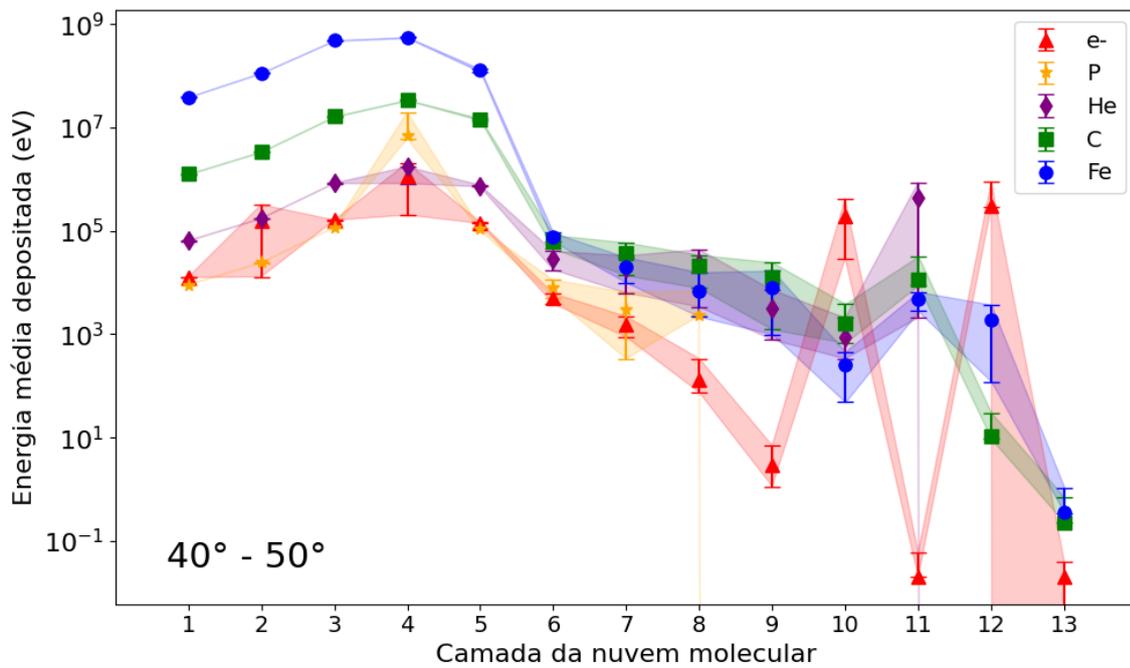


Figura 21 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 40.1° e 50°. Fonte: Autor.

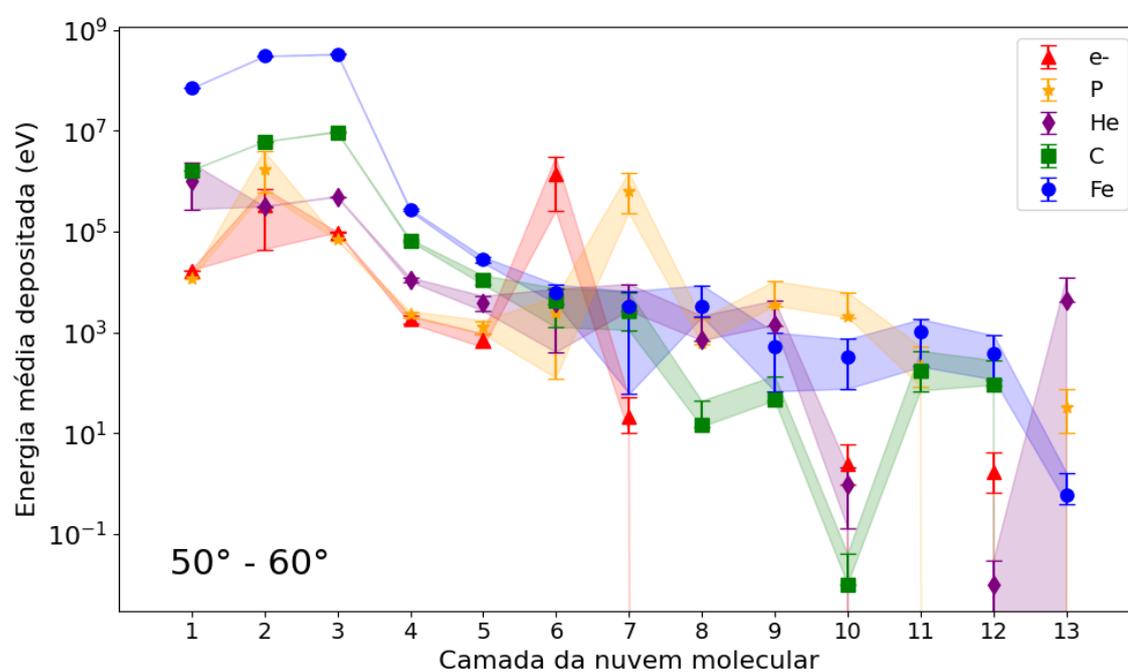


Figura 22 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 50.1° e 60°. Fonte: Autor.

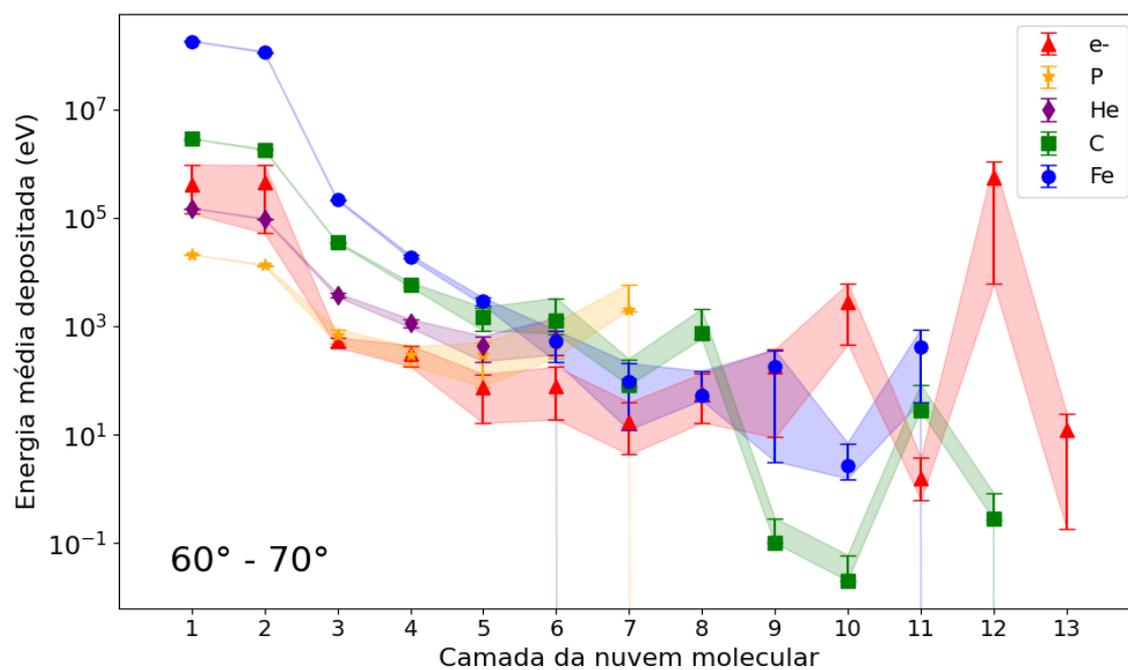


Figura 23 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 60.1° e 70°. Fonte: Autor.

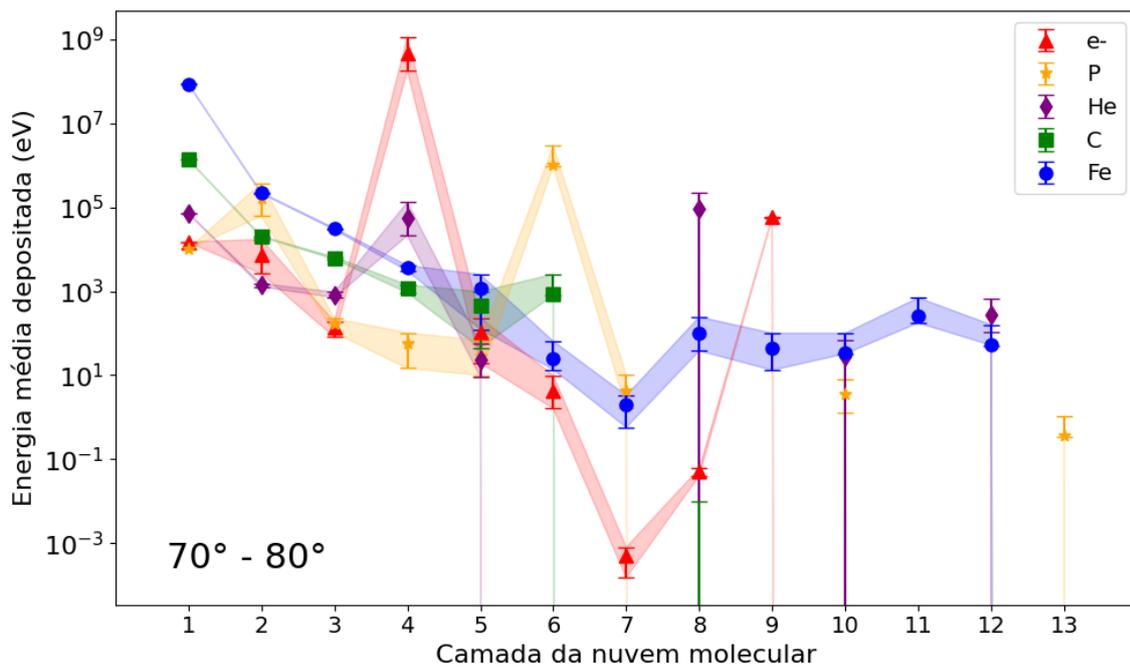


Figura 24 – Energia depositada média para ângulos de incidência entre 70.1° e 80°. Fonte: Autor.

quais a energia transferida para cada camada é menor em comparação a algumas camadas específicas [186].

Outro fator que pode justificar as flutuações no depósito médio de energia na camada 10 são os efeitos de atenuação. Nas diferentes camadas da nuvem molecular, a densidade varia, o que explica por que, nas camadas externas, as interações dos raios cósmicos são mais eficientes. Segundo [190], os grãos de poeira podem exercer um impacto significativo na deposição de energia. A poeira quente está associada às regiões externas da nuvem, enquanto os grãos de poeira frios estão ligados às regiões internas. Dados já disponíveis na literatura [151] para nuvens hipotéticas podem estar relacionados às flutuações de energia observadas na camada 10 mostrando que em alguns casos, regiões mais internas, os grãos de poeira podem ter temperaturas mais elevadas como o caso desta nuvem hipotética. As Figuras 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 mostram que na camada 10, houve uma diminuição no depósito médio de energia potencialmente causados pelos grãos de poeira, temperatura e até mesmo a densidade da camada específica.

A Figura 25 mostra a energia média depositada na nuvem em função da faixa de ângulo de incidência. Podemos observar que para raios cósmicos mais pesados o depósito de energia é maior e mais linear.

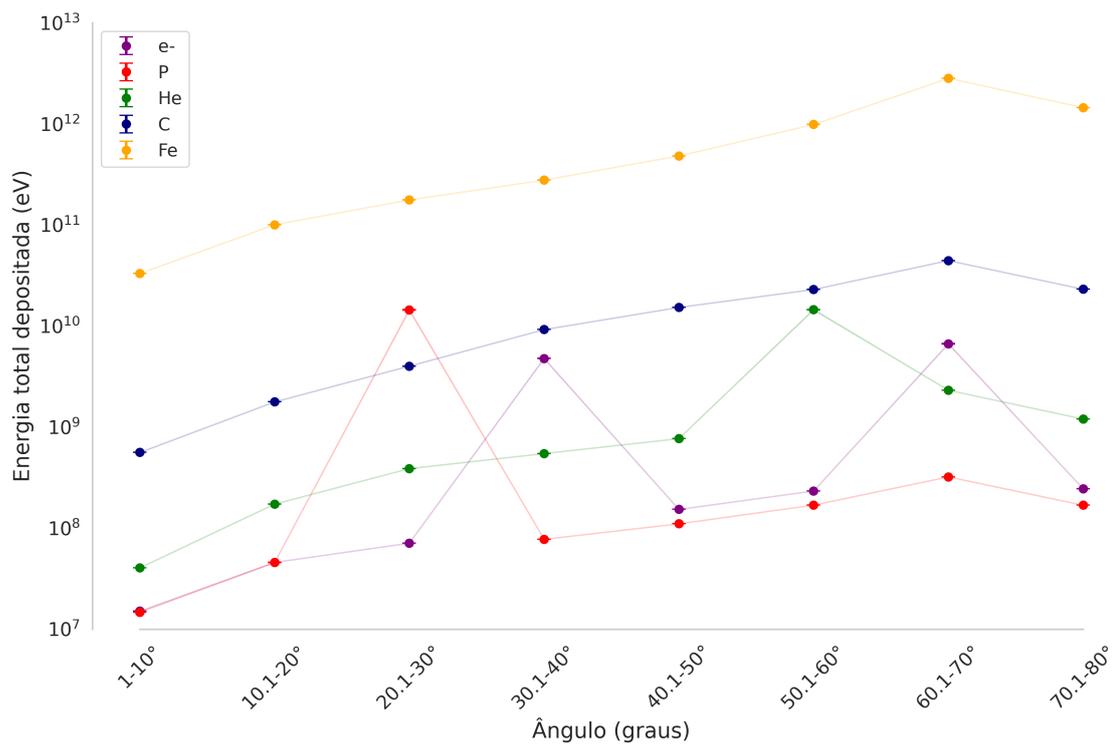


Figura 25 – Energia depositada por raios cósmicos na nuvem molecular para diferentes faixas de ângulo de incidência. Fonte: Autor.

## 7.2 Partículas Secundárias Produzidas e que Emergiram da Nuvem Molecular

Partículas secundárias apresentam uma taxa de perda de energia quase constante nas regiões mais externas da nuvem molecular, conforme mostrado em [10]. Elétrons secundários são as partículas mais comuns de serem observadas nas primeiras camadas da nuvem. À medida que a energia incidente aumenta, eles se tornam mais fáceis de serem observados, seguidos por uma alta quantidade de raios gama e prótons produzidos. Os elétrons geram fótons síncrotrons enquanto se movem no interior da nuvem molecular. Entretanto, a densidade desses fótons síncrotrons na região da nuvem é baixa devido ao fraco campo magnético da nuvem. Como resultado, o processo de espalhamento Compton inverso (que envolve a interação entre fótons e elétrons) não é significativo nesse ambiente.

Nas Figuras 26, 27, 28, 29 e 30 mostramos a relação entre a frequência e a quantidade de partículas produzidas para cinco diferentes raios cósmicos primários, cada um com 100 mil eventos simulados. A frequência, representada no eixo y, refere-se ao número de eventos simulados que resultaram na produção de uma determinada quantidade de partículas secundárias, como neutrinos, pósitrons, elétrons, fótons gama, entre outros. Já o eixo x apresenta a quantidade de partículas secundárias geradas por evento. Esses gráficos permitem observar como a interação dos raios cósmicos primários com a nuvem

molecular resulta em diferentes distribuições de partículas secundárias, destacando tanto a variedade de partículas produzidas quanto a frequência com que diferentes quantidades são geradas a partir dos eventos simulados.

Conforme a energia incidente aumenta, maior é a quantidade de partículas secundárias produzidas na nuvem molecular, e quanto mais pesado for o raio cósmico primário, maior é também a quantidade de partículas secundárias produzidas (vide Figuras 26, 27, 28, 29, 30).

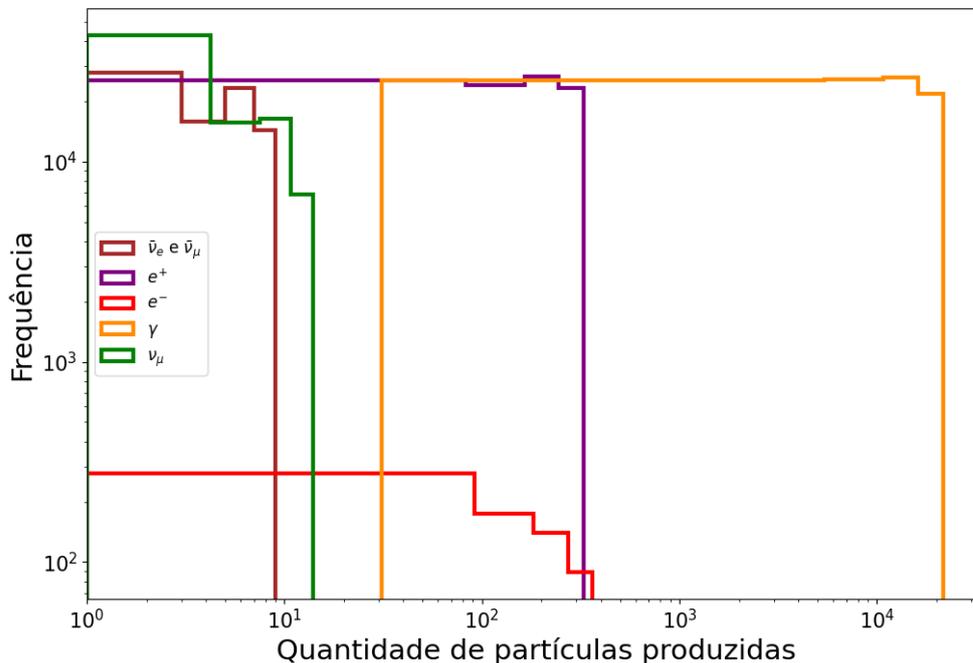


Figura 26 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para elétrons como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

A partir das análises realizadas para cada raio cósmico primário, observamos também uma mudança na quantidade de partículas que foram absorvidas, transmitidas e refletidas. Quanto mais leve for o raio cósmico primário, como elétrons, prótons e núcleos de He, menor é a quantidade de partículas absorvidas pela nuvem, e, conseqüentemente maior é a quantidade de partículas transmitidas e refletidas. Já para primários mais pesados, como núcleos de C e Fe, observamos uma quantidade maior de partículas absorvidas, e, portanto, uma quantidade menor de partículas transmitidas e refletidas (veja a Tabela 3).

Os raios cósmicos, compostos por núcleos mais pesados, ao adentrarem a nuvem molecular, colidem com as moléculas da nuvem, produzindo uma grande quantidade de partículas secundárias, como píons, múons, elétrons, pósitrons e fótons. A energia dessas partículas secundárias depende da energia do raio cósmico primário, da densidade e composição da nuvem molecular.

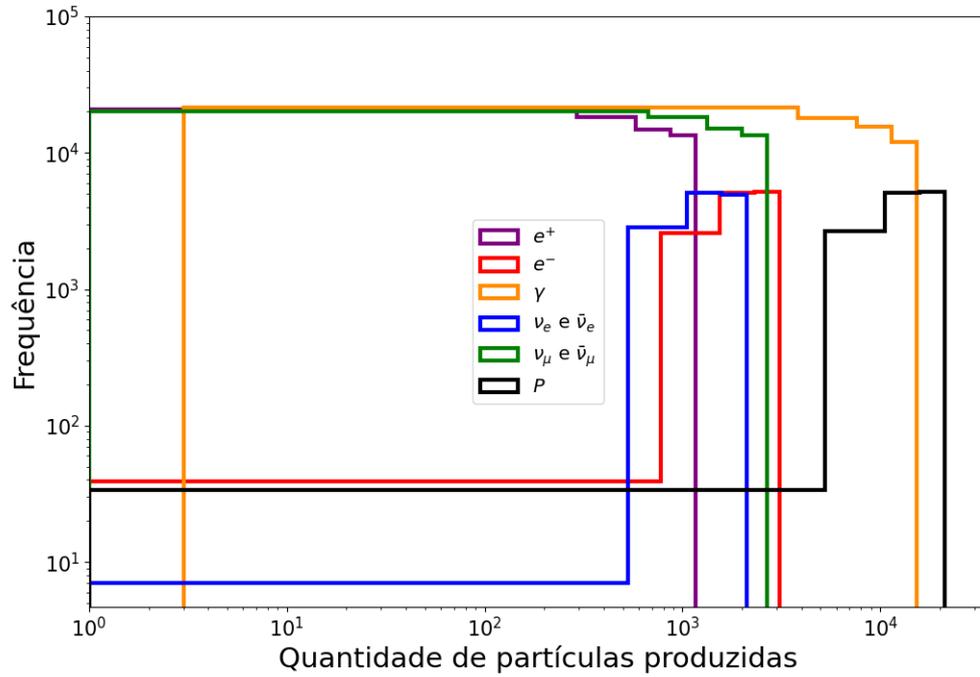


Figura 27 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para prótons como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

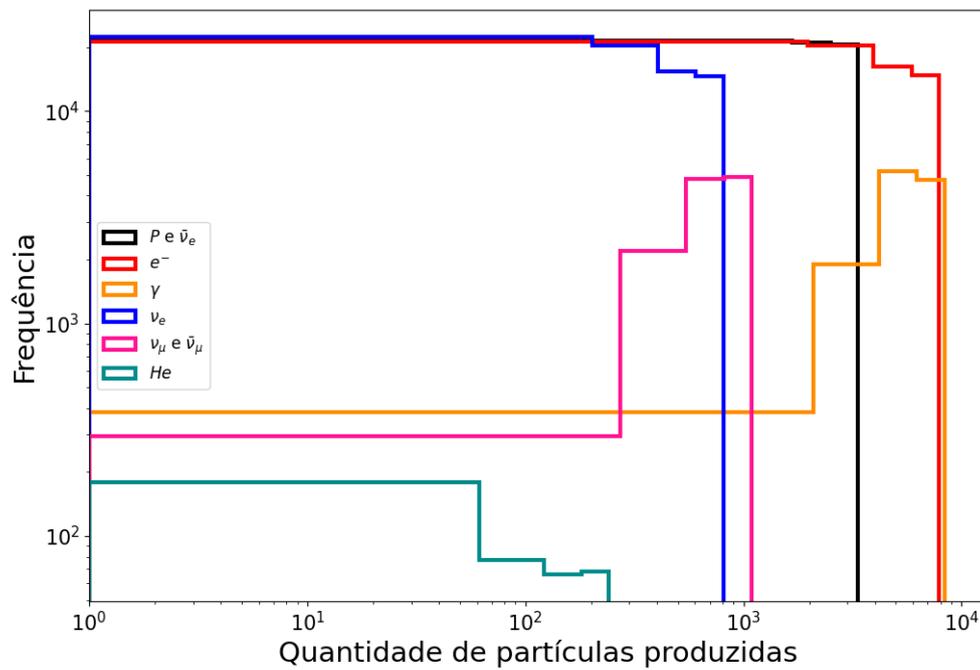


Figura 28 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para núcleos de He como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

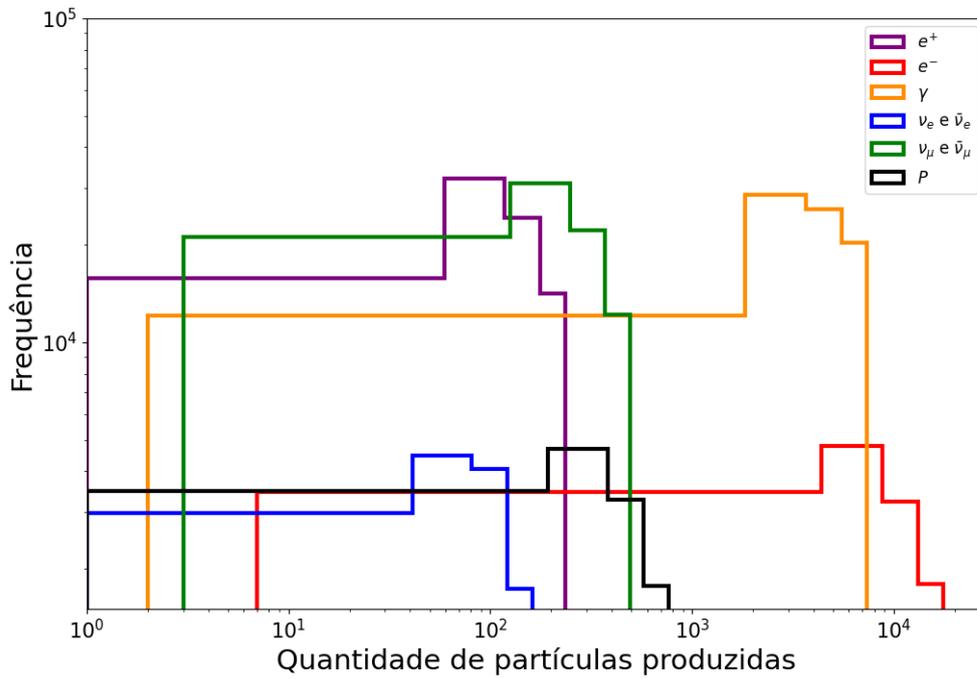


Figura 29 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para núcleos de  $C$  como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

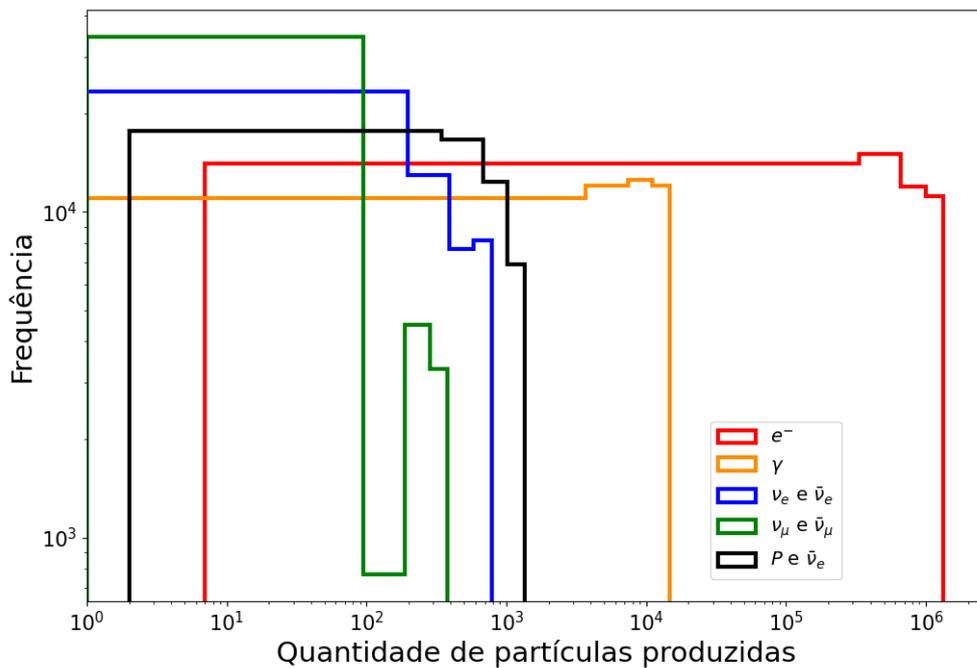


Figura 30 – Quantidade de partículas secundárias produzidas e que emergiram da nuvem molecular para núcleos de  $Fe$  como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

Partículas absorvidas, transmitidas e refletidas			
RC Primário	Absorvidas	Transmitidas	Refletidas
Elétron	0.83 %	49.0 %	50.0 %
Próton	8.5 %	46.0 %	46.0 %
Hélio	12.0 %	44.0 %	44.0 %
Carbono	15.0 %	43.0 %	42.0 %
Ferro	41.0 %	30.0 %	30.0 %

Tabela 3 – Partículas absorvidas, transmitidas e refletidas proveniente de raios cósmicos. Fonte: Autor.

A Figura 31 mostra as partículas que escaparam da nuvem a partir de prótons como raios cósmicos primários. Algumas partículas secundárias são mais comuns de serem produzidas e emergirem da nuvem, como observado; outras, como núcleos mais pesados e antipróton, escapam em uma frequência menor.

```

Partículas que saíram da Nuvem Molecular e energia média:
anti_nu_e: 8198 Emean = 83.5 MeV ( 22.2 keV --> 17 GeV)
anti_nu_mu: 10472 Emean = 245 MeV ( 677 keV --> 24.8 GeV)
anti_proton: 1 Emean = 14.8 GeV ( 14.8 GeV --> 14.8 GeV)
e+: 4633 Emean = 232 MeV ( 97.3 keV --> 20.6 GeV)
e-: 12072 Emean = 57.8 MeV ( 1.02 keV --> 11.9 GeV)
gamma: 57897 Emean = 74.1 MeV ( 1.01 keV --> 90.7 GeV)
nu_e: 8167 Emean = 196 MeV ( 228 keV --> 17.7 GeV)
nu_mu: 10472 Emean = 221 MeV ( 1.58 MeV --> 44.9 GeV)
proton: 82156 Emean = 4.19 GeV ( 367 keV --> 8.37 TeV)
triton: 1 Emean = 150 MeV ( 150 MeV --> 150 MeV)

```

Figura 31 – Partículas que emergiram da nuvem a partir de próton como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

As Figuras 32, 33, 34, 35, 36 mostram as distribuições em energia das partículas que emergiram da nuvem para diferentes primários. Foram analisadas as partículas mais prováveis que emergem da nuvem, como  $e^-$ ,  $e^+$ , raios gama (provenientes do decaimento de  $\pi^0$ ), neutrinos muônicos e eletrônicos (provenientes do decaimento de  $\pi^\pm$  e  $\mu^\pm$ ).

Os neutrinos possuem a capacidade extraordinária de atravessar a matéria sem sofrer deflexão na sua trajetória. Através da simulação com o Geant4, conseguimos obter uma variedade de dados que mostram neutrinos provenientes do decaimento de partículas secundárias. Para raio cósmico primário de qualquer composição química, observamos a produção de neutrinos e antineutrinos eletrônicos ( $\nu_e$  e  $\bar{\nu}_e$ ), assim como muônicos ( $\nu_\mu$  e  $\bar{\nu}_\mu$ ). Além disso, vale ressaltar que os neutrinos do tau não foram observados em nenhum momento dentro das nuvens moleculares após o decaimento dos raios cósmicos. Segundo [107], os neutrinos do tau são muito mais difíceis de serem produzidos do que os eletrônicos e muônicos, o que dificulta sua detecção, como demonstrado pelo observatório IceCube localizado na Antártida.

Outro resultado interessante dessa investigação é a energia média dos neutrinos eletrônicos e muônicos que saíram da nuvem para primários de núcleos mais pesados.

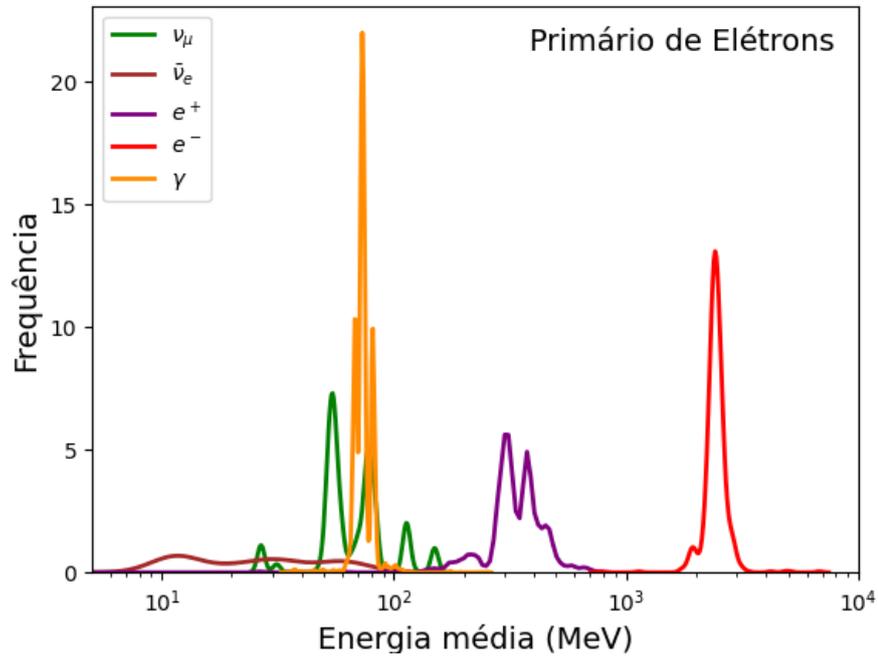


Figura 32 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por elétrons. Fonte: Autor.

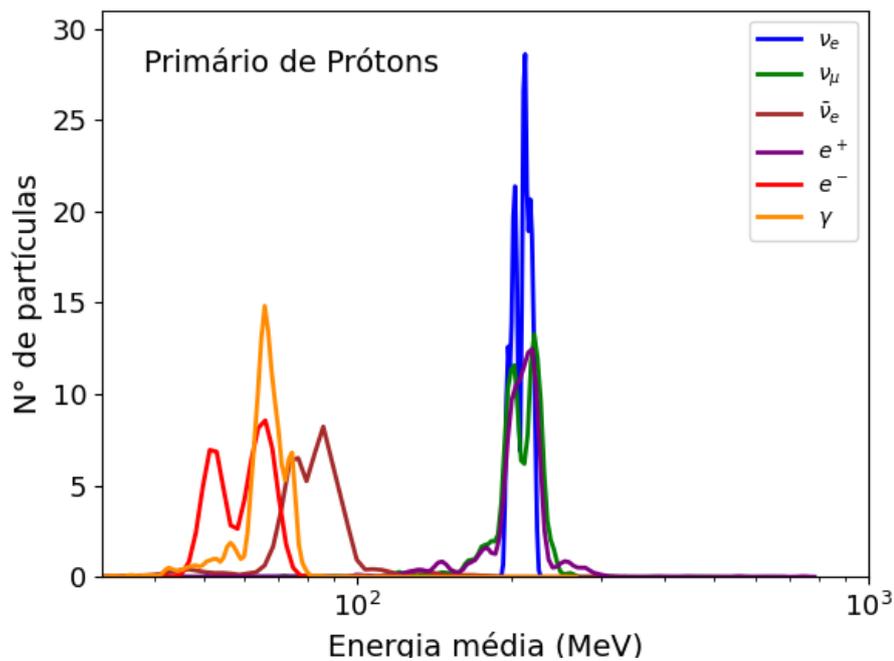


Figura 33 – Distribuição em energia das partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por prótons. Fonte: Autor.

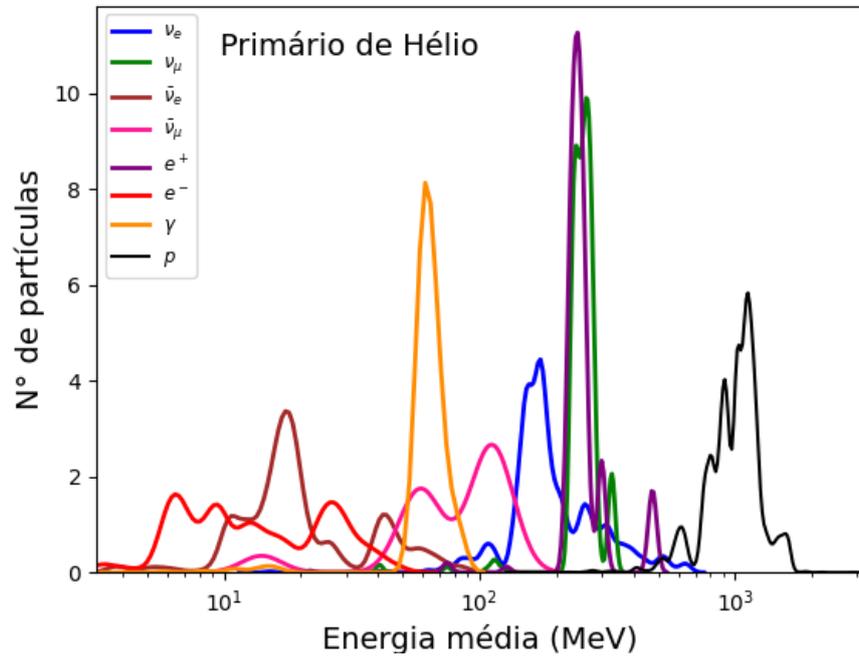


Figura 34 – Distribuição em energia das partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por núcleos de He. Fonte: Autor.

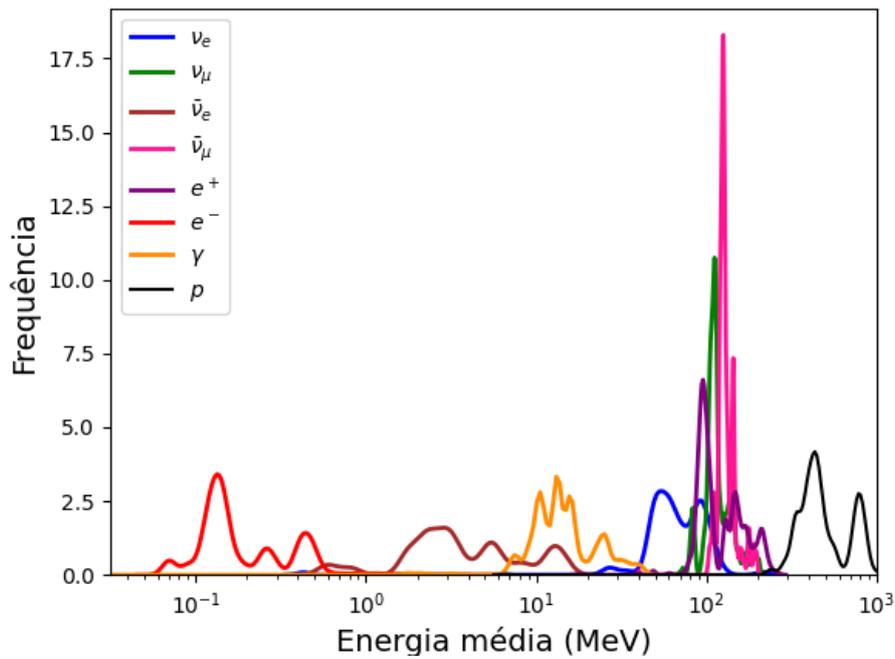


Figura 35 – Distribuição em energia das partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por núcleos de C. Fonte: Autor.

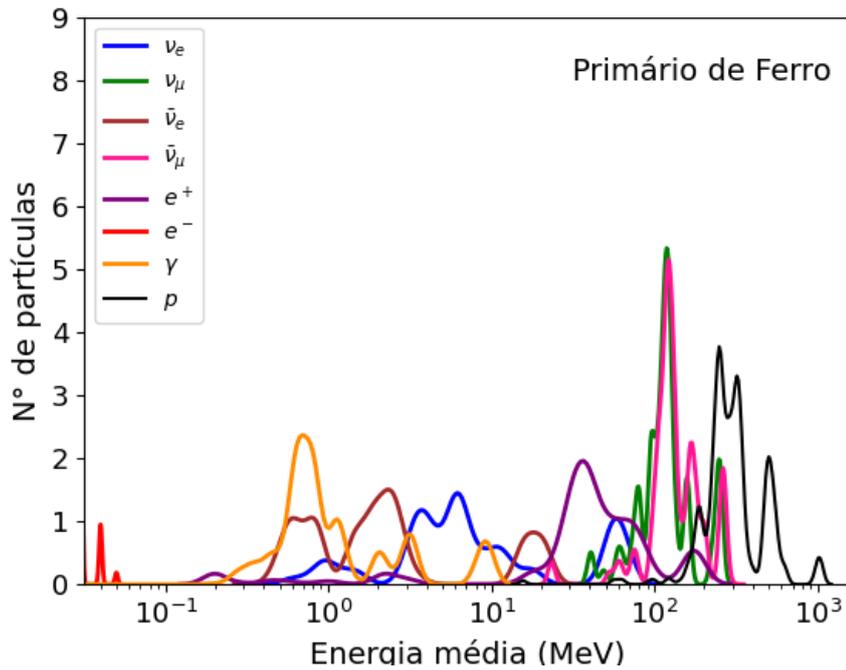


Figura 36 – Distribuição em energia das partículas que emergiram da nuvem molecular para raios cósmicos compostos por núcleos de Fe. Fonte: Autor.

Observamos que são bem menores do que os raios cósmicos com núcleos mais leves. A Tabela 4 mostra a energia média dos neutrinos produzidos de diferentes sabores para raio cósmico primário como próton e núcleo de Fe.

Energia média dos neutrinos a partir de raio cósmicos primário leve e pesado		
neutrinos	Próton	Ferro
$\nu_e$	196 MeV	34 MeV
$\nu_\mu$	221 MeV	175 MeV
$\bar{\nu}_e$	83.5 MeV	10.4 MeV
$\bar{\nu}_\mu$	245 MeV	188 MeV

Tabela 4 – Comparação da energia média de neutrinos de diferentes sabores produzidos por raios cósmicos como próton e núcleo de Fe. Fonte: Autor.

Existem diversas análises que podemos realizar quando se trata de neutrinos. As informações que temos são suficientes para sugerir que as nuvens moleculares também são candidatas a fontes de neutrinos ( $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$ ,  $\nu_\mu$  e  $\bar{\nu}_\mu$ ). Os resultados apresentados aqui são referentes a uma nuvem molecular hipotética, onde podemos analisar como os resultados obtidos podem ser comparados a nuvens reais, como a nuvem de Perseus discutida nas próximas seções.

## 7.3 Interação de Raios Cósmicos com a Nuvem Molecular de Perseus e Deposição de Energia

Mostramos anteriormente que a energia depositada na nuvem molecular depende de fatores como a composição química e a densidade das nuvens moleculares. Para a nuvem de Perseus, apresentamos na Figura 37 as distribuições das energias depositadas por diferentes raios cósmicos em cada uma das camadas<sup>1</sup>. É possível observar que os valores médios de energia depositada aumentam gradativamente conforme o aumento do número atômico da partícula primária, o que está de acordo com os resultados obtidos para a nuvem hipotética.

A energia média depositada oferece uma visão geral de como as partículas primárias interagem com a nuvem molecular. Observamos que, na nuvem molecular hipotética, a energia média depositada é significativamente maior. Esse comportamento ocorre devido às variações na composição química da nuvem, tanto em porcentagens quanto pela presença de hélio em estado gasoso na simulação. Além disso, a densidade da nuvem simulada é consideravelmente menor em comparação com casos gerais. Isso implica que partículas com maior carga elétrica perdem muito mais energia por unidade de distância percorrida do que aquelas com menor carga.

Assim como analisado na Seção 7.1 sobre a interação de raios cósmicos primários com uma nuvem molecular hipotética, investigamos e analisamos como as partículas primárias depositam energia à medida que penetram nas camadas mais densas da nuvem molecular de Perseus (veja a Figura 13, que mostra a geometria da nuvem de Perseus no Geant4). Ao analisar a energia média depositada em função do ângulo de incidência (mesmos ângulos de incidência da nuvem molecular hipotética), podemos observar o comportamento dos raios cósmicos primários de maneira semelhante ao estudo realizado anteriormente.

As Figuras 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45, ilustram a energia média depositada para ângulos de incidência variando de 10 em 10 graus, considerando raios cósmicos com diferentes composições químicas (elétrons, prótons, núcleos de He, C e Fe). As bandas coloridas no gráfico correspondem ao erro de  $1\sigma$ , as quais são regiões que incluem 68% de todos os pontos de dados em curvas de distribuição normal.

Nas camadas mais externas, o depósito de energia apresenta um comportamento linear. Contudo, à medida que o ângulo de incidência aumenta, o grau de incerteza no depósito de energia também cresce, especialmente para partículas primárias mais pesadas, como núcleos de C e Fe. Vale destacar que, na nuvem molecular hipotética

---

<sup>1</sup> As linhas sólidas vermelhas estão mais comprimidas devido à menor quantidade de energia depositada em comparação com o observado na análise de uma nuvem molecular hipotética anterior, já que a densidade da nuvem de Perseus é significativamente menor. Devido à esse menor depósito médio, a energia está em unidades de MeV.

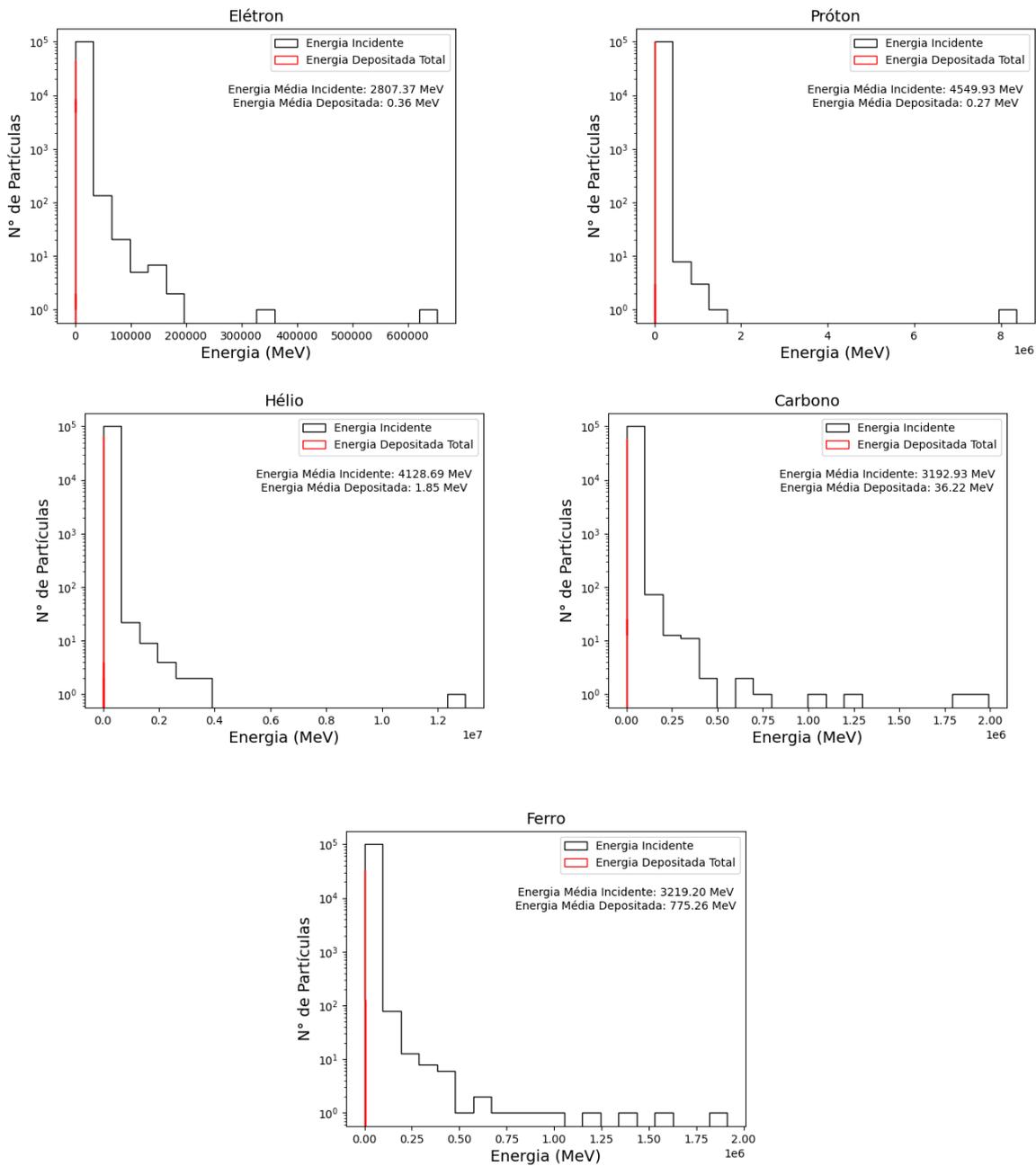


Figura 37 – Distribuição da energia incidente e depositada por partículas de raio cósmico primárias na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

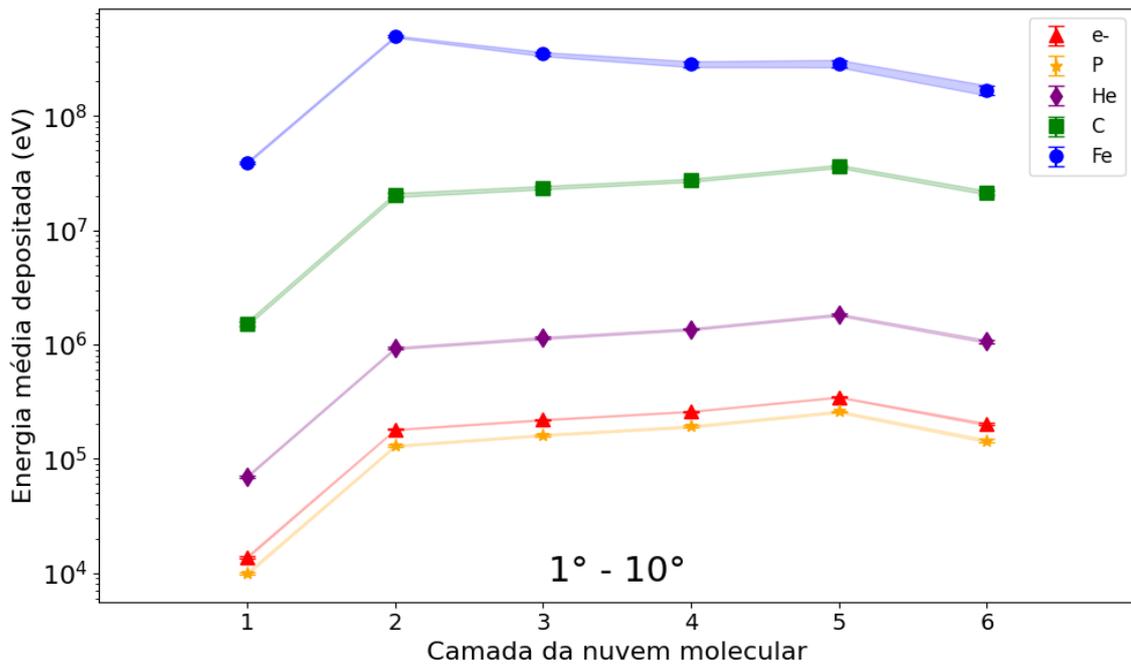


Figura 38 – Energia depositada média, por diferentes primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 1° e 10° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

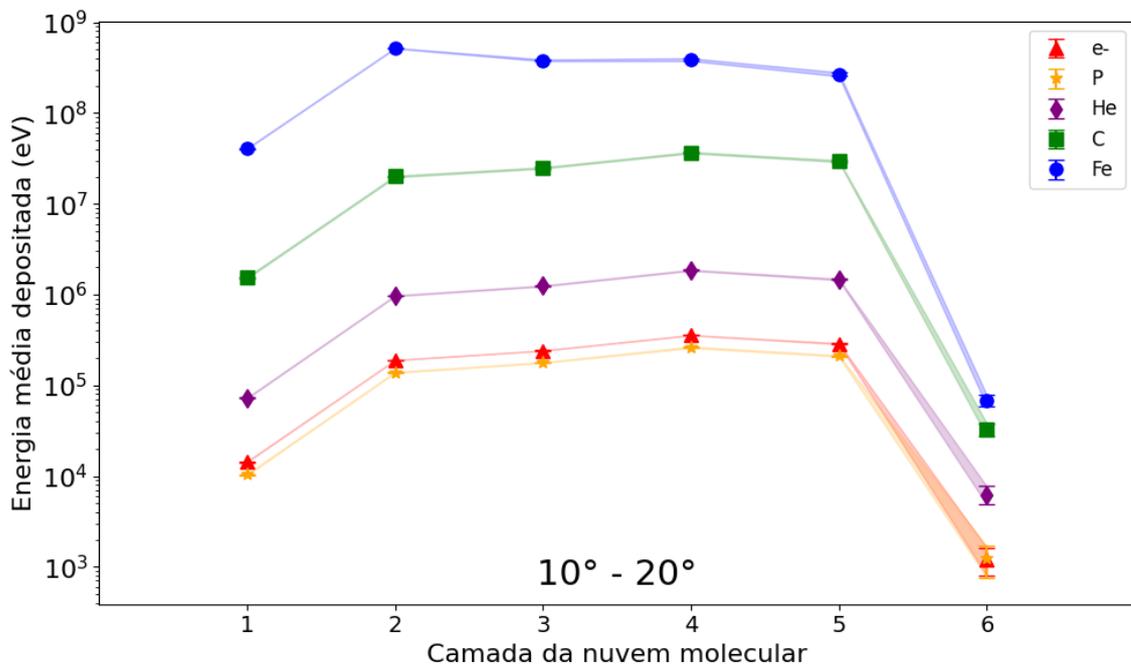


Figura 39 – Energia depositada média, por diferentes primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 10.1° e 20° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

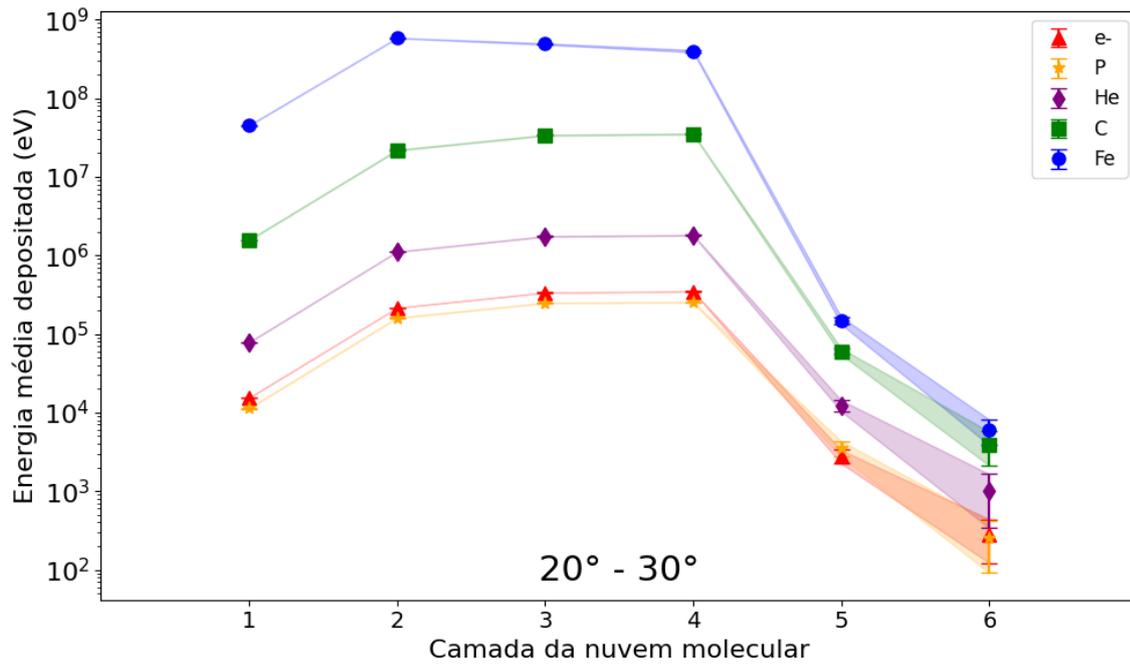


Figura 40 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 20.1° e 30° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

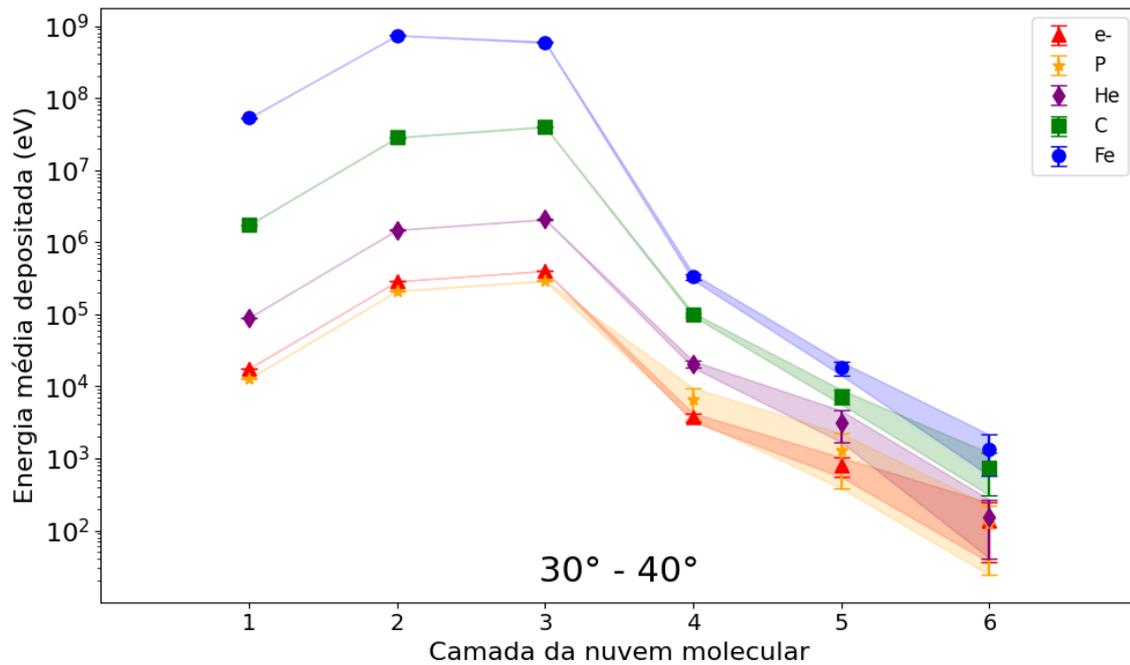


Figura 41 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 30.1° e 40° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

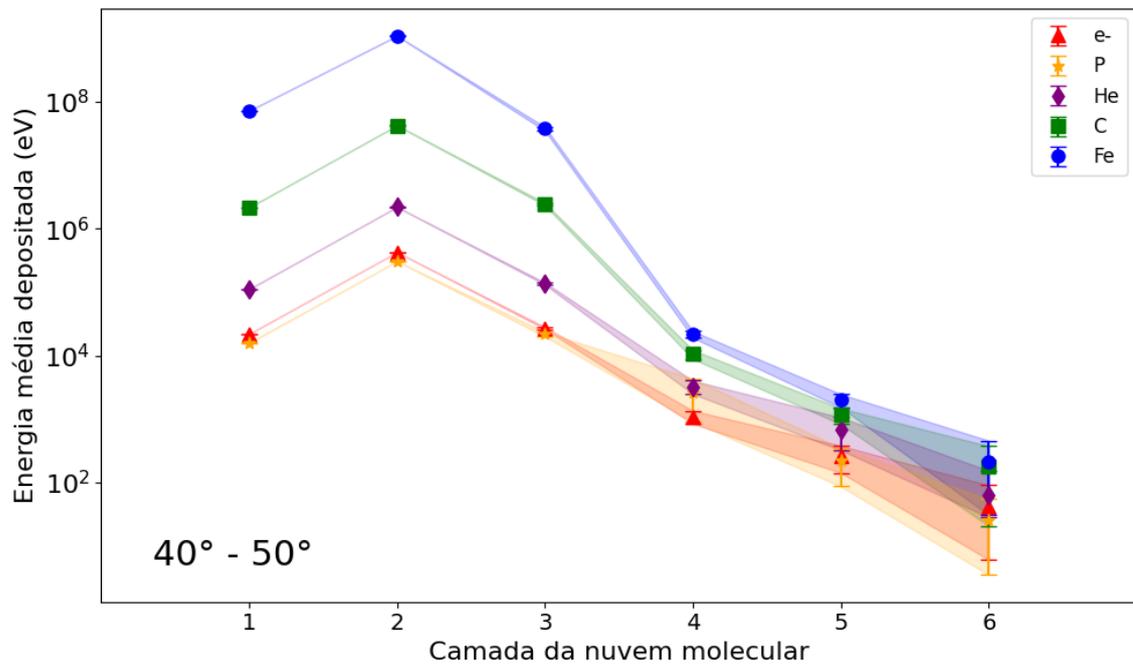


Figura 42 – Energia depositada média, por diferentes primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 40.1° e 50° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

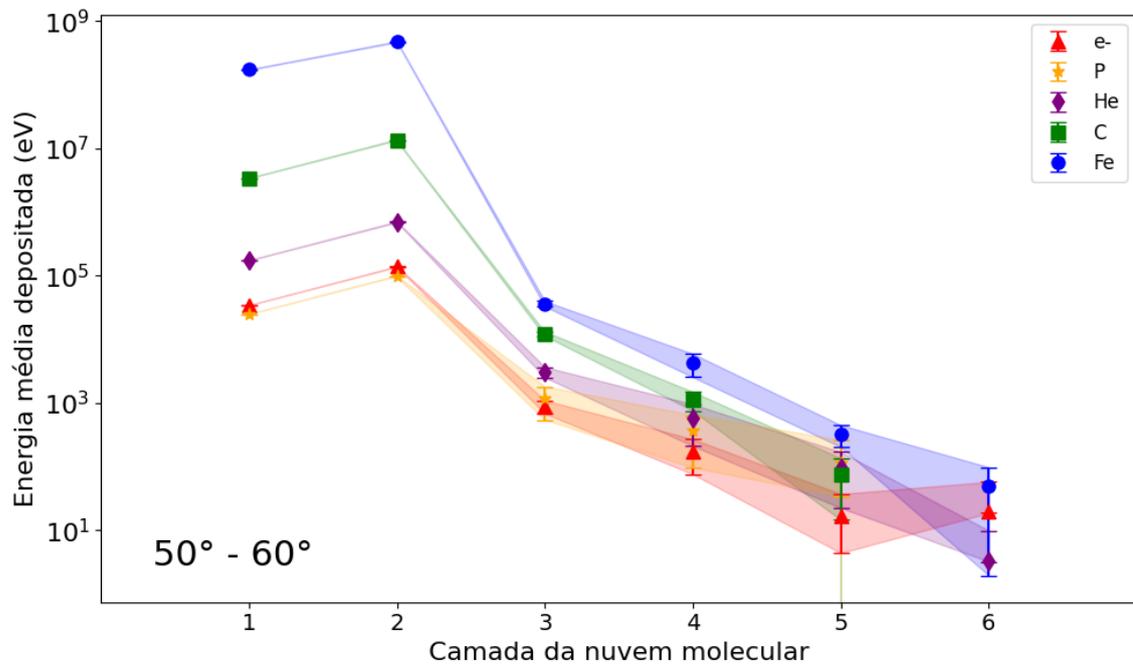


Figura 43 – Energia depositada média, por diferentes primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 50.1° e 60° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

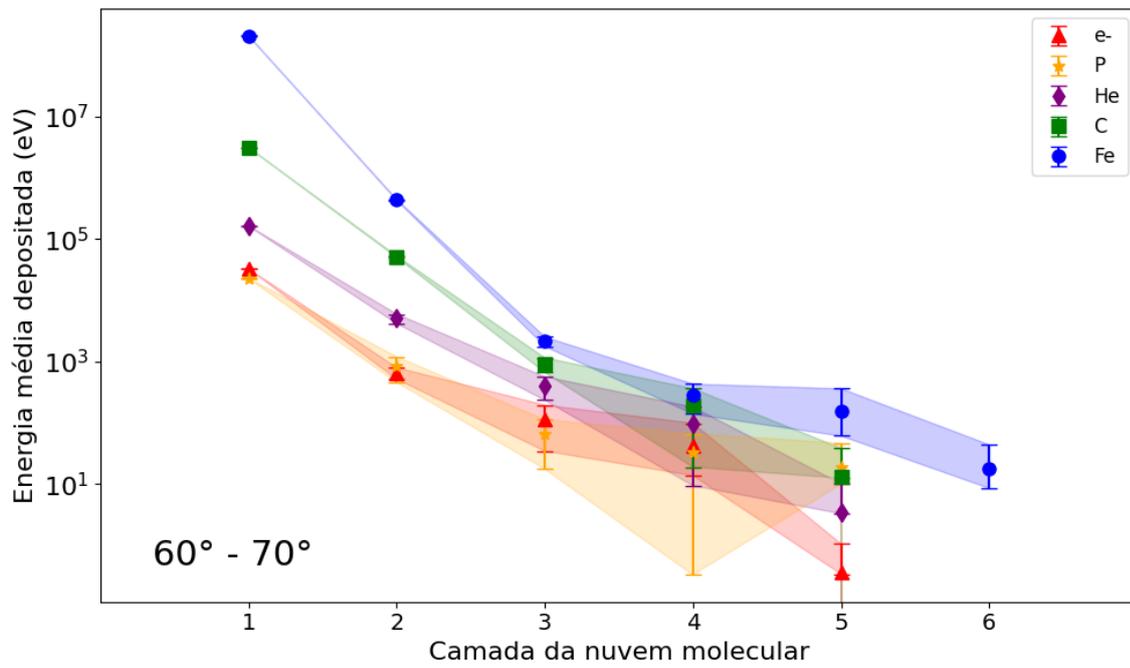


Figura 44 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 60.1° e 70° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

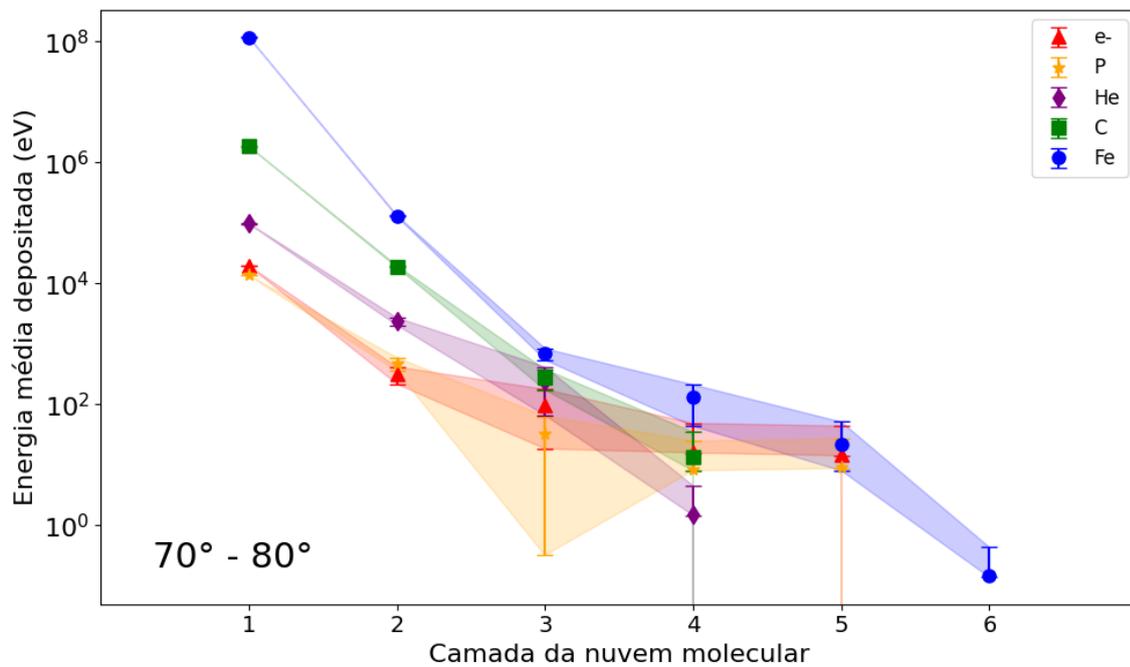


Figura 45 – Energia depositada média, por diferente primários de raios cósmicos, para ângulos de incidência entre 70.1° e 80° na nuvem molecular de Perseus. Fonte: Autor.

simulada anteriormente, as camadas mais densas apresentaram um grau de incerteza consideravelmente maior em relação à nuvem molecular de Perseus. Isso ocorre porque, na análise atual, consideramos apenas seis camadas, enquanto na nuvem hipotética trabalhamos com 13 camadas concêntricas e maior densidade que afetaram o grau de incerteza da energia média depositada.

É importante ressaltar que, embora muitas nuvens moleculares compartilhem características como composição química e temperatura, diferenças significativas na densidade podem impactar diretamente o depósito de energia e, conseqüentemente, a formação de partículas secundárias em seu interior. Segundo [191], essas variações de densidade entre nuvens moleculares desempenham um papel crucial nesses processos.

Na Figura 46, analisamos a energia média depositada na nuvem molecular de Perseus para as mesmas faixas de ângulos utilizadas na nuvem molecular hipotética. Observa-se que partículas mais pesadas depositam mais energia e o comportamento do depósito de energia é praticamente linear, independente do número atômico da partícula primária.

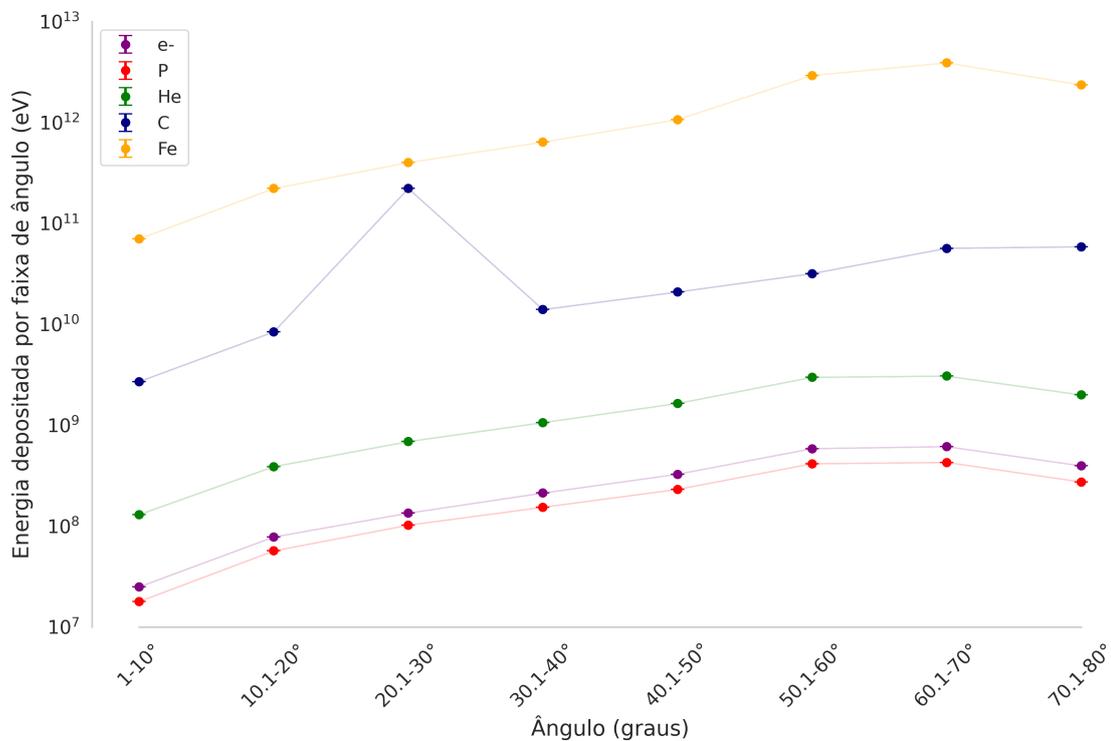


Figura 46 – Energia depositada por diferentes tipos de raio cósmico na nuvem molecular de Perseus para diferentes faixas de ângulo de incidência. Fonte: Autor.

## 7.4 Partículas Secundárias que Emergem da Nuvem Molecular de Perseus

As partículas secundárias produzidas em uma nuvem molecular dependem diretamente da energia incidente: quanto maior a energia incidente, maior será a quantidade de partículas secundárias geradas. Assim como em qualquer nuvem molecular, os elétrons são os secundários mais frequentemente observados nas camadas iniciais. Dependendo da energia incidente, também pode ser detectada uma quantidade significativa de raios gama e prótons produzidos na nuvem.

As partículas secundárias mais comuns na nuvem molecular estão representadas nas Figuras 47, 48, 49, 50, 51. Nelas, é possível observar uma diferença no fluxo das partículas, especialmente para os elétrons, quando comparadas com a nuvem molecular hipotética analisada na Seção 7.2.

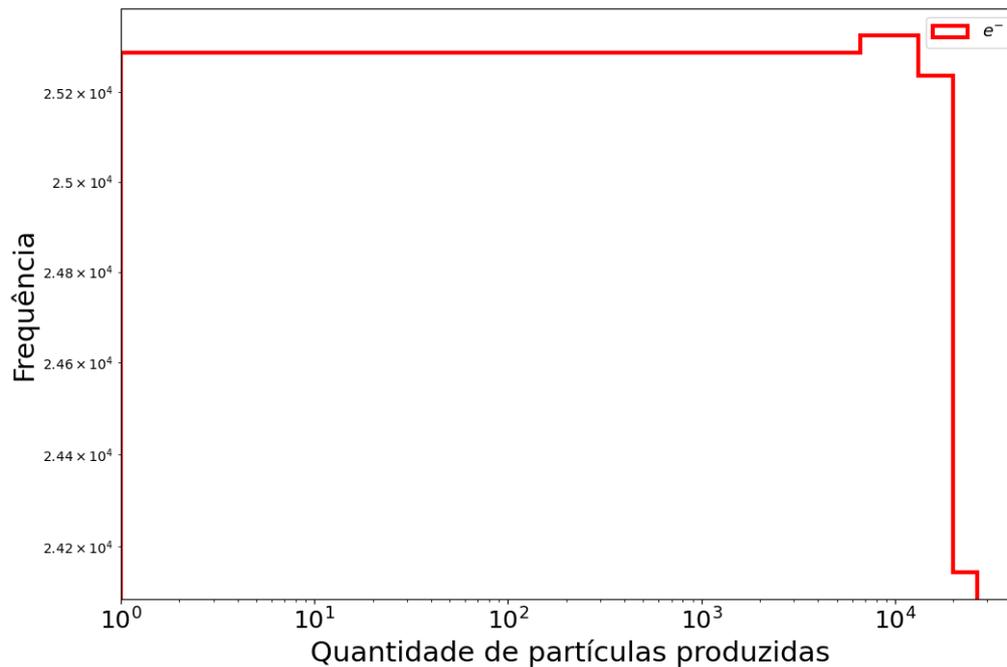


Figura 47 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para elétrons como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

Assim como analisamos as partículas que emergem de uma nuvem molecular hipotética, também investigamos como as partículas emergem da nuvem molecular de Perseus, considerando todas as informações implementadas no Geant4. De acordo com [151], elétrons são detectados em quase todas as regiões da nuvem molecular, seguidos por raios gama. Na Figura 52, observamos uma alta quantidade de raios gama e elétrons

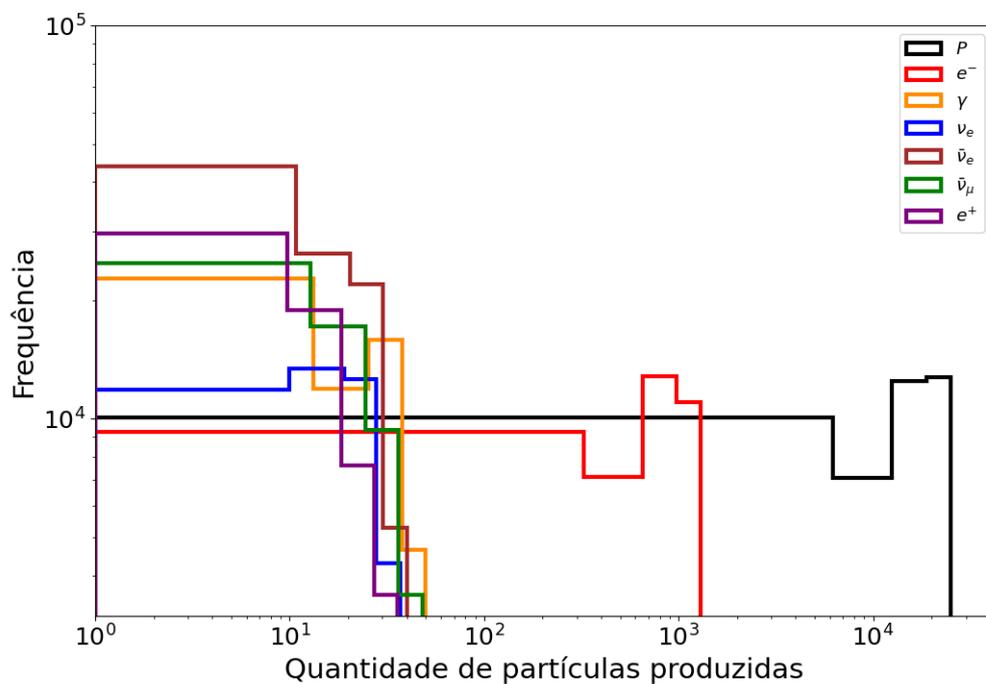


Figura 48 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para prótons como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

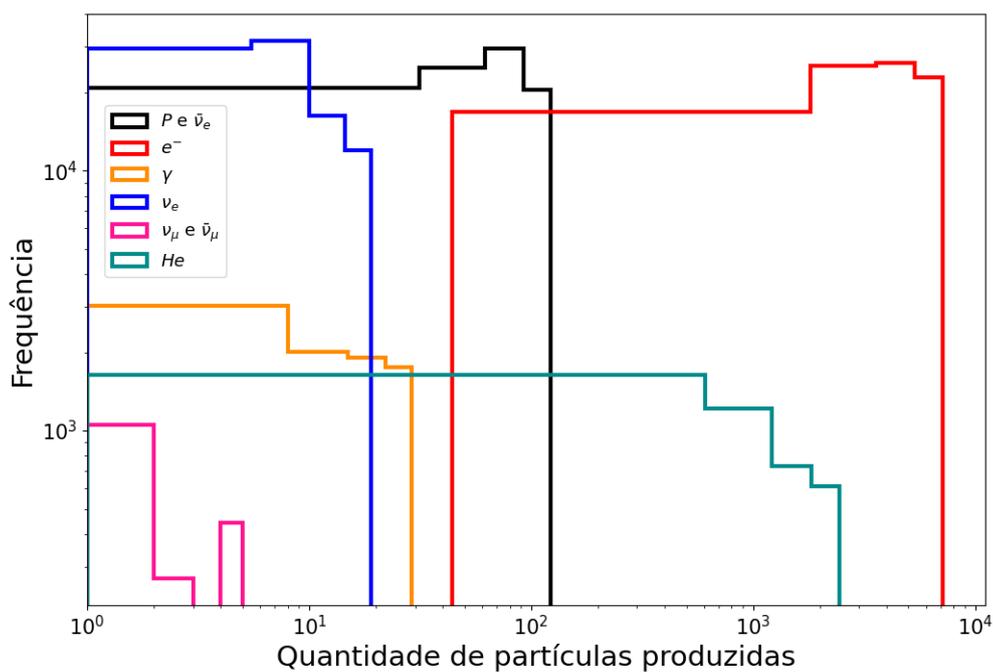


Figura 49 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para núcleos de He como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

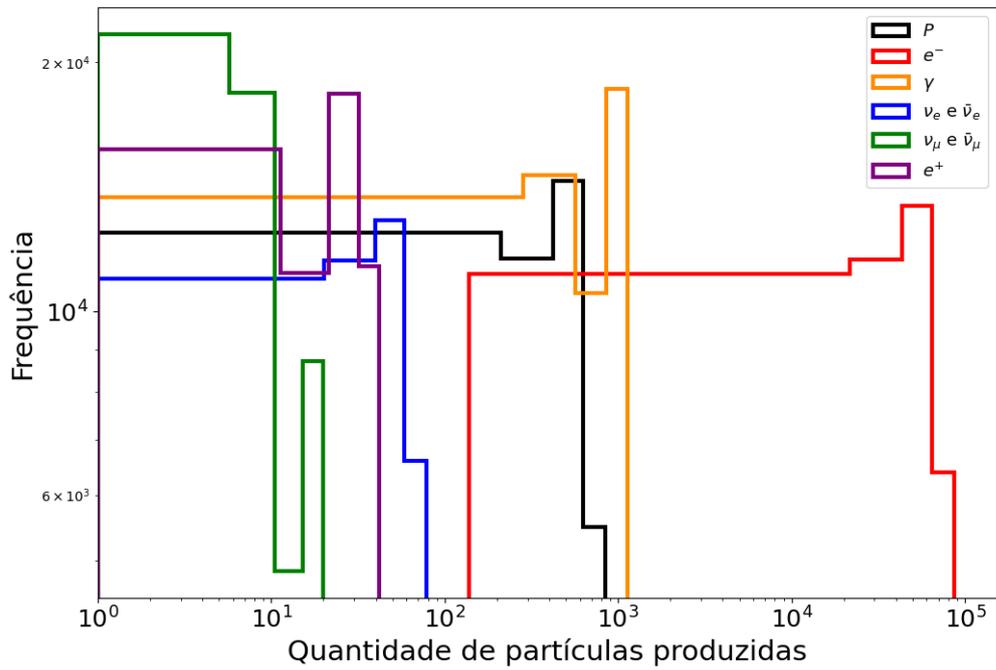


Figura 50 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para núcleos de C como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

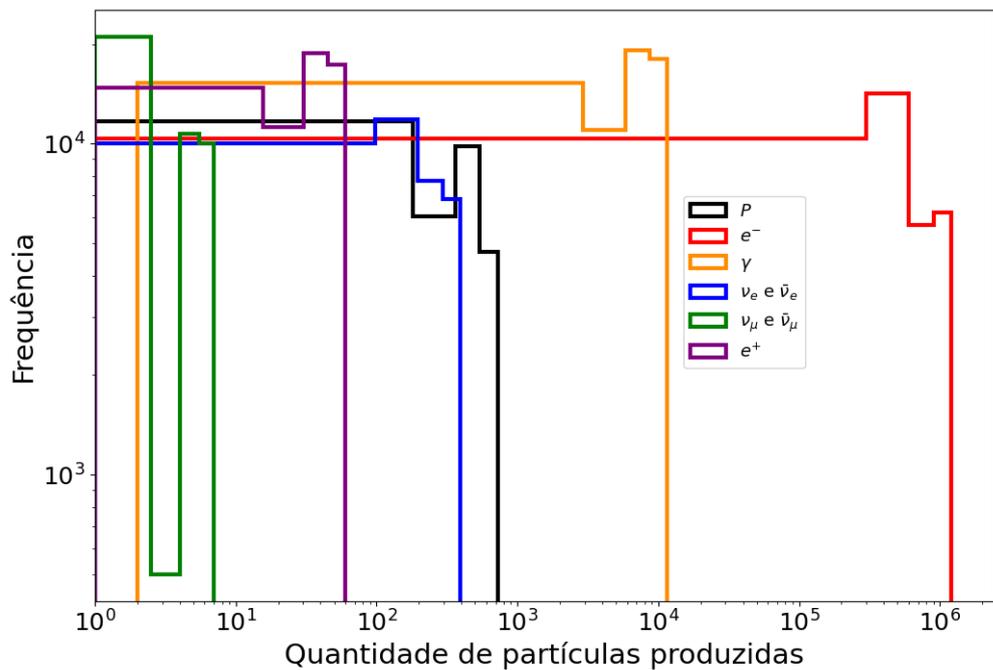


Figura 51 – Partículas produzidas e que emergiram da nuvem molecular de Perseus para núcleos de Fe como raio cósmico primário. Fonte: Autor.

emergindo da nuvem, enquanto na Figura 32, também foram detectados neutrinos e pósitrons.

Para partículas secundárias provenientes de prótons como primários na nuvem molecular de Perseus, notamos a presença das mesmas partículas observadas na nuvem hipotética, porém com frequências distintas devido às diferenças nos componentes físico-químicos das nuvens (compare as Figuras 33 e 53).

Ao comparar as partículas produzidas nas duas nuvens para núcleos de He como primários, é interessante notar que, na nuvem de Perseus, praticamente não houve emissão de raios gama. Uma possível explicação está relacionada à quantidade reduzida de píons neutros produzidos na nuvem. Com um diâmetro de 153 parsecs, a nuvem molecular de Perseus possui menor densidade, o que reduz a probabilidade de interação entre partículas primárias e a matéria, diminuindo a produção de píons (compare as Figuras 34 e 54).

Para primários como núcleos de C, o alto fluxo de  $\bar{\nu}_\mu$  observado na nuvem hipotética contrasta com o fluxo reduzido na nuvem de Perseus, além da ausência de raios gama. Isso reforça a hipótese de que as diferentes características das nuvens impactam significativamente a produção de píons. Esses fluxos podem ser comparados nas Figuras 35 e 55.

No caso para primários como núcleos de Fe, há uma diferença notável na quantidade de elétrons produzidos. Enquanto o fluxo de elétrons na nuvem hipotética que pode ser observado na Figura 36 é menor, ele é significativamente maior na nuvem molecular de Perseus ( veja a Figura 56). As equações 4.4, 4.5 e 4.6 indicam que a produção de píons está diretamente relacionada à menor quantidade de neutrinos eletrônicos e muônicos, seus respectivos antineutrinos, e raios gama na nuvem molecular de Perseus.

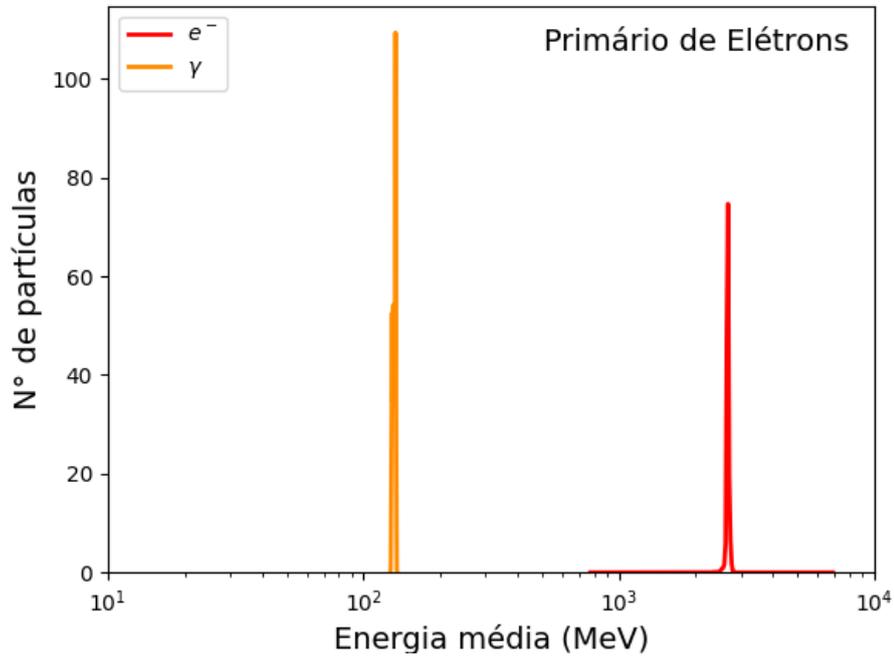


Figura 52 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por elétron. Fonte: Autor.

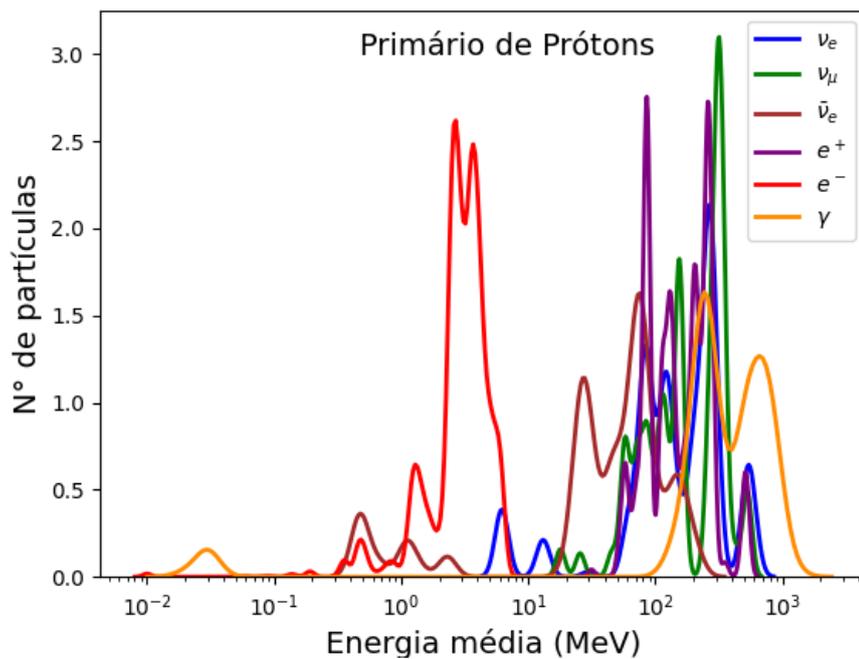


Figura 53 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por prótons. Fonte: Autor.

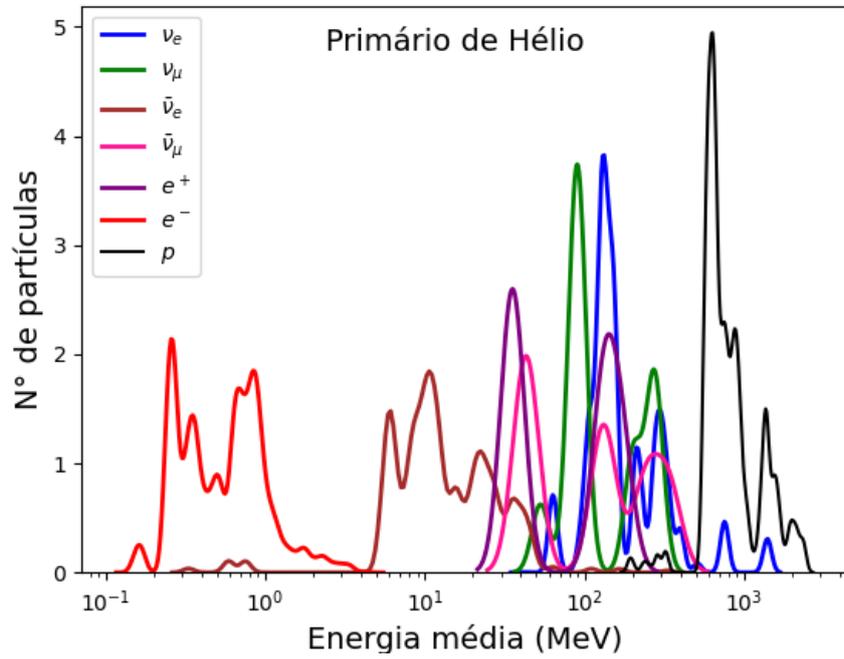


Figura 54 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por núcleos de He. Fonte: Autor.

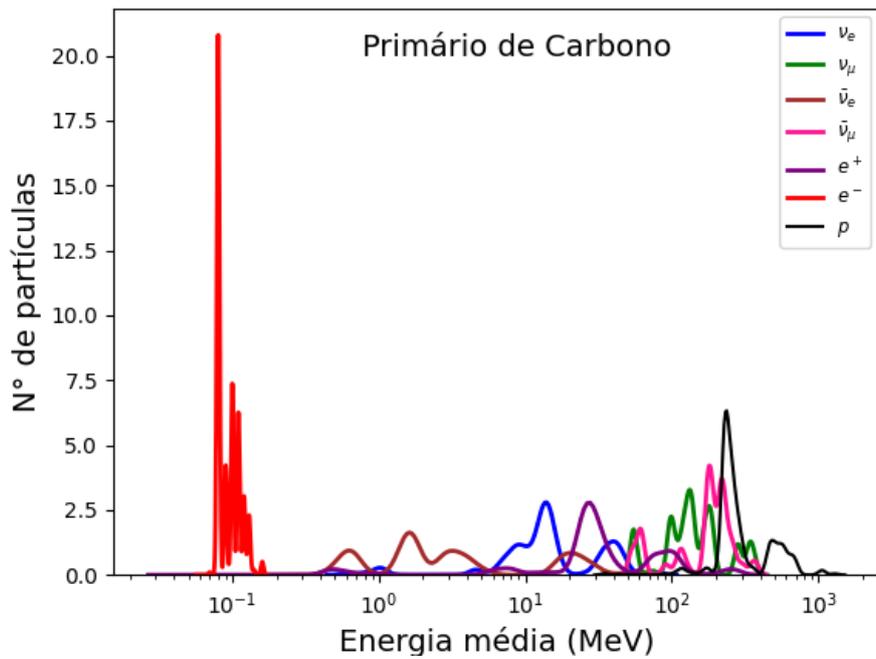


Figura 55 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por núcleos de C. Fonte: Autor.

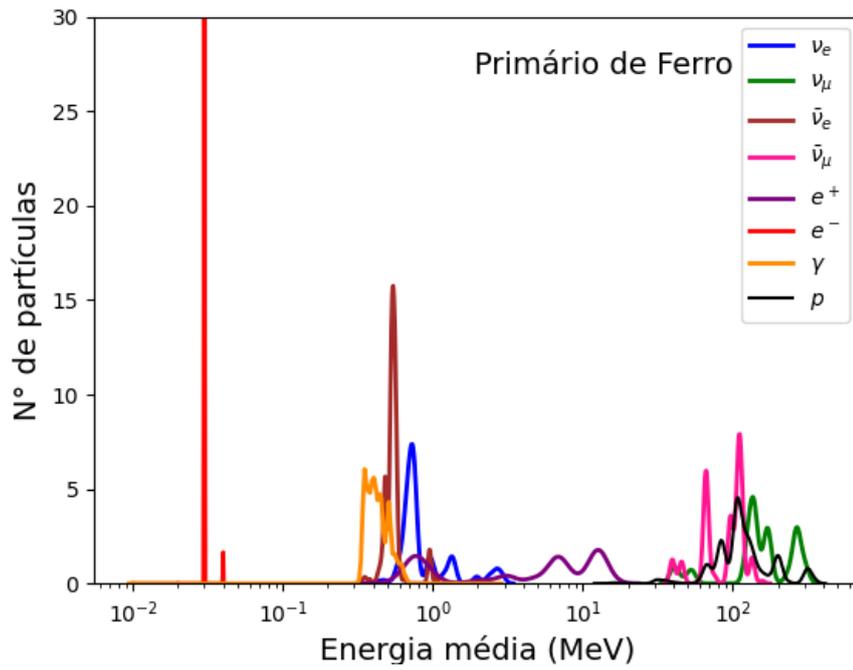


Figura 56 – Espectro de partículas que emergiram da nuvem molecular de Perseus para raios cósmicos compostos por núcleos de Fe. Fonte: Autor.

## 8 Conclusões

Nuvens Moleculares são regiões do meio interestelar compostas por gás e poeira. Elas tendem a ser densas e com alta densidade colunar. A irradiação de nuvens moleculares por raios cósmicos acarreta em várias alterações físicas e físico-químicas que vão desde o depósito de energia por raios cósmicos para aquecer o sistema da nuvem e formação de partículas secundárias (cascata intranuclear) até a ruptura de moléculas e eventual formação de novas espécies. Todas as partículas produzidas durante a interação de raios cósmicos com a nuvem (partículas hadrônicas, eletromagnéticas e muônicas) interagem com o meio via diferentes processos físicos depositando energia, de forma direta e indireta, em diferentes regiões da nuvem. Nesta dissertação, investigamos a deposição de energia por raios cósmicos, de diferentes composições químicas, em diferentes regiões de uma nuvem molecular hipotética e da nuvem molecular de Perseus, bem como a produção de partículas secundárias que emergem da estrutura das mesmas. Esta investigação foi realizada por meio do software de simulação de Monte Carlo Geant4, o qual possui uma construção extremamente completa de processos físicos e interações entre partículas e matéria.

As partículas secundárias formadas em ambas as nuvens moleculares estão diretamente relacionadas à energia incidente: quanto maior a energia incidente, maior será a produção de partículas secundárias. Como ocorre em qualquer nuvem molecular, os elétrons são os secundários mais frequentemente observados nas camadas iniciais. Além disso, dependendo da energia incidente, também pode haver uma quantidade significativa de raios gama e prótons gerados na nuvem. Para raios cósmicos primários, compostos de prótons e outros núcleos atômicos, podemos observar, além de raios gama, a produção de neutrinos eletrônicos e muônicos, e seus respectivos antineutrinos.

Regiões de gás denso na nossa galáxia irradiadas por raios cósmicos galácticos são os alvos mais úteis para compreender a origem dos fluxos de neutrinos e raios gama [192]. A emissão de raios gama proveniente de nuvens moleculares galácticas tem sido utilizada para sondar o espectro de raios gama em vários locais na nossa galáxia [193]. A importância de populações de nuvens moleculares galácticas para a emissão difusa de raios gama e neutrinos é também apoiada pelo fato de que nuvens moleculares individuais podem produzir raios gama secundários através de interações inelásticas como a colisão próton-próton. Portanto, utilizar informações sobre o fluxo de raios gama e neutrinos nos ajuda a investigar a origem da emissão de neutrinos em conexão com o espectro de raios cósmicos.

Na astrofísica de partículas, fontes multi-mensageiras são bastante estudadas, o

que abre uma porta de possibilidades para estudar raios cósmicos em diversos regimes energéticos. Até a região do *joelho* do espectro de energia, sabemos que raios cósmicos têm uma origem galáctica. Acima dessa região, em regimes de energia mais alta, os raios cósmicos têm uma origem extragaláctica. A utilização do Geant4 é bastante útil para estudar o comportamento de objetos interestelares, como as nuvens moleculares que analisamos e demonstramos serem potenciais candidatas a fontes de raios cósmicos, raios gama e neutrinos.

Em geral, os estudos realizados nesta dissertação contribuem para investigarmos a origem e os mecanismos de propagação dos raios cósmicos na nossa galáxia. Além do mais, as simulações realizadas nesta dissertação podem ser aplicadas a catálogos de nuvens moleculares, como fizemos no capítulo 5 investigando a nuvem molecular de Perseus, os quais nos ajudarão a compreender a origem dos raios cósmicos, bem como a detectabilidade de fluxos multi-mensageiros de nuvens moleculares galácticas individuais com os atuais e futuros detectores de raios gama e neutrinos, como o futuro Observatório do Cherenkov Telescope Array (CTAO) e o Observatório IceCube.

O estudo da interação de raios cósmicos com nuvens moleculares oferece informações de grande importância para a astrofísica de partículas. Em particular, além de abordarmos aspectos gerais como o depósito de energia e as partículas secundárias que emergem de nuvens moleculares, realizamos uma análise detalhada da nuvem molecular de Perseus, localizada a aproximadamente 1000 anos-luz da Terra, na direção da constelação de Perseus; esta nuvem é um berçário estelar ativo, contendo regiões densas como IC 348 e NGC 1333, onde ocorrem formações intensas de estrelas jovens [152, 155]. Essa nuvem revela-se extremamente relevante para o progresso da área, especialmente no contexto da interação entre raios cósmicos e a matéria que a compõe. Esse estudo reforça, de maneira significativa, o papel dos multi-mensageiros, como raios gama e neutrinos, enquanto ferramentas essenciais para a compreensão dos processos astrofísicos. Além do mais, a nuvem molecular de Perseus tem sido alvo de estudos usando observatórios de raios gama, como o telescópio Fermi-LAT [194], para mapear a distribuição de raios cósmicos em nossa galáxia.

## Referências

- 1 BUSTAMANTE, M. C. A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sociedade Brasileira de Física, v. 35, n. 2, p. 2603, Apr 2013. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172013000200030>>. Citado na página 21.
- 2 FRIEDLANDER, M. Physics: A century of cosmic rays. *Nature*, v. 483N7390, p. 400–401, 2012. Citado na página 21.
- 3 Gaisser, T. K. *Cosmic rays and particle physics*. [S.l.: s.n.], 1990. Citado na página 21.
- 4 SCHLICKEISER, R. *Cosmic Ray Astrophysics*. [S.l.]: Springer, 2002. ISBN 978-3-662-04814-6. Citado na página 21.
- 5 Padovani, M.; Galli, D.; Glassgold, A. E. Cosmic-ray ionization of molecular clouds. , v. 501, n. 2, p. 619–631, jul. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- 6 Indriolo, N.; Fields, B. D.; McCall, B. J. The Implications of a High Cosmic-Ray Ionization Rate in Diffuse Interstellar Clouds. , v. 694, n. 1, p. 257–267, mar. 2009. Citado na página 21.
- 7 Padovani, M. et al. Cosmic rays in molecular clouds probed by H<sub>2</sub> rovibrational lines. Perspectives for the James Webb Space Telescope. , v. 658, p. A189, fev. 2022. Citado na página 21.
- 8 Indriolo, N.; McCall, B. J. Investigating the Cosmic-Ray Ionization Rate in the Galactic Diffuse Interstellar Medium through Observations of H<sup>+</sup>. , v. 745, n. 1, p. 91, jan. 2012. Citado na página 21.
- 9 Goldsmith, P. F. Molecular Clouds: An Overview. In: Hollenbach, D. J.; Thronson HARLEY A., J. (Ed.). *Interstellar Processes*. [S.l.: s.n.], 1987. v. 134, p. 51. Citado na página 21.
- 10 PAZIANOTTO, M. T. et al. Energy deposition by cosmic rays in the molecular cloud using geant4 code and voyager i data. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 911, p. 129–129, 04 2021. Citado 7 vezes nas páginas 21, 22, 39, 40, 41, 43 e 77.
- 11 PILLING, S.; ROBSON, W.; ROCHA, M. *Física e a Química do Meio Interestelar*. Disponível em: <[https://www1.univap.br/spilling/FQMI/05\\_Nuvens\\_Moleculares.pdf](https://www1.univap.br/spilling/FQMI/05_Nuvens_Moleculares.pdf)>. Citado 6 vezes nas páginas 21, 40, 42, 43, 51 e 53.
- 12 WILLIAMS, D. A.; CECCHI-PESTELLINI, C. *Astrochemistry*. The Royal Society of Chemistry, 2023. ISBN 978-1-83916-396-8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1039/9781839169380>>. Citado na página 21.
- 13 CATLING, D. C. 1What is astrobiology? In: *Astrobiology: A Very Short Introduction*. Oxford University Press, 2013. ISBN 9780199586455. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/actrade/9780199586455.003.0001>>. Citado na página 21.

- 14 Dalgarno, A. Interstellar Chemistry Special Feature: The galactic cosmic ray ionization rate. *Proceedings of the National Academy of Science*, v. 103, n. 33, p. 12269–12273, ago. 2006. Citado na página 21.
- 15 Cui, Y.; Pühlhofer, G.; Santangelo, A. A young supernova remnant illuminating nearby molecular clouds with cosmic rays. , v. 591, p. A68, jun. 2016. Citado na página 22.
- 16 KATAOKA, R.; SATO, T. Ionization of protoplanetary disks by galactic cosmic rays, solar protons, and supernova remnants. *Geoscience Frontiers*, v. 8, n. 2, p. 247–252, 2017. ISSN 1674-9871. Frontiers in Early Earth History and Primordial Life- Part I. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987116300664>>. Citado na página 22.
- 17 VANDENBROUCKE, B.; WOOD, K. The monte carlo photoionization and moving-mesh radiation hydrodynamics code cmacionize. *Astronomy and Computing*, v. 23, p. 40–59, 2018. ISSN 2213-1337. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213133717301142>>. Citado na página 22.
- 18 VANDENBROUCKE, B. et al. Radiative transfer calculations of the diffuse ionized gas in disc galaxies with cosmic ray feedback. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 476, n. 3, p. 4032–4044, 03 2018. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/sty554>>. Citado na página 22.
- 19 PILLING, S.; PAZIANOTTO, M.; SOUZA, L. The influence of heavy cosmic rays in energy deposition in molecular clouds employing the geant4 code and voyager i data. *The Astrophysical Journal*, v. 921, p. 116, 11 2021. Citado na página 22.
- 20 OHIRA, Y.; MURASE, K.; YAMAZAKI, R. Gamma-rays from molecular clouds illuminated by cosmic rays escaping from interacting supernova remnants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 410, n. 3, p. 1577–1582, 01 2011. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17539.x>>. Citado na página 22.
- 21 GABICI, S.; AHARONIAN, F.; BLASI, P. Gamma rays from molecular clouds. *Astrophys. Space Sci.*, v. 309, p. 365–371, 2007. Citado na página 22.
- 22 Peng, F.-K. et al. Comparative study of gamma-ray emission from molecular clouds and star-forming galaxies. , v. 621, p. A70, jan. 2019. Citado na página 22.
- 23 SARKAR, A. D.; BISWAS, S.; GUPTA, N. Galactic molecular clouds as sources of secondary positrons. *PoS, ICRC2021*, p. 157, 2021. Citado na página 22.
- 24 Joshi, J. C.; Roy, A. Probing Cosmic Ray Sources through Multimessenger Modelling: Pevatrons in Our Galaxy. In: *42nd meeting of the Astronomical Society of India (ASI)*. [S.l.: s.n.], 2024. v. 42, p. I03. Citado na página 22.
- 25 Hayashi, K.; Mizuno, T.; Fermi-LAT Collaboration. Fermi LAT study of cosmic-rays and the interstellar medium in nearby molecular clouds. In: Ormes, J. F. (Ed.). *Centenary Symposium 2012: Discovery of Cosmic Rays*. [S.l.]: AIP, 2013. (American Institute of Physics Conference Series, v. 1516), p. 177–180. Citado na página 22.

- 26 SINHA, A. et al. Search for enhanced TeV gamma-ray emission from Giant Molecular Clouds using H.E.S.S. In: *37th International Cosmic Ray Conference*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 22.
- 27 MAGIC Collaboration et al. MAGIC reveals a complex morphology within the unidentified gamma-ray source HESS J1857+026. , v. 571, p. A96, nov. 2014. Citado na página 22.
- 28 CASTRO, D. et al. Fermi-LAT Observations of Supernova Remnants Interacting with Molecular Clouds: W41, MSH 17-39, and G337.7-0.1. *Astrophys. J.*, v. 774, p. 36, 2013. Citado na página 22.
- 29 BANIK, P.; BHADRA, A. An interacting molecular cloud scenario for production of gamma-rays and neutrinos from MAGIC J1835-069, and MAGIC J1837-073. *Eur. Phys. J. C*, v. 81, n. 5, p. 478, 2021. Citado na página 22.
- 30 ROY, A. et al. Gamma-rays and neutrinos from giant molecular cloud populations in the galactic plane. *JCAP*, v. 06, p. 074, 2024. Citado na página 22.
- 31 SHELLARD, R. C. What are the high energy cosmic rays telling us? *Brazilian Journal of Physics*, Sociedade Brasileira de Física, v. 38, n. 3b, p. 407–415, Sep 2008. ISSN 0103-9733. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-97332008000400006>>. Citado na página 25.
- 32 CRONIN, J. W. Cosmic rays: the most energetic particles in the universe. *Rev. Mod. Phys.*, American Physical Society, v. 71, p. S165–S172, Mar 1999. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.71.S165>>. Citado na página 25.
- 33 KAMPERT, K.-H. Cosmic rays from the knee to the ankle – status and prospects. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, v. 165, p. 294–306, 2007. ISSN 0920-5632. Proceedings of the Cosmic Ray International Seminars. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563206008760>>. Citado na página 25.
- 34 ABRAHAM, J. et al. Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above  $4 \times 10^{19}$ eV. *Phys. Rev. Lett.*, v. 101, p. 061101, 2008. Citado na página 25.
- 35 EVOLI, C. *The Cosmic-Ray Energy Spectrum*. Zenodo, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.4396125>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 26.
- 36 Tomassetti, N. Direct Measurements of Galactic Cosmic Rays. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2301.10255, jan. 2023. Citado na página 25.
- 37 ERLYKIN, A.; WOLFENDALE, A. The origin of the knee in the cosmic-ray energy spectrum. 04 2001. Citado na página 25.
- 38 VERZI, V.; IVANOV, D.; TSUNESADA, Y. Measurement of Energy Spectrum of Ultra-High Energy Cosmic Rays. *PTEP*, v. 2017, n. 12, p. 12A103, 2017. Citado na página 25.
- 39 NAGANO, M.; WATSON, A. A. Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays. *Rev. Mod. Phys.*, American Physical Society, v. 72, p. 689–732, Jul 2000. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.72.689>>. Citado na página 25.

- 40 Apel, W. D. et al. The spectrum of high-energy cosmic rays measured with KASCADE-Grande. *Astroparticle Physics*, v. 36, n. 1, p. 183–194, ago. 2012. Citado na página 25.
- 41 HORANDEL, J. Models of the knee in the energy spectrum of cosmic rays. *Astroparticle Physics*, v. 21, p. 241–265, 06 2004. Citado na página 26.
- 42 FRASCHETTI, F. On the acceleration of Ultra-High-Energy Cosmic Rays. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A*, v. 366, p. 4417–4428, 2008. Citado na página 26.
- 43 PTUSKIN, V. et al. Diffusion and drift of very high energy cosmic rays in galactic magnetic fields. *Astronomy and Astrophysics*, v. 268, p. 726–735, 01 1993. Citado na página 26.
- 44 APEL, W. D. et al. KASCADE-Grande measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays. *Astropart. Phys.*, v. 47, p. 54–66, 2013. Citado na página 26.
- 45 ABBASI, R. et al. A study of the composition of ultra-high-energy cosmic rays using the high-resolution fly’s eye. *The Astrophysical Journal*, v. 622, p. 910, 12 2008. Citado na página 26.
- 46 Bird, D. J. et al. The Cosmic-Ray Energy Spectrum Observed by the Fly’s Eye. , v. 424, p. 491, mar. 1994. Citado na página 27.
- 47 BEREZINSKY, V.; GAZIZOV, A.; GRIGORIEVA, S. On astrophysical solution to ultrahigh energy cosmic rays. *Phys. Rev. D*, American Physical Society, v. 74, p. 043005, Aug 2006. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.74.043005>>. Citado na página 27.
- 48 KANG, D.; HAUNGS, A. The cosmic-ray spectrum in the pev to eev energy range. *Advances in Space Research*, 2024. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117724006446>>. Citado na página 27.
- 49 Greisen, K. End to the Cosmic-Ray Spectrum? , v. 16, n. 17, p. 748–750, abr. 1966. Citado na página 27.
- 50 Zatsepin, G. T.; Kuz’min, V. A. Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, v. 4, p. 78, ago. 1966. Citado na página 27.
- 51 BANDEIRA, Y.; MACKEDANZ, L. F. Mecanismos de limitação da energia de raios cósmicos durante sua propagação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 41, 01 2019. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 31.
- 52 Walter, M. Early Cosmic Ray Research with Balloons. *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, v. 239, p. 11–18, jun. 2013. Citado na página 27.
- 53 Boezio, M.; Munini, R.; Picozza, P. Cosmic ray detection in space. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, v. 112, p. 103765, maio 2020. Citado na página 27.
- 54 IceCube Collaboration et al. Cosmic ray composition and energy spectrum from 1-30 PeV using the 40-string configuration of IceTop and IceCube. *Astroparticle Physics*, v. 42, p. 15–32, fev. 2013. Citado na página 27.

- 55 TOMASSETTI, N. *Direct Measurements of Galactic Cosmic Rays*. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/2301.10255>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 28.
- 56 DAVID, J.-C.; LEYA, I. Spallation, cosmic rays, meteorites, and planetology. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, v. 109, p. 103711, 2019. ISSN 0146-6410. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641019300468>>. Citado na página 28.
- 57 LETESSIER-SELVON, A.; STANEV, T. Ultrahigh energy cosmic rays. *Rev. Mod. Phys.*, American Physical Society, v. 83, p. 907–942, Sep 2011. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.83.907>>. Citado na página 28.
- 58 OLIVEIRA, A. I. d.; ROCKENBACH, M.; PACINI, A. Raios cósmicos e a heliosfera. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sociedade Brasileira de Física, v. 36, n. 2, p. 1–13, Jan 2014. ISSN 1806-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000200016>>. Citado na página 28.
- 59 FERMI, E. On the origin of the cosmic radiation. *Physical Review*, v. 75, p. 1169–1174, 04 1949. Citado na página 29.
- 60 BUSTAMANTE, M. et al. *High-energy cosmic-ray acceleration*. Disponível em: <<https://cds.cern.ch/record/1249755/files/p533.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- 61 PEREIRA, L. A. S. *Investigação de sinais de múons, rádio e fluorescência provenientes de chuviros atmosféricos extensos de altas energias para análises de composição química: Investigation of muon, radio and fluorescence signals from high energy extensive air showers for chemical composition analyses*. Tese (Tese (doutorado)) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física Gleb Wataghin, Campinas, SP, 2018. 1 recurso online (185 p.). Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.12733/1635026>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.
- 62 BLANDFORD, R.; EICHLER, D. Particle acceleration at astrophysical shocks: A theory of cosmic ray origin. *Physics Reports*, v. 154, n. 1, p. 1–75, 1987. ISSN 0370-1573. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370157387901347>>. Citado na página 30.
- 63 BUSTAMANTE, M. et al. High-energy cosmic-ray acceleration. *2009 CERN-Latin-American School of High-Energy Physics, CLASHEP 2009 - Proceedings*, p. 533–539, 01 2010. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 30.
- 64 Baerwald, P.; Bustamante, M.; Winter, W. Are gamma-ray bursts the sources of ultra-high energy cosmic rays? *Astroparticle Physics*, v. 62, p. 66–91, mar. 2015. Citado na página 31.
- 65 Rieger, F. M. Active Galactic Nuclei as Potential Sources of Ultra-High Energy Cosmic Rays. *Universe*, v. 8, n. 11, p. 607, nov. 2022. Citado na página 31.
- 66 LI, J. et al. Gamma-ray upper limits on magnetars with six years offermi-lat observations. *The Astrophysical Journal*, v. 835, p. 30, 01 2017. Citado na página 31.

- 67 Huang, C. Y.; Pohl, M. Monte Carlo Study of Cosmic-Ray Propagation in the Galaxy and Diffuse Gamma-Ray Production. In: *International Cosmic Ray Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. (International Cosmic Ray Conference, v. 2), p. 207–210. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.
- 68 TOOLS.SSDC.ASI.IT. *Cosmic Ray Database*. Disponível em: <<https://tools.ssdsc.asi.it/CosmicRays/>>. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34, 35, 36 e 37.
- 69 PORTAL IFSC. *Experimento AMS-02: os primeiros cinco anos*. 1. Disponível em: <<https://www2.ifsc.usp.br/portal-ifsc/experimento-ams-02-como-foram-os-ultimos-cinco-anos/>>. Citado na página 34.
- 70 ADRIANI, O. et al. Direct measurement of the cosmic-ray helium spectrum from 40 gev to 250 tev with the calorimetric electron telescope on the international space station. *Physical Review Letters*, American Physical Society, v. 130, 04 2023. Citado na página 34.
- 71 Adriani, O. et al. Direct Measurement of the Spectral Structure of Cosmic-Ray Electrons+Positrons in the TeV Region with CALET on the International Space Station. , v. 131, n. 19, p. 191001, nov. 2023. Citado na página 34.
- 72 KOBAYASHI, K.; MARROCCHESI, P. S. Extended measurement of the proton spectrum with CALET on the International Space Station. *PoS, ICRC2021*, p. 098, 2021. Citado na página 34.
- 73 ADRIANI, O. et al. Measurement of the iron spectrum in cosmic rays from 10 GeV/n to 2.0 TeV/n with the calorimetric electron telescope on the international space station. *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, v. 126, p. 241101, Jun 2021. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.241101>>. Citado na página 34.
- 74 Kawakubo, Y. Gamma-ray observation with the CALET. In: *43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January - 4 February*. [S.l.: s.n.], 2021. v. 43, p. 1530. Citado na página 34.
- 75 KAWAKUBO, Y. Gamma-ray burst observations with the CALET Gamma-ray Burst Monitor. *PoS, ICRC2019*, p. 571, 2021. Citado na página 35.
- 76 ALBERT, A. et al. Searching for Dark Matter Annihilation in Recently Discovered Milky Way Satellites with Fermi-LAT. *Astrophys. J.*, v. 834, n. 2, p. 110, 2017. Citado na página 35.
- 77 BRONZINI, E. et al. Fermi-LAT detection of the low-luminosity radio galaxy NGC 4278 during the LHAASO campaign. 9 2024. Citado na página 35.
- 78 ABDOLLAHI, S. et al. *Cosmic-ray electron+positron spectrum from 7 GeV to 2 TeV with the Fermi Large Area Telescope*. 2017. 17 p. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1704.07195>>. Citado na página 35.
- 79 SEO, E. et al. Approaching the spectral knee in high energy cosmic rays with cream. *Journal of the Physical Society of Japan*, v. 78, p. 63–67, 01 2009. Citado na página 35.
- 80 COSMICRAY.UMD.EDU. *Cosmic Ray Energetics And Mass (CREAM)*. Disponível em: <<https://cosmicray.umd.edu/cream/>>. Citado na página 35.

- 81 SEO, E. et al. Cream: 70 days of flight from 2 launches in antarctica. *Advances in Space Research*, v. 42, n. 10, p. 1656–1663, 2008. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117707002748>>. Citado na página 35.
- 82 LEE, J. et al. The iss-cream silicon charge detector for identification of the charge of cosmic rays up to  $z = 26$ : Design, fabrication and ground-test performance. *Astroparticle Physics*, v. 112, p. 8–15, 2019. ISSN 0927-6505. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650518303190>>. Citado na página 35.
- 83 ADRIANI, O. et al. *Ten Years of PAMELA in Space*. 2018. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1801.10310>>. Citado na página 36.
- 84 Hisano, J. et al. Positron and gamma-ray signatures of dark matter annihilation and big-bang nucleosynthesis. , v. 79, n. 6, p. 063514, mar. 2009. Citado na página 36.
- 85 MALYSHEV, D.; CHOLIS, I.; GELFAND, J. Pulsars versus Dark Matter Interpretation of ATIC/PAMELA. *Phys. Rev. D*, v. 80, p. 063005, 2009. Citado na página 36.
- 86 PICOZZA, P. et al. Cosmic ray study with the pameela experiment. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 409, p. 012003, 02 2013. Citado na página 36.
- 87 BOYLE, P. J. The elemental composition of high-energy cosmic rays: Measurements with tracer. *Modern Physics Letters A*, v. 23, p. 2031–2045, 08 2008. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/0810.2967.pdf>>. Citado na página 36.
- 88 BOYLE, P. Cosmic ray composition at high energies: The tracer project. *Advances in Space Research*, v. 42, n. 3, p. 409–416, 2008. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117707003006>>. Citado na página 36.
- 89 ENGLISH.PMO.CAS.CN. *The Public Release of the Dark Matter Particle Explorer Gamma-Ray Data–Purple Mountain Observatory*. Disponível em: <[http://english.pmo.cas.cn/research/rp/202109/t20210914\\_283222.html](http://english.pmo.cas.cn/research/rp/202109/t20210914_283222.html)>. Citado na página 36.
- 90 CASILLI, E. The DAMPE space mission. *Nuovo Cim. C*, v. 47, n. 3, p. 108, 2024. Citado na página 36.
- 91 HASEGAWA, M. *BESS Polar-II Experiment - The 2007-2008 Scientific Flight in Antarctica*. <[https://www2.kek.jp/physics-seminar/files2008/20080513\\_hasegawa.pdf](https://www2.kek.jp/physics-seminar/files2008/20080513_hasegawa.pdf)>. KEK Seminar, May 13th, 2008. Citado na página 37.
- 92 YOSHIMURA, K. et al. Bess-polar ii experiment. *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, ICRC 2007*, v. 2, p. 91–94, 01 2007. Citado na página 37.
- 93 HEYER, M.; DAME, T. Molecular clouds in the milky way. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 53, p. 583–629, 08 2015. Citado na página 39.
- 94 PILLING, S. et al. *Astroquímica Mestrado e Doutorado em Física e Astronomia*. Disponível em: <<https://www1.univap.br/spilling/AQ/Aula%2004%20-%20Moleculas%20Organicas%20no%20MI.pdf>>. Citado na página 39.

- 95 MCGUIRE, B. A. 2018 census of interstellar, circumstellar, extragalactic, protoplanetary disk, and exoplanetary molecules. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 239, p. 17, 11 2018. Citado na página 39.
- 96 MACIEL, W. J. *MEIO INTERESTELAR*. Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/~maciel>>. Citado na página 39.
- 97 MACIEL, W. J. *Astrofísica do Meio Interestelar*. São Paulo: Edusp, 2002. Citado na página 39.
- 98 OLIVEIRA, C.; PEREIRA, V. J. *Fundamentos de Astronomia*. [S.l.]: VITAE, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 42.
- 99 Thiel, V. et al. Complex organic molecules in diffuse clouds along the line of sight to Sagittarius B2. , v. 605, p. L6, set. 2017. Citado na página 39.
- 100 SILVA, V. N. da. Trabalho de conclusão de curso, *Trabalho de Conclusão de Curso*. 2022. Curso de graduação em Física - IGCE. Disponível em: <[silva\\_vn\\_tcc\\_rcla.pdf](#)>. Citado na página 39.
- 101 EHRENFREUND, P.; CHARNLEY, S. B. Organic molecules in the interstellar medium, comets, and meteorites: A voyage from dark clouds to the early earth. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 38, p. 427–483, 09 2000. Citado na página 40.
- 102 PWEB.CFA.HARVARD.EDU. *Interstellar Medium and Molecular Clouds | Center for Astrophysics*. Disponível em: <<https://pweb.cfa.harvard.edu/research/topic/interstellar-medium-and-molecular-clouds>>. Citado na página 40.
- 103 TIELENS, A. G. G. M. *Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2004. Citado na página 43.
- 104 UFRGS.BR. *Star Formation*. 2023. Disponível em: <[https://www.if.ufrgs.br/oei/stars/formation/form\\_st.htm](https://www.if.ufrgs.br/oei/stars/formation/form_st.htm)>. Citado na página 43.
- 105 BRANCHESI, M. Multi-messenger astronomy: gravitational waves, neutrinos, photons, and cosmic rays. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 718, p. 022004, 05 2016. Citado na página 45.
- 106 STRATTA, G.; SANTANGELO, A. X- and gamma-ray astrophysics in the era of multi-messenger astronomy. *arXiv (Cornell University)*, Cornell University, 01 2022. Citado na página 45.
- 107 BRAVO, S. *IceCube reports first detection of candidate astrophysical tau neutrinos*. 2023. Disponível em: <<https://icecube.wisc.edu/news/research/2023/01/icecube-reports-first-detection-of-candidate-astrophysical-tau-neutrinos/>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 81.
- 108 Gao, S.; Pohl, M.; Winter, W. On the Direct Correlation between Gamma-Rays and PeV Neutrinos from Blazars. , v. 843, n. 2, p. 109, jul. 2017. Citado na página 45.
- 109 Bell, A. R. Cosmic ray acceleration. *Astroparticle Physics*, v. 43, p. 56–70, mar. 2013. Citado na página 45.

- 110 Ackermann, M. et al. Detection of the Characteristic Pion-Decay Signature in Supernova Remnants. *Science*, v. 339, n. 6121, p. 807–811, fev. 2013. Citado na página 45.
- 111 Aharonian, F.; Yang, R.; de Oña Wilhelmi, E. Massive stars as major factories of Galactic cosmic rays. *Nature Astronomy*, v. 3, p. 561–567, mar. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- 112 HESS Collaboration et al. Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre. , v. 531, n. 7595, p. 476–479, mar. 2016. Citado na página 45.
- 113 CAO, Z. et al. Discovery of the ultrahigh-energy gamma-ray source lhaaso j2108+5157. *The Astrophysical Journal. Letters*, IOP Publishing, v. 919, p. L22–L22, 09 2021. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2106.09865>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- 114 Miville-Deschênes, M.-A.; Murray, N.; Lee, E. J. Physical Properties of Molecular Clouds for the Entire Milky Way Disk. , v. 834, n. 1, p. 57, jan. 2017. Citado na página 46.
- 115 Montmerle, T. On gamma-ray sources, supernova remnants, OB associations, and the origin of cosmic rays. , v. 231, p. 95–110, jul. 1979. Citado na página 46.
- 116 Aharonian, F. A. Vary High and Ultra High Energy Gamma-Rays from Giant Molecular Clouds. , v. 180, n. 2, p. 305–320, jun. 1991. Citado na página 46.
- 117 Aharonian, F. A. Gamma Rays From Molecular Clouds. , v. 99, p. 187–196, out. 2001. Citado na página 46.
- 118 Icecube Collaboration et al. Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane. *Science*, v. 380, n. 6652, p. 1338–1343, jun. 2023. Citado na página 46.
- 119 NERONOV, A. et al. Hadronic nature of high-energy emission from the galactic ridge. *Physical Review D*, v. 108, 11 2023. Citado na página 46.
- 120 Stecker, F. W. Diffuse fluxes of cosmic high-energy neutrinos. , v. 228, p. 919–927, mar. 1979. Citado na página 46.
- 121 Gupta, N. Galactic PeV neutrinos. *Astroparticle Physics*, v. 48, p. 75–77, ago. 2013. Citado na página 46.
- 122 ZHANG, R. et al. Galactic Diffuse  $\gamma$ -Ray Emission from GeV to PeV Energies in Light of Up-to-date Cosmic-Ray Measurements. *Astrophys. J.*, v. 957, n. 1, p. 43, 2023. Citado na página 46.
- 123 VECCHIOTTI, V.; VILLANTE, F. L.; PAGLIAROLI, G. Unveiling the Nature of Galactic TeV Sources with IceCube Results. *Astrophys. J. Lett.*, v. 956, n. 2, p. L44, 2023. Citado na página 46.
- 124 GABICI, S.; AHARONIAN, F. A. Searching for galactic cosmic ray pevatrons with multi-TeV gamma rays and neutrinos. *Astrophys. J. Lett.*, v. 665, p. L131, 2007. Citado na página 46.

- 125 KAPPES, A. et al. Potential Neutrino Signals from Galactic Gamma-Ray Sources. *Astrophys. J.*, v. 656, p. 870–896, 2007. [Erratum: *Astrophys.J.* 661, 1348 (2007)]. Citado na página 46.
- 126 Gonzalez-Garcia, M. C.; Halzen, F.; Mohapatra, S. Identifying Galactic PeVatrons with neutrinos. *Astroparticle Physics*, v. 31, n. 6, p. 437–444, jul. 2009. Citado na página 46.
- 127 KELNER, S. R.; AHARONIAN, F. A.; BUGAYOV, V. V. Energy spectra of gamma-rays, electrons and neutrinos produced at proton-proton interactions in the very high energy regime. *Phys. Rev. D*, v. 74, p. 034018, 2006. [Erratum: *Phys.Rev.D* 79, 039901 (2009)]. Citado na página 46.
- 128 Evoli, C.; Grasso, D.; Maccione, L. Diffuse neutrino and gamma-ray emissions of the galaxy above the TeV. , v. 2007, n. 6, p. 003, jun. 2007. Citado na página 46.
- 129 NERONOV, A.; SEMIKOZ, D.; TCHERNIN, C. Pev neutrinos from interactions of cosmic rays with the interstellar medium in the galaxy. *Physical Review D*, v. 89, 04 2014. Citado na página 46.
- 130 GAGGERO, D. et al. The gamma-ray and neutrino sky: A consistent picture of Fermi-LAT, Milagro, and IceCube results. *Astrophys. J. Lett.*, v. 815, n. 2, p. L25, 2015. Citado na página 46.
- 131 H. E. S. S. Collaboration et al. The H.E.S.S. Galactic plane survey. , v. 612, p. A1, abr. 2018. Citado na página 46.
- 132 Abeysekara, A. U. et al. Multiple Galactic Sources with Emission Above 56 TeV Detected by HAWC. , v. 124, n. 2, p. 021102, jan. 2020. Citado na página 46.
- 133 Cao, Z. et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12  $\gamma$ -ray Galactic sources. , v. 594, n. 7861, p. 33–36, jun. 2021. Citado na página 46.
- 134 Bao, Y.; Chen, Y. On the Hard Gamma-Ray Spectrum of the Potential PeVatron Supernova Remnant G106.3 + 2.7. , v. 919, n. 1, p. 32, set. 2021. Citado na página 46.
- 135 WILHELMI, E. de Oña et al. The hunt for PeVatrons as the origin of the most energetic photons observed in the Galaxy. *Nature Astron.*, v. 8, n. 4, p. 425–431, 2024. Citado na página 46.
- 136 CARDILLO, M.; GIULIANI, A. The LHAASO PeVatron Bright Sky: What We Learned. *Appl. Sciences*, v. 13, n. 11, p. 6433, 2023. Citado na página 46.
- 137 OLMÍ, B. The Pulsar Wind Nebulae contribution to gamma-rays. *PoS, Gamma2022*, p. 021, 2023. Citado na página 46.
- 138 VIEU, T.; REVILLE, B. Massive star cluster origin for the galactic cosmic ray population at very-high energies. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 519, n. 1, p. 136–147, 2022. Citado na página 46.
- 139 CAO, Z. et al. The First LHAASO Catalog of Gamma-Ray Sources. *Astrophys. J. Suppl.*, v. 271, n. 1, p. 25, 2024. Citado na página 46.

- 140 AMBROSONE, A. et al. Galactic diffuse neutrino emission from sources beyond the discovery horizon. *Phys. Rev. D*, v. 109, n. 4, p. 043007, 2024. Citado na página 46.
- 141 KACHELRIESS, M.; OSTAPCHENKO, S. Neutrino yield from Galactic cosmic rays. *Phys. Rev. D*, v. 90, n. 8, p. 083002, 2014. Citado na página 47.
- 142 Peron, G.; Aharonian, F. Probing the galactic cosmic-ray density with current and future  $\gamma$ -ray instruments. , v. 659, p. A57, mar. 2022. Citado na página 47.
- 143 Ackermann, M. et al. Gamma-Ray Observations of the Orion Molecular Clouds with the Fermi Large Area Telescope. , v. 756, n. 1, p. 4, set. 2012. Citado na página 47.
- 144 Yang, R.-z.; Jones, D. I.; Aharonian, F. Fermi-LAT observations of the Sagittarius B complex. , v. 580, p. A90, ago. 2015. Citado na página 47.
- 145 Baghmany, V. et al. Evidence of Cosmic-Ray Excess from Local Giant Molecular Clouds. , v. 901, n. 1, p. L4, set. 2020. Citado na página 47.
- 146 AHLERS, M.; MURASE, K. Probing the Galactic Origin of the IceCube Excess with Gamma-Rays. *Phys. Rev. D*, v. 90, n. 2, p. 023010, 2014. Citado na página 47.
- 147 Joshi, J. C.; Winter, W.; Gupta, N. How many of the observed neutrino events can be described by cosmic ray interactions in the Milky Way? , v. 439, n. 4, p. 3414–3419, abr. 2014. Citado na página 47.
- 148 SARMAH, P.; CHAKRABORTY, S.; JOSHI, J. C. Probing LHAASO galactic PeVatrons through gamma-ray and neutrino correspondence. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 521, n. 1, p. 1144–1151, 2023. Citado na página 47.
- 149 SPURIO, M. *Probes of Multimessenger Astrophysics*. [S.l.]: Springer, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- 150 ADAMS, J.; EINECKE, S. Modelling molecular clouds with potential cosmic ray accelerators. *Physics and Astronomy, School of Physical and Chemical Sciences, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand*, 2023. PHYS391 Project 2023, Supervisors: Prof. Jenni Adams, Dr. Sabrina Einecke (University of Adelaide, Australia). Citado na página 48.
- 151 Pazianotto, M. T. et al. Energy Deposition by Cosmic Rays in the Molecular Cloud Using GEANT4 Code and Voyager I Data. , v. 911, n. 2, p. 129, abr. 2021. Citado 6 vezes nas páginas 11, 49, 51, 57, 76 e 92.
- 152 ZUCKER, C. et al. Mapping distances across the perseus molecular cloud using co observations, stellar photometry, and gaia dr2 parallax measurements. *The Astrophysical Journal*, v. 869, p. 83, 12 2018. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 100.
- 153 MIZUNO, T. et al. Study of the cosmic rays and interstellar medium in local h i clouds using <i>fermi</i>-lat gamma-ray observations. *The Astrophysical journal*, IOP Publishing, v. 890, p. 120–120, 02 2020. Citado na página 51.
- 154 ARCE, H. G. et al. A bubbling nearby molecular cloud: Complete shells in perseus. *The Astrophysical Journal*, v. 742, p. 105, 11 2011. Citado na página 51.

- 155 DOGIEL, V. A. et al. Gamma-ray emission from molecular clouds generated by penetrating cosmic rays. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 868, p. 114–114, 11 2018. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 100.
- 156 OKAMOTO, R. et al. Hi, co, and dust in the perseus cloud. *arXiv.org*, 2016. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1612.07696v3>>. Citado na página 51.
- 157 BOLATTO, A. D.; WOLFIRE, M.; LEROY, A. K. The co-to-h<sub>2</sub>conversion factor. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 51, p. 207–268, 08 2013. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1301.3498.pdf>>. Citado na página 51.
- 158 HATCHELL, J. et al. *Star formation in Perseus*. 2024. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0505444>>. Citado na página 51.
- 159 WANG, X.-L. et al. Variability of young stellar objects in the perseus molecular cloud. *Research in Astronomy and Astrophysics*, IOP Publishing, v. 23, p. 075015–075015, 05 2023. Citado na página 51.
- 160 DAME, T. M.; LADA, C. J. A complete hcn survey of the perseus molecular cloud. *The Astrophysical Journal*, v. 944, p. 197, 02 2023. Citado na página 51.
- 161 CAO, Z. et al. *Extinction of Taurus, Orion, Perseus and California Molecular Clouds Based on the LAMOST, 2MASS, and Gaia Surveys II: The Extinction Law*. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.02731>>. Citado na página 51.
- 162 ODROWSKI, S.; SESTAYO, Y. Probing cosmic ray production in massive open star clusters with three years of icecube data. *International Cosmic Ray Conference*, v. 33, p. 3260, 01 2013. Citado na página 52.
- 163 NASA. *NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) - Space Mission and Science News, Videos and Images*. 2019. Disponível em: <<https://www.jpl.nasa.gov/>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 52.
- 164 SCIBELLI, S. et al. *Survey of Complex Organic Molecules in Starless and Prestellar Cores in the Perseus Molecular Cloud*. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.11613>>. Citado na página 52.
- 165 SCIENCEDAILY. *Molecules precursors to life discovered in the Perseus Cloud*. Disponível em: <<https://www.sciencedaily.com/releases/2023/04/230403100254.htm>>. Citado na página 52.
- 166 LEE, M. Y. et al. A high-resolution study of the h i-h<sub>2</sub>transition across the perseus molecular cloud. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 748, p. 75–75, 03 2012. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.
- 167 BIALY, S. et al. H i-to-h<sub>2</sub>transitions in the perseus molecular cloud. *The Astrophysical Journal*, v. 809, p. 122, 08 2015. Citado na página 53.
- 168 KIRK, H. M. *Understanding Star Formation in the Perseus Molecular Cloud*. Dissertação (Master's Thesis) — University of Toronto, Toronto, Canada, 2003. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Physics and Astronomy. Citado na página 53.

- 169 IGLESIAS-GROTH, S.; MARIN-DOBRINCIC, M. A rich molecular chemistry in the gas of the ic 348 star cluster of the perseus molecular cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 521, p. 2248–2269, 03 2023. Citado na página 53.
- 170 PINGEL, N. M. et al. Multi-phase turbulence density power spectra in the perseus molecular cloud. *The Astrophysical Journal*, v. 856, p. 136, 04 2018. Citado na página 54.
- 171 GOODMAN, A. A.; PINEDA, J. E.; SCHNEE, S. The “true” column density distribution in star-forming molecular clouds. *The Astrophysical Journal*, v. 692, p. 91–103, 02 2009. Citado na página 55.
- 172 AGOSTINELLI, S. et al. GEANT4—a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A*, v. 506, p. 250–303, 2003. Citado na página 57.
- 173 GEANT4.WEB.CERN.CH. *Overview* | [geant4.web.cern.ch](http://geant4.web.cern.ch). Disponível em: <<https://geant4.web.cern.ch/>>. Citado na página 57.
- 174 TOCI, C.; GALLI, D. Polytropic models of filamentary interstellar clouds “ I. Structure and stability. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 446, n. 2, p. 2110–2117, 11 2014. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stu2168>>. Citado na página 57.
- 175 Roman-Duval, J. et al. Physical Properties and Galactic Distribution of Molecular Clouds Identified in the Galactic Ring Survey. , v. 723, n. 1, p. 492–507, nov. 2010. Citado na página 57.
- 176 Bohlin, R. C.; Savage, B. D.; Drake, J. F. A survey of interstellar H I from Lalpha absorption measurements. II. , v. 224, p. 132–142, ago. 1978. Citado na página 57.
- 177 TRICCO, T.; PRICE, D.; LAIBE, G. Is the dust-to-gas ratio constant in molecular clouds? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, v. 471, 06 2017. Citado na página 57.
- 178 DEMYK, K. Interstellar dust within the life cycle of the interstellar medium. *EPJ Web of Conferences*, v. 18, p. 03001–, 01 2011. Citado na página 58.
- 179 Draine, B. T. Interstellar Dust Grains. , v. 41, p. 241–289, jan. 2003. Citado na página 58.
- 180 FLYNN, G.; NITTLER, L.; ENGRAND, C. Composition of cosmic dust: Sources and implications for the early solar system. *Elements*, v. 12, p. 177–183, 06 2016. Citado na página 58.
- 181 LEE, M. Y. et al. A high-resolution study of the h i-h<sub>2</sub>-transition across the perseus molecular cloud. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 748, p. 75–75, 03 2012. Citado na página 60.
- 182 ZUCKER, C. et al. Mapping distances across the perseus molecular cloud using co observations, stellar photometry, and gaia dr2 parallax measurements. *The Astrophysical Journal*, v. 869, p. 83, 12 2018. Citado na página 60.

- 183 STANIMIROVIĆ, S. et al. Cold and warm atomic gas around the perseus molecular cloud. i. basic properties. *The Astrophysical Journal*, v. 793, p. 132, 09 2014. Citado na página 60.
- 184 WALAWENDER, J.; BALLY, J.; REIPURTH, B. Deep imaging surveys of star-forming clouds. iii. herbig-haro objects in the perseus molecular cloud. *The Astronomical Journal*, v. 129, p. 2308–2351, 05 2005. Citado na página 60.
- 185 IGLESIAS-GROTH, S.; MARIN-DOBRINCIC, M. A rich molecular chemistry in the gas of the ic 348 star cluster of the perseus molecular cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 521, p. 2248–2269, 03 2023. Citado na página 60.
- 186 BOOK For Application Developers. 2023. Disponível em: <<https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 76.
- 187 HADRONIC Physics in Geant4. Disponível em: <<https://indico.cern.ch/event/781244/contributions/3251933/attachments/1782461/2902499/HadronicPhysics.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 67.
- 188 NOVAK, M. *Physics I.: Physics Lists Slides based on Dennis Wright (SLAC) & Vladimir Ivantchenko (CERN) lectures*. 2019. Disponível em: <<https://indico.cern.ch/event/776050/contributions/3237925/attachments/1789252/2914238/PhysLists.pdf>>. Citado na página 67.
- 189 UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAIBA - SAO JOSE DOS CAMPOS. *Física e a Química do Meio Interestelar*. Acesso em: 8 abr. 2024. Disponível em: <[https://www1.univap.br/spilling/FQMI/05\\_Nuvens\\_Moleculares.pdf](https://www1.univap.br/spilling/FQMI/05_Nuvens_Moleculares.pdf)>. Citado na página 69.
- 190 LI, R.-Z. et al. The correlation between dust and gas contents in molecular clouds. *The Astronomical Journal*, Institute of Physics, v. 168, p. 223–223, 10 2024. Citado na página 76.
- 191 SCHNEIDER, N. M. et al. Understanding star formation in molecular clouds - i. effects of line-of-sight contamination on the column density structure. *Astronomy Astrophysics*, v. 575, p. 1–17, 03 2015. Citado na página 91.
- 192 AARTSEN, M. G. et al. Search for time-independent neutrino emission from astrophysical sources with 3 yr of icecube data. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 779, p. 132–132, 12 2013. Citado na página 99.
- 193 PENG, F.-K. et al. Comparative study of gamma-ray emission from molecular clouds and star-forming galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, EDP Sciences, v. 621, p. A70–A70, 11 2018. Citado na página 99.
- 194 YANG, R.-z.; , E. ; AHARONIAN, F. Probing cosmic rays in nearby giant molecular clouds with the<i>fermi</i>large area telescope. *Astronomy and Astrophysics*, EDP Sciences, v. 566, p. A142–A142, 05 2014. Citado na página 100.