

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA - CAMPUS ARARANGUÁ
LICENCIATURA EM FÍSICA

ÁLICE DAIANE FARIAS DE SOUZA

ELISABETE MARIA DE GOUVEIA DAL PINO: TRAJETÓRIA E
CONTRIBUIÇÕES DA CIENTISTA BRASILEIRA EM PESQUISA DE RAIOS
GAMA E IMPLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO

ARARANGUÁ

2025

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA - CAMPUS ARARANGUÁ
LICENCIATURA EM FÍSICA

ÁLICE DAIANE FARIAS DE SOUZA

ELISABETE MARIA DE GOUVEIA DAL PINO: TRAJETÓRIA E
CONTRIBUIÇÕES DA CIENTISTA BRASILEIRA EM PESQUISA DE RAIOS
GAMA E IMPLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Araranguá como parte das exigências para obtenção do título em Licenciada em Física.

Orientadora: Profa. Ma. Larissa do Nascimento Pires
Coorientador: Prof. Dr. Bruno Leal Dias

ARARANGUÁ

2025

RESUMO

Este trabalho investiga a trajetória da astrofísica brasileira Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino, destacando suas contribuições científicas na pesquisa com raios gama e suas implicações no campo da educação. A pesquisa parte do interesse em compreender como a atuação de uma cientista de referência, aliando produção de conhecimento de fronteira, pode enriquecer o ensino de Física e Astronomia. Para isso, são abordados conceitos da astrofísica de altas energias, como raios gama e jatos relativísticos, bem como o papel do Cherenkov Telescope Array (CTA), maior observatório internacional de raios gama do qual Dal Pino é integrante. Além da fundamentação teórica e da revisão bibliográfica, o trabalho adota como metodologia a História Oral, por meio de entrevista com a própria cientista, permitindo o registro de sua trajetória e reflexões sobre ciência, educação e gênero. Os resultados evidenciam que Dal Pino atua de forma significativa tanto na pesquisa de fenômenos cósmicos extremos quanto na formação de estudantes e professores em diferentes níveis. Sua dedicação à educação científica, à orientação de jovens pesquisadores e à popularização da ciência revela a potência de integrar ciência de fronteira com práticas pedagógicas. O trabalho também discute o papel das mulheres na ciência, problematizando as desigualdades de gênero e valorizando a visibilidade de trajetórias femininas na astrofísica. Conclui-se que experiências como a de Dal Pino podem ser mobilizadas como recurso didático no ensino de ciências, contribuindo para a formação crítica e plural de novos sujeitos científicos.

Palavras-chave: Astrofísica de altas energias. Radiação gama. Educação científica. Natureza da ciência. Mulheres na ciência.

ABSTRACT

This study investigates the trajectory of Brazilian astrophysicist Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino, highlighting her scientific contributions to gamma-ray research and their implications for education. The research is driven by the aim of understanding how the career of a leading scientist—who combines frontier scientific knowledge with educational engagement—can enrich the teaching of Physics and Astronomy. The study addresses key concepts from high-energy astrophysics, such as gamma radiation and relativistic jets, as well as the role of the Cherenkov Telescope Array (CTA), the largest international gamma-ray observatory, in which Dal Pino plays an active role. Alongside theoretical grounding and bibliographic review, the work adopts Oral History as its methodological approach, conducting an in-depth interview with the scientist to capture her personal trajectory and reflections on science, education, and gender. The results show that Dal Pino is deeply engaged in both cutting-edge cosmic research and the formation of students and educators at various levels. Her dedication to science education, mentoring of young researchers, and efforts in science popularization illustrate the potential of integrating frontier research with inclusive educational practices. The work also addresses the role of women in science, analyzing gender inequalities and highlighting the importance of making female scientific trajectories more visible in astrophysics. It concludes that Dal Pino's experience can serve as both an educational and inspirational resource in science teaching, contributing to the critical and diverse formation of future scientific actors.

Keywords: High-energy astrophysics. Gamma rays. Science education. Nature of science. Women in science.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGNs: Active Galactic Nucleus

BATSE: Burst and Transient Source Experiment

CGRO: Compton Gamma Ray Observatory

COS - B: Celestial Observation Satellite (COS-B)

CTA: Cherenkov Telescope Array

EGRET: Energetic Gamma Ray Experiment Telescope

FAPESP: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

GRBs: Gamma Ray Burst

HESS: High Energy Stereoscopic System

LHC: Large Hadron Collider

MAGIC: Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes

MHD: Magneto-Hidrodinâmica

MIT: Instituto de Tecnologia de Massachusetts

PET: Positron Emission Tomography

SAS - 2: Small Astronomy Satellite 2

USP: Universidade Federal de São Paulo

WIMPs: Weakly Interacting Massive Particles

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representação da propagação de ondas eletromagnéticas	11
Figura 2: Espectro eletromagnético	12
Figura 3: Comprimento de onda	12
Figura 4: Frequência da onda	13
Figura 5: Ilustração da radiação gama	16
Figura 6, 7 e 8: Receptor de rádio militar BC-348, mostrando tecnologia eletrônica com válvulas, típica das décadas de 1940–50, que exemplifica o tipo de engenharia usada posteriormente em detectores astronômicos	18
Figura 9: Ilustração do satélite SAS-2, lançado pela NASA em 1972	18
Figura 10: Satélite COS-B lançado pela ESA em 1975	18
Figura 11: Observatório Compton de Raios Gama (CGRO), lançado pela NASA em 1991, responsável por ampliar o conhecimento sobre a distribuição e intensidade das fontes de raios gama no universo	19
Figura 12: Diagrama esquemático de um dos oito módulos detectores do BATSE, montados a bordo do satélite CGRO	19
Figura 13: Pulsos de raios gama	20
Figura 14: Mapeamento dos pulsos de raios gama	21
Figura 15: Mapeamento feito com telescópio FERMI	21
Figura 16: Cherenkov Telescope Array	22
Figura 17: Cascata formada pela radiação Cherenkov	23
Figura 18: Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino	26

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Periódicos acessados	28
Quadro 2: Trabalhos selecionados para a revisão	30
Quadro 3: Perguntas elaboradas para a entrevista	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Radiação Gama	11
2.1.2 Radiação gama no universo	18
2.2 Cherenkov Telescope Array (CTA)	24
2.3 Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino	28
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1 Caminho metodológico	31
3.2 Caracterização das pesquisas	32
4 METODOLOGIA	37
4.1 Referencial Metodológico: História Oral	37
4.2 Desenvolvimento da entrevista	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1 Trajetória de vida	42
5.2 Física de Altas Energias no CTA e o trabalho de Elisabete	46
5.3 Educação e o papel do professor	54
5.3.1 Reflexões sobre o papel do professor no contexto da educação brasileira	58
5.4 Debate de gênero e a importância de narrar trajetórias	60
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
7 APÊNDICES	66
7.1 TCLE	66
7.2 Termo de uso de imagem	69
8 REFERÊNCIAS	70
8.1 REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES	74

1 INTRODUÇÃO

Os raios gama têm origem em eventos cósmicos de altíssima energia e em processos como o decaimento nuclear, além disso a radiação gama é a forma mais energética de radiação eletromagnética, desempenhando um papel fundamental na astrofísica moderna. Detectados pela primeira vez no nosso meio intergalático na década de 1960, esses fótons de alta energia são absorvidos pela atmosfera terrestre, o que impede que sua radiação nociva alcance a superfície do planeta, preservando assim a vida na Terra. As primeiras observações de raios gama cósmicos foram realizadas com balões e foguetes, posteriormente por satélites, detectando fótons de alta energia (Schneider, 2006).

O avanço significativo na detecção e estudo dos raios gama ocorreu com o lançamento de satélites dedicados como o *Small Astronomy Satellite 2 (SAS-2) Celestial Observation Satellite (COS-B)*. Esses satélites mapearam a galáxia, confirmando a existência de uma radiação na faixa dos raios gama. A partir da década de 1990, o *Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)* revolucionou a astrofísica de alta energia, operando por nove anos e fazendo descobertas importantes como a detecção de mais de 2000 explosões de raios gama (*gamma ray burst - GRBs*) pelo instrumento *Burst and Transient Source Experiment (BATSE)* e a identificação de galáxias com núcleos ativos (*Active galactic nucleus - AGNs*) em energias muito altas pelo *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)*.

Segundo Longair (2019), os raios gama também são importantes para a compreensão de fenômenos astrofísicos extremos, como explosões de supernovas, fusões de estrelas de nêutrons e eventos de ondas gravitacionais. A astrofísica de raios gama permite o estudo desses eventos em detalhes, fornecendo informações sobre processos nucleares e de partículas que não são acessíveis por outros comprimentos de onda.

Nesse contexto, destaca-se a contribuição da Professora e Astrofísica brasileira Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino, cuja pesquisa tem se voltado justamente à investigação de tais fenômenos de altíssima energia. Seu trabalho, destacado no estudo da emissão de raios gama provenientes do universo, oferece informações profundas sobre os processos energéticos extremos que ocorrem em diversas regiões do cosmos. Além de sua pesquisa, Dal Pino tem se dedicado a atividades educacionais que abrangem desde o ensino médio até o doutorado, promovendo o conhecimento em astrofísica e ciências.

Atualmente, está fortemente envolvida com o Cherenkov Telescope Array (CTA), uma colaboração internacional destinada à construção do maior e mais sensível observatório de raios gama do mundo, que trabalha com a detecção da Radiação Cherenkov, que é a interação da radiação gama com nossa atmosfera terrestre. No âmbito educacional, ela

desenvolve materiais didáticos e programas educativos que introduzem conceitos de astrofísica e física de altas energias para estudantes em diferentes níveis de formação. Isso inclui desde atividades de divulgação científica para o ensino médio até cursos avançados e orientações para estudantes de graduação e pós-graduação.

Tendo como base essa contextualização, a pergunta de pesquisa que orienta este estudo é: "Como aspectos sobre a trajetória e as contribuições de Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino em pesquisa e educação, especialmente em parceria com o Cherenkov Telescope Array (CTA), podem enriquecer o ensino de Física e Astronomia?". A hipótese é que, mediante a investigação da figura de Elisabete e de suas contribuições, podemos demonstrar que a integração de pesquisa de fronteira com práticas educacionais inovadoras pode engajar o público geral em temas relacionados à ciência, bem como inspirar estudantes para carreiras científicas.

O objetivo deste trabalho é explorar como os aspectos sobre a trajetória e as contribuições de Dal Pino, associadas à sua pesquisa científica e sua atuação na educação, podem enriquecer o ensino de Física e Astronomia. Sendo assim, os objetivos específicos são: (a) elencar conhecimentos de física necessários para compreensão do trabalho de Elisabete; (b) documentar os feitos e a trajetória de Elisabete, de modo a evidenciar a relevância para a ciência; (c) refletir sobre as potencialidades dos estudos de Elisabete para a educação científica.

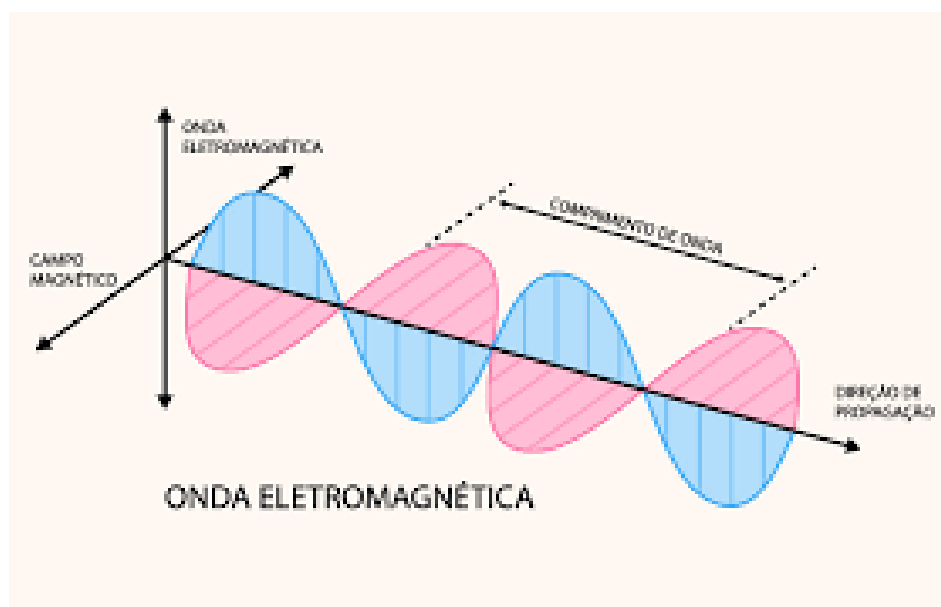
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Radiação Gama

Os raios gama são um tipo de radiação que fazem parte do espectro eletromagnético. Para entender melhor, é importante explorar alguns conceitos como ondas eletromagnéticas, comprimento de onda, frequência, a velocidade com que essas ondas se propagam e fótons. Esses aspectos serão abordados ao longo desta seção, fornecendo a base necessária para compreender a natureza dos raios gama e o papel que desempenham em diversos fenômenos físicos e astrofísicos.

Ondas eletromagnéticas são oscilações de campos elétricos e magnéticos que se propagam pelo espaço, como mostra a Figura 1. Um exemplo comum de ondas eletromagnéticas é a luz visível, que enxergamos no nosso dia a dia, mas há outras formas de radiação, como os raios-X, micro-ondas e, claro, os raios gama. Essas ondas têm a capacidade única de se propagar sem a necessidade de um meio material, ou seja, podem viajar pelo vácuo do espaço. As ondas eletromagnéticas são caracterizadas por duas propriedades principais: o comprimento de onda e a frequência.

Figura 1: Representação da propagação de ondas eletromagnéticas

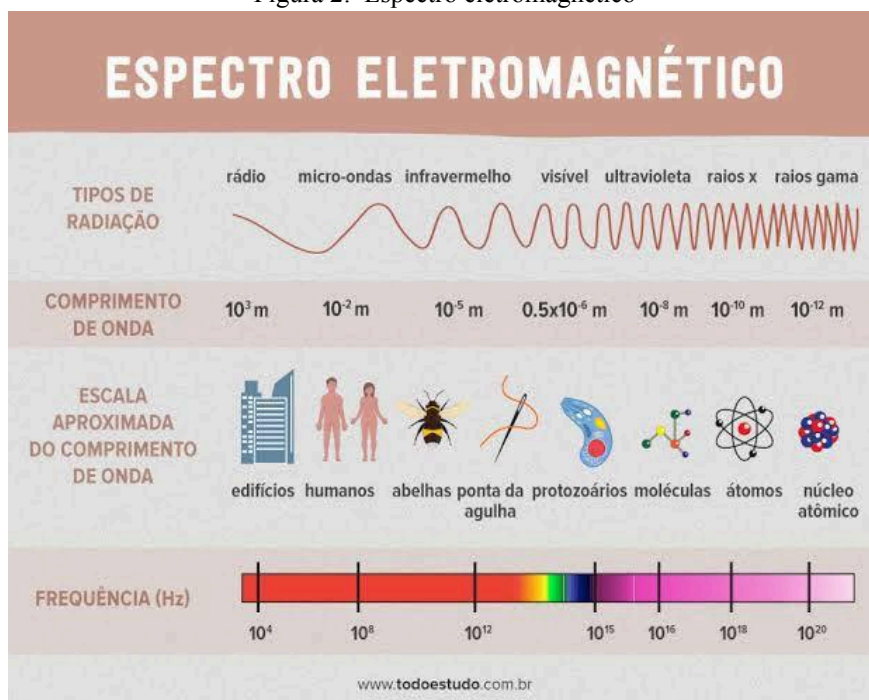


Fonte: Mundo Educação, Tipos de ondas eletromagnéticas [s.d]

O espectro eletromagnético abrange desde ondas com comprimentos muito longos, como as ondas de rádio, até as radiações de comprimentos extremamente curtos, como os raios gama. A luz visível, que nossos olhos podem perceber, é apenas uma pequena parte

desse espectro. Podemos observar tais aspectos na Figura 2, que exemplifica o espectro eletromagnético.

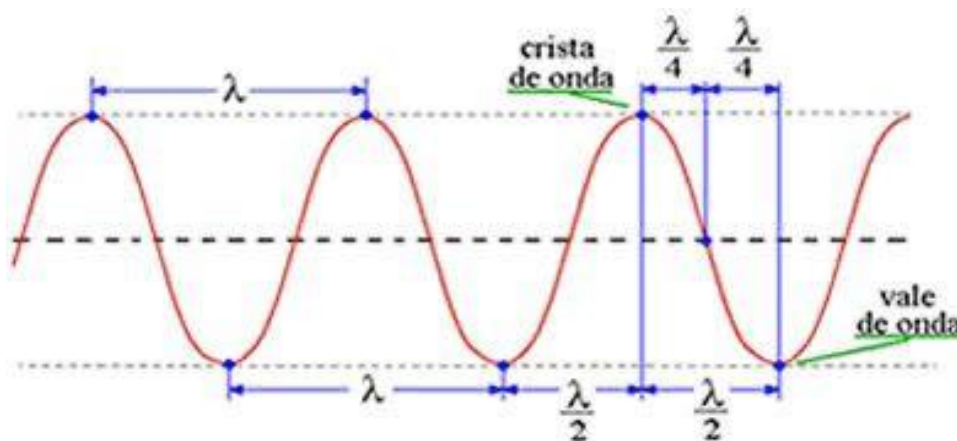
Figura 2: Espectro eletromagnético



Fonte: Revista Todo o Estudo, 2017.

Para entender o espectro vamos primeiro entender o que é o comprimento de onda, ele é a distância entre dois pontos equidistantes e consecutivos de uma onda, por exemplo, entre dois picos (cristas) ou dois vales (cavados) sucessivos. Ele indica o “tamanho” da repetição da onda no espaço e é normalmente representado pela letra grega λ (*lambda*) e é geralmente medido em unidades como metros (*m*) ou nanômetros (*nm*), dependendo do tipo de onda e está relacionado à frequência (*f*) e à velocidade (*v*) da onda.

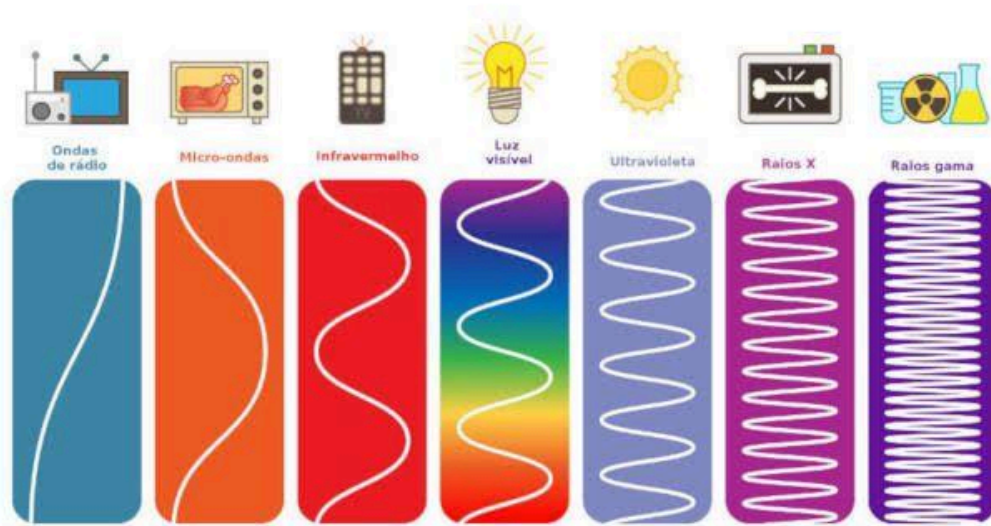
Figura 3: Comprimento de onda



Fonte: Revista Toda Matéria, [s.d.].

Já a frequência, por sua vez, é a medida de quantas vezes uma onda completa um ciclo em um segundo. Isso é medido em hertz (Hz). Quanto maior a frequência, maior a energia da radiação. Os raios gama têm frequências extremamente altas, superiores a 10^{19} Hz , o que significa que são ondas de alta energia, onde a figura 4 exemplifica essa relação.

Figura 4: Frequência da onda



Fonte: Revista Brasil Escola [s.d.].

A relação entre o comprimento de onda (λ) e a frequência (f) está diretamente ligada à equação fundamental da ondulatória, representada pela equação (1):

$$v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Se a velocidade da onda (v) é constante em um determinado meio, o comprimento de onda (λ) e a frequência (f) estão inversamente relacionados. Isso significa que, quando o comprimento de onda (λ) diminui, a frequência (f) aumenta para manter o produto $\lambda \cdot f$ constante (igual a v).

Essa relação ocorre porque ondas de menor comprimento de onda (como os raios gama) precisam oscilar mais vezes por segundo (maior frequência) para percorrer a mesma distância no mesmo intervalo de tempo.

No vácuo, todas as ondas eletromagnéticas, independentemente da sua frequência ou comprimento de onda, se propagam à mesma velocidade, conhecida como $c = 299792458 \text{ m/s}$, que é a velocidade da luz no vácuo. Isso significa que, mesmo as ondas com alta frequência, como os raios gama, viajam à mesma velocidade da luz visível ou de uma onda de rádio no vácuo.

A luz, como onda eletromagnética, pode ser descrita de duas formas complementares: pela visão ondulatória e pela visão corpuscular (quantizada). Ambas abordagens são cruciais para entender o comportamento da luz, mas cada uma delas é mais adequada para explicar diferentes fenômenos.

Na visão clássica (ondulatória), a luz é uma onda eletromagnética, formada por campos elétricos e magnéticos oscilando perpendicularmente entre si e à direção de propagação. Essa abordagem explica fenômenos como Interferência e difração, polarização, refração, reflexão e o comportamento da luz ao mudar de meio.

Já na visão corpuscular com o advento da mecânica quântica, descobriu-se que a luz também pode ser entendida como um fluxo de partículas chamadas fótons. Um fóton é a menor unidade ou quantum, da luz e de qualquer forma de radiação eletromagnética. Ele não tem massa e manifesta comportamento dual, ora como partícula, ora como onda, dependendo do experimento realizado. A luz se manifesta dualmente, mas quando nos referimos ao fóton, tratamos apenas como partícula.

Os fótons são também responsáveis por carregar a energia associada a essas ondas. A quantidade de energia transportada por um fóton está diretamente ligada à frequência da onda eletromagnética, quanto maior a frequência, maior a energia, como visto anteriormente. Essa relação é expressa pela equação (2)

$$E = h \cdot f \quad (2)$$

onde, E é a energia do fóton, h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$), e f é a frequência da onda. Essa equação postulada por Max Planck sugere que a energia não é contínua, mas sim quantizada, sendo emitida ou absorvida em múltiplos inteiros de $h \cdot f$.

Essa ideia de quantização da energia revolucionou a compreensão da luz e de outros tipos de radiação eletromagnética. Em vez de se tratar de uma transmissão contínua de energia, como sugerido pela teoria ondulatória, a mecânica quântica propôs que a energia é emitida ou absorvida em pacotes discretos, chamados de fótons. Isso levou ao desenvolvimento do conceito de que a interação entre a radiação e a matéria ocorre de maneira abrupta, quando a energia dos fótons é absorvida ou emitida, causando transições entre níveis de energia em átomos ou moléculas (Tipler e Llewellyn, 2008, p. 78).

Portanto, a visão corpuscular, ao lado da descrição ondulatória, contribui para uma compreensão mais profunda e abrangente dos fenômenos ópticos e de radiação. Ambas as abordagens são necessárias para descrever mais precisamente as interações complexas entre a luz e a matéria, refletindo o princípio da dualidade onda-partícula, onde a luz pode ser tratada

tanto como uma onda quanto como uma partícula, dependendo do contexto e do tipo de fenômeno sendo analisado.

Quando considerada como partícula, composta por fótons, é possível explicar efeitos como o efeito fotoelétrico, no qual fótons incidentes arrancam elétrons de uma superfície metálica, o espalhamento Compton, que descreve a colisão entre fótons e elétrons, resultando em mudança de energia e comprimento de onda da radiação e a produção de pares, em que um fóton de alta energia se converte em um elétron e um pósitron na presença de um núcleo. Essa dualidade é uma das características centrais da mecânica quântica e continua a ser um campo de estudo fundamental para a física moderna.

No caso dos raios gama, os fótons têm altíssimas energias devido a sua elevada frequência. Isso permite que eles interajam com a matéria de forma intensa, sendo capazes de atravessar profundamente em materiais densos e causar fenômenos como a ionização de átomos, ou seja, a remoção de elétrons de átomos, o que pode ter efeitos biológicos e físicos significativos.

Um dos processos que produzem a radiação gama são os de decaimento nuclear. Inicialmente, era usual distinguir a radiação γ dos raios-x pela sua energia (os raios-X eram menos energéticos), no entanto, atualmente a distinção já não é efetuada desta forma, pois consegue-se produzir raios-x mais energéticos do que muitos raios γ (como nos aparelhos médicos de radiografia), nesses casos eles são distinguidos pela sua origem, e não só a energia, pois os raios X resultam de transições eletrônicas nas camadas internas dos átomos ou da desaceleração brusca de elétrons de alta energia, como ocorre em aparelhos de radiografia médica.

Podemos classificar os decaimentos nucleares como alfa, beta e gama. No decaimento alfa (α), um núcleo atômico emite uma partícula alfa, que consiste em dois prótons e dois nêutrons, reduzindo assim o número de massa do núcleo em 4 unidades e o número atômico em 2 unidades. Por exemplo, um átomo de urânio-238 (^{238}U) pode decair alfa para formar tório-234 (^{234}Th).

No decaimento beta (β), um núcleo atômico emite um elétron (β^-) ou um pósitron (β^+) (antipartícula do elétron), juntamente com uma neutrino¹ ou antineutrino², respectivamente. O decaimento beta diminui o número de massa do núcleo, mas aumenta o número atômico, pois

¹ Os neutrinos são partículas subatômicas extremamente leves, praticamente sem massa, que interagem muito pouco com a matéria, tornando-os difíceis de detectar. Eles são gerados em reações nucleares, como as que ocorrem no Sol ou em supernovas.

² Já os antineutrinos são suas antipartículas, ou seja, têm as mesmas características dos neutrinos, mas com cargas e números quânticos opostos. Ambos desempenham um papel crucial em processos de decaimento radioativo e na física de partículas.

um nêutron decai em um próton, elétron e neutrino. O elétron e o neutrino são ejetados sobrando apenas o próton (no caso do β^-), ou um próton decai em um nêutron, um pósitron e um neutrino, o pósitron e o neutrino são ejetados, restando apenas o nêutron (no caso do β^+). Um exemplo é o decaimento do trítio (^3H) em hélio-3 (^3He) através do decaimento beta negativo.

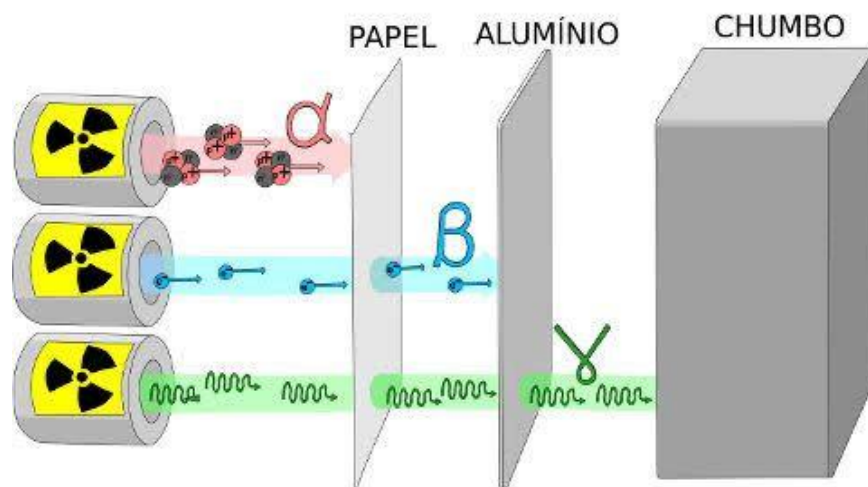
Já o decaimento gama (γ) ocorre quando um núcleo excitado emite um fóton de alta energia, chamado de fóton gama. Esse tipo de decaimento não altera o número de massa nem o número atômico do núcleo, mas ajuda a estabilizá-lo ao liberar energia excessiva. Geralmente, os núcleos emitem radiação gama após experimentarem outros tipos de decaimento, como alfa ou beta (Lima 2014).

Os raios gama foram descobertos em 1900 pelo físico e químico francês Paul Villard, quando estudava a radiação emitida por uma amostra de rádio. A radiação emitida incidia em uma placa fotográfica protegida por uma fina camada de chumbo, suficiente para travar o avanço das partículas alfa.

Villard mostrou que a radiação que atravessava a camada de chumbo era de dois tipos diferentes. Um deles, identificado como radiação β , era defletido ao ser submetido a um campo magnético, pois é constituído por partículas carregadas que sofrem a ação da força de Lorentz. O segundo tipo, por sua vez, não apresentava qualquer deflexão, indicando a ausência de carga elétrica. Além disso, a radiação desconhecida tinha um poder penetrante muito superior à radiação α e β e que Villard não conseguiu identificar. Efetivamente, foi Rutherford, no seguimento da descoberta de Villard, que identificou a radiação como o terceiro tipo de radiação decorrente do decaimento radioativo e designou-a, em 1903, por radiação gama.

Vale ressaltar que, embora na época se utilizassem os mesmos termos para se referir aos diferentes tipos de radiação resultantes do decaimento nuclear, apenas a radiação gama é, de fato, uma radiação eletromagnética. Isso a torna a mais intensa entre as três, ao lado das radiações alfa (α) e beta (β) (Lima, 2014), como ilustrado na Figura 5:

Figura 5: Ilustração da radiação gama



Fonte: Brasil Escola, 2014.

Embora tenha o menor poder ionizante, seu alto poder de atravessar os corpos torna a radiação gama especialmente perigosa para o ser humano. Enquanto as radiações alfa e beta são geralmente bloqueadas pela pele, a radiação gama consegue atravessar o corpo, provocando danos celulares ao longo de seu percurso. O poder ionizante da radiação gama decorre de três tipos de interação que ela pode ter com a matéria: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares de elétron e pósitron.

Estes três principais mecanismos de interação da radiação gama com a matéria são essenciais para entender como os fótons gama transferem energia ao meio material, resultando em ionizações. O efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton gama é completamente absorvido por um elétron de uma camada interna de um átomo, e esse elétron é ejetado, provocando a ionização do átomo. Esse processo é mais comum em materiais com números atômicos elevados e é relevante em radiologia médica, pois permite a absorção de radiação nos tecidos e a formação de imagens de raios X.

O efeito Compton acontece quando o fóton gama colide com um elétron, transferindo parte de sua energia ao elétron e sendo espalhado com menor energia. Este efeito ocorre com mais frequência em materiais de números atômicos baixos e é importante na tomografia computadorizada (TC) para fornecer detalhes sobre densidades dos tecidos, apesar da interferência causada pelos fótons espalhados.

Por fim, a produção de pares de elétron-pósitron ocorre quando um fóton gama de alta energia, acima de 1,022 MeV, interage com o campo elétrico de um núcleo atômico, resultando na criação de um elétron e um pósitron. Esse fenômeno é relevante em tomografia por emissão de pósitrons (*Positron Emission Tomography - PET*).

Apesar de seu nível de periculosidade, a radiação gama possui diversas aplicações práticas. É amplamente utilizada para esterilizar equipamentos médicos, pois tem a capacidade de eliminar organismos vivos. Na medicina, ela é empregada tanto no tratamento de certos tipos de câncer, matando as células cancerosas, quanto em diagnósticos, nos quais uma pequena quantidade de radionuclídeo, geralmente tecnécio-99 (^{99}Tc), um emissor de radiação gama, é administrada ao paciente. Além disso, emissores de radiação gama são utilizados em *scanners* para inspecionar o conteúdo de veículos de transporte de mercadorias e contentores em portos marítimos. Os radionuclídeos³ mais utilizados para essa finalidade são o cobalto-60 (^{60}Co) e o césio-135 (^{135}Cs).

2.1.2 Radiação gama no universo

Como já abordado, os raios gama ocupam a faixa mais energética do espectro eletromagnético, apresentando frequências muito superiores às da luz visível e, conseqüentemente, fótons com altíssimas energias. Essa característica não se limita a processos nucleares em laboratórios terrestres, o universo também abriga intensas emissões gama, associadas aos fenômenos mais extremos e cataclísmicos conhecidos.

Devido à sua alta energia e à impossibilidade de serem focalizados por lentes ou espelhos convencionais, a detecção dos raios gama provenientes do cosmos sempre foi um desafio. As primeiras observações ocorreram na década de 1960, quando detectores de radiação gama foram acoplados a satélites com objetivos de cunho militar, originalmente projetados para monitorar explosões nucleares na Terra. Para surpresa dos pesquisadores, esses instrumentos começaram a registrar pulsos intensos de raios gama que não estavam ligados a testes termonucleares, mas sim a fontes misteriosas e distantes no espaço (Steiner, 2013).

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam o receptor BC-348, um rádio militar amplamente utilizado durante a Segunda Guerra Mundial e nos anos seguintes, que acabou sendo incorporado também a experimentos científicos devido à sua reconhecida qualidade. Embora não se trate de um detector de raios gama propriamente dito, equipamentos desse tipo exemplificam com clareza a tecnologia eletrônica da época composta por válvulas, bobinas e capacitores que serviu como base para o desenvolvimento dos primeiros instrumentos dedicados à astrofísica de altas energias.

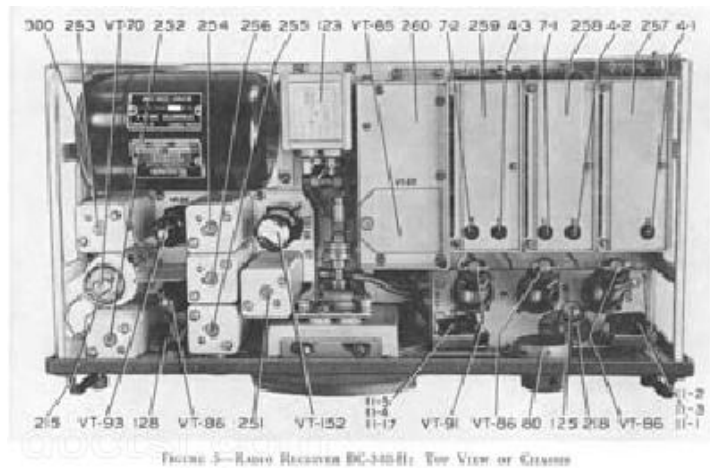
³ Os radionuclídeos são núclidos instáveis que emitem radiação à medida que se transformam em núcleos mais estáveis, através de processos como o decaimento alfa, beta ou gama. Essa emissão de radiação ocorre devido à instabilidade no balanço de prótons e nêutrons no núcleo. Radionuclídeos têm aplicações importantes em áreas como a medicina nuclear, a datação radiométrica e a geração de energia nuclear.

Figura 6: Receptor de rádio militar BC-348



Fonte: DOCTSF Militar Surplus BC-348. [s.d]

Figura 7: Receptor de rádio militar BC-348



Fonte: DOCTSF Militar Surplus BC-348. [s.d]

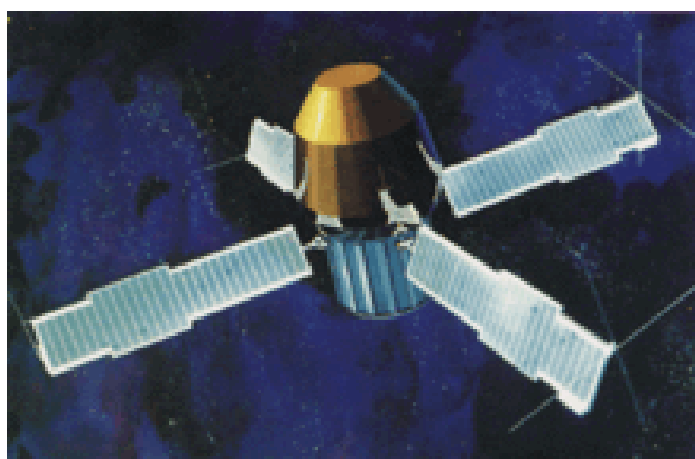
Figura 8: Receptor de rádio militar BC-348



Fonte: DOCTSF Militar Surplus BC-348. [s.d]

A partir de 1972, foram lançados os primeiros satélites dedicados à astrofísica de altas energias, com o objetivo específico de estudar a radiação gama cósmica. Dentre eles está o Small Astronomy Satellite 2 (SAS-2), o Segundo Satélite Astronômico Pequeno como mostra a Figura 9 e, o Celestial Observation Satellite B (COS-B), o Satélite B de Observação Celeste na Figura 10, que passaram a mapear a Via Láctea, confirmando a presença de uma radiação gama difusa distribuída por toda a galáxia e estabelecendo as bases para pesquisas mais detalhadas (Steiner, 2013).

Figura 9: Ilustração do satélite SAS-2, lançado pela NASA em 1972



Fonte: DE-ACADEMIC [s.d.]

Figura 10: Satélite COS-B lançado pela ESA em 1975



Fonte: EUROPEAN SPACE AGENCY. COS-B: Orbit and Operation [s.d]

No entanto, foi apenas em 1984 que ganhou força a hipótese de que esses pulsos poderiam ter origem em fontes situadas no interior da Via Láctea ou no meio interestelar. Essa

compreensão evoluiu até 1997, quando se obteve a primeira identificação precisa de uma fonte de raios gama, posteriormente confirmada por observações complementares em raios X e óptico. Ficou evidenciado, então, que muitas dessas rajadas provinham, na realidade, de galáxias distantes, consolidando a noção de que se tratavam de fenômenos extragalácticos extremamente energéticos.

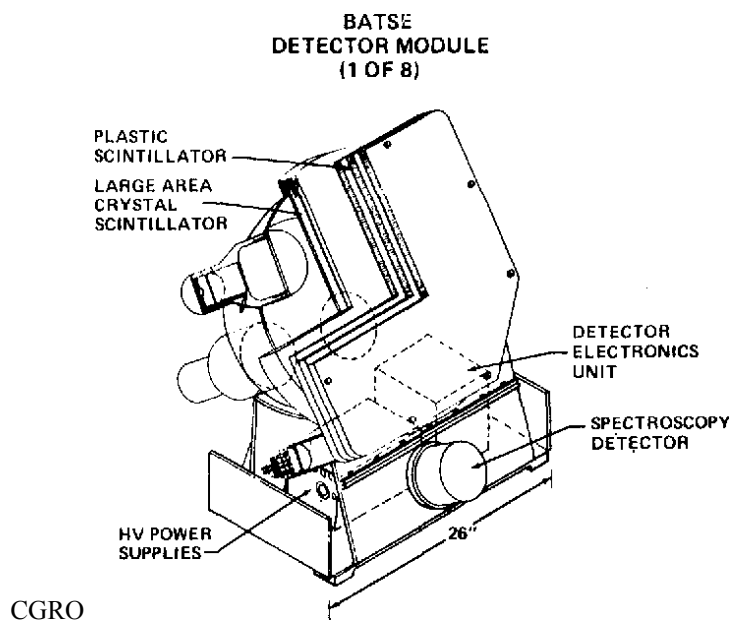
O avanço mais expressivo, entretanto, ocorreu na década de 1990 com o lançamento do *Compton Gamma Ray Observatory* (CGRO), o Observatório Compton de Raios Gama, (Figura 11) que operou durante nove anos e foi responsável por descobertas decisivas. Seu instrumento *Burst and Transient Source Experiment* (BATSE), o Experimento de Explosões e Fontes Transitórias (Figura 12), com oito módulos e cada módulo possuía cintiladores plásticos e cristalinos, além de detectores de espectroscopia, permitindo a detecção precisa de explosões de raios gama e fontes transitórias no céu que detectou mais de 2000 rajadas de raios gama (GRBs), enquanto o *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope* (EGRET), o Telescópio de Experimentos de Raios Gama Energéticos, mapeou emissões de altíssimas energias provenientes de *Active Galactic Nuclei* (AGNs), os Núcleos Galácticos Ativos. Esses resultados ampliaram de forma notável a compreensão dos processos mais violentos do cosmos.

Figura 11: Observatório Compton de Raios Gama (CGRO), lançado pela NASA em 1991, responsável por ampliar o conhecimento sobre a distribuição e intensidade das fontes de raios gama no universo



Fonte: NASA. Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) [s.d].

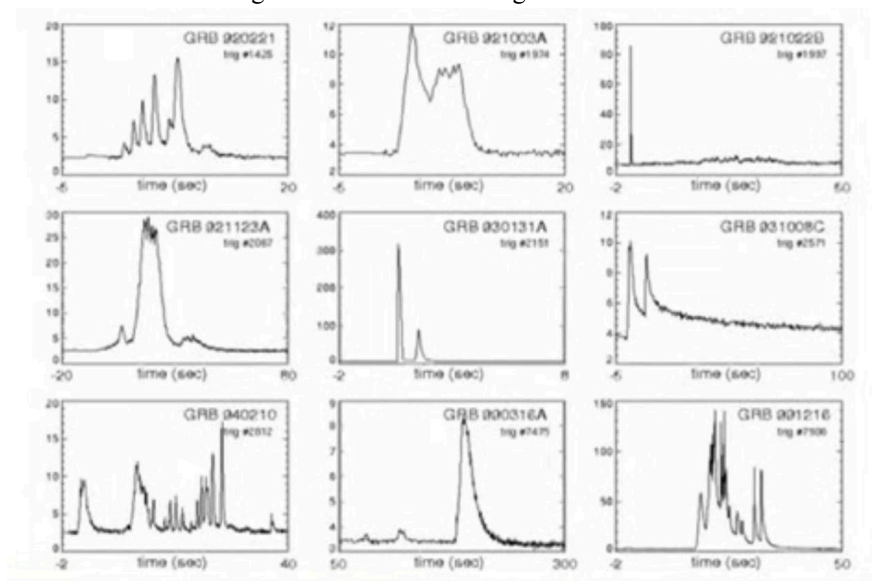
Figura 12: Diagrama esquemático de um dos oito módulos detectores do BATSE, montados a bordo do satélite



Fonte: Fishman e Meegan (1995).

Com o avanço da tecnologia, os estudos sobre raios gama se intensificaram. Pesquisadores utilizaram observações em diferentes comprimentos de onda para identificar e analisar essas fontes, determinando a distância e a natureza de diversos objetos celestes. Pulsos de raios gama são extremamente difíceis de detectar devido à sua breve duração e intensidade, muitas vezes desaparecendo rapidamente após sua detecção. Como demonstrado na Figura 13, os pulsos de raios gama não seguem um padrão.

Figura 13: Pulsos de raios gama

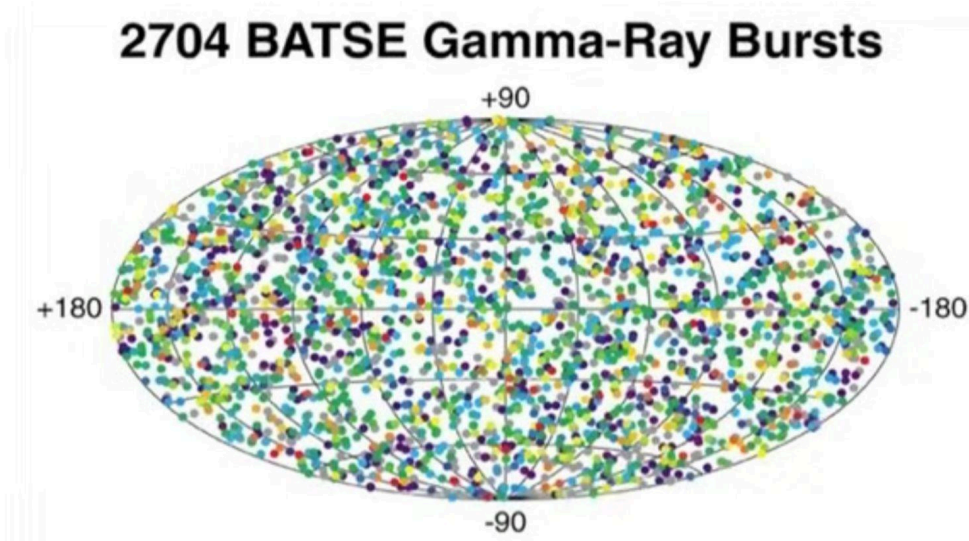


Fonte: Canal do Youtube UNIVESP. Astronomia: Uma visão geral II - Aula 15 - As fontes de pulsos de raios gama (2013).

Existem dois tipos principais de pulsos: os longos e os curtos. Os pulsos longos são frequentemente associados ao colapso de estrelas massivas em supernovas, que resultam na formação de buracos negros e jatos de matéria. Por outro lado, os pulsos curtos são provavelmente gerados pela fusão de sistemas binários de estrelas de nêutrons, que acabam formando buracos negros e emitindo ondas gravitacionais intensas no processo.

A energia envolvida nos pulsos de raios gama varia de acordo com a massa das estrelas progenitoras. Estrelas com mais de 20 vezes a massa do Sol, por exemplo, podem gerar buracos negros e produzir pulsos de alta energia. Além disso, existem fenômenos associados a estrelas extremamente massivas, que, se direcionados à Terra, poderiam ter efeitos catastróficos. Já os pulsos de baixa energia, como os gerados por magnetars⁴, são periódicos e não destrutivos, apresentando um comportamento menos violento, mas ainda fascinante. A Figura 14 mostra a distribuição de fontes de raios gama do universo, feito pelo satélite BATSE, que identificou 2704 pulsos de raios gama há alguns anos atrás:

Figura 14: Mapeamento dos pulsos de raios gama

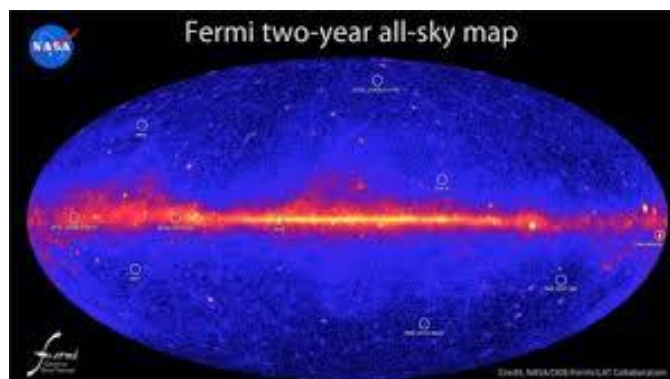


Fonte: Canal do Youtube UNIVESP. Astronomia: Uma visão geral II - Aula 15 - As fontes de pulsos de raios gama (2013).

Os fótons de raios gama nem sempre vêm em forma de pulsos, eles também vêm de fontes que emitem continuamente raios gama e tem a seguinte distribuição, conforme demonstrado na Figura 15:

⁴ Magnetars são um tipo especial de estrela de nêutrons caracterizado por campos magnéticos extremamente intensos, da ordem de 10^{14} a 10^{15} gauss, muito superior ao campo magnético terrestre. Essa intensidade magnética gera emissões energéticas peculiares, incluindo surtos de raios X e gama, tornando os magnetars importantes para estudar física em condições extremas.

Figura 15: Mapeamento feito com telescópio FERMI



Fonte: Imagem do Universo em raios gama produzida em 2013 com dados coletados pelo telescópio Fermi - NASA (2013).

Na Figura 14, é possível observar uma concentração de emissão contínua concentradas no plano na via láctea, por tanto essas fontes vem ou das estrelas da via láctea ou do meio interestelar da via láctea, pois elas têm uma distribuição não isotrópica e extremamente condensada no plano da nossa galáxia.

Esses estudos continuaram a avançar, revelando cada vez mais informações sobre galáxias distantes e objetos cósmicos, ampliando nossa compreensão do universo e dos fenômenos que o moldam.

A detecção de raios gama é desafiadora devido à sua alta energia e capacidade de penetrar a maioria dos materiais. No entanto, avanços tecnológicos têm permitido a construção de telescópios e observatórios especializados, como o Cherenkov Telescope Array (CTA), que utiliza a radiação Cherenkov, que será discutida mais adiante, para detectar raios gama ao observar a cascata de partículas secundárias produzidas quando os raios gama interagem com a atmosfera terrestre (Longair, 1994; Schneider, 2006).

Os raios gama proporcionam estudos mais avançados e detalhados sobre os processos mais energéticos do universo. Eles permitem estudar eventos cataclísmicos e testar teorias sobre a física de partículas. Observatórios como o CTA estão na vanguarda desta investigação, ampliando nossa compreensão do cosmos através da observação de raios gama (Longair, 2019; Schneider, 2006).

2.2 Cherenkov Telescope Array (CTA)

A exploração do universo em altas energias tem se mostrado uma das frentes mais fascinantes da astrofísica moderna. Entre as ferramentas mais modernas para essa tarefa estão

os telescópios de radiação gama, que possibilitam o estudo de fenômenos cósmicos extremamente energéticos, como buracos negros supermassivos, supernovas e galáxias distantes. O Cherenkov Telescope Array (CTA), uma iniciativa internacional que será composta por uma rede de telescópios terrestres, representa um avanço significativo na observação do universo nessa faixa de radiação. Na palestra "CTA: Cherenkov Telescope Array: Como enxergamos o Universo em Raios Gama?" Prof^a Dr^a Elisabete M. d. G. Dal Pino, especialista no tema, compartilha detalhes sobre o funcionamento do CTA e as suas implicações para o estudo do cosmos.

O CTA (Figura 16) é composto por um conjunto de 120 telescópios Cherenkov, que serão distribuídos em dois locais: um no Hemisfério Norte e outro no Hemisfério Sul, permitindo uma cobertura completa do céu (FAPESP, 2018 e FAPESP, 2024)

Figura 16: Cherenkov Telescope Array



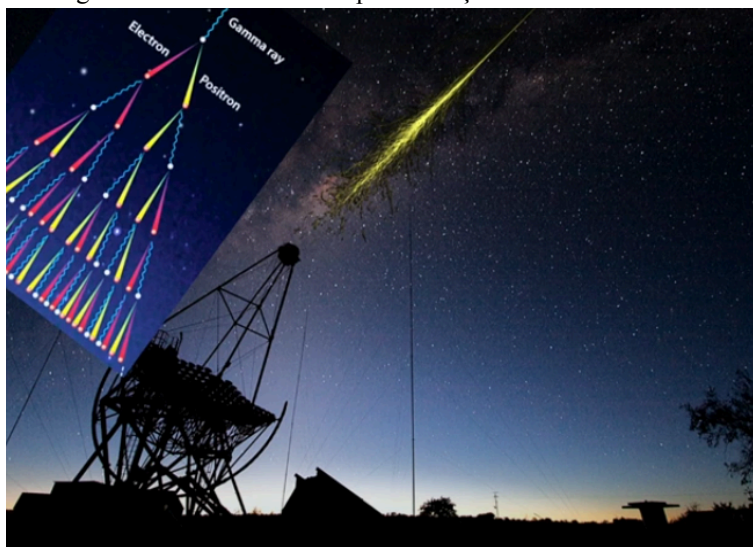
Fonte: Agência FAPESP, Telescópio que terá a capacidade de medir quase toda a luz do universo (2019)

Para entender como o CTA funciona, é necessário primeiro compreender o fenômeno físico por trás da detecção dos raios gama: a radiação Cherenkov. Esse fenômeno ocorre quando partículas carregadas, como elétrons ou núcleos, se movem a velocidades superiores à da luz no meio em que estão, gerando uma onda de choque luminosa. Ao contrário do que ocorre no vácuo, onde a luz viaja a uma velocidade constante de $c = 299792458 \text{ m/s}$, nos materiais com índice de refração $n > 1$, a velocidade c diminui. Quando partículas viajam mais rápido que essa velocidade reduzida, elas emitem radiação no espectro visível ou ultravioleta, geralmente com uma cor azul característica.

O CTA é projetado para captar exatamente essa luz gerada pela interação de partículas de alta energia, como os raios gama, com a atmosfera terrestre. Quando esses raios de alta energia atingem a atmosfera, eles podem gerar uma cascata de partículas secundárias, que se movem mais rápido que a luz no ar, criando radiação Cherenkov (Dal Pino, 2020). Os

telescópios do CTA são equipados com detectores sensíveis a esse tipo de luz, permitindo aos cientistas observar e analisar fontes de radiação gama de forma mais detalhada do que nunca, como mostra a Figura 17:

Figura 17: Cascata formada pela radiação Cherenkov



Fonte: Canal do Youtube Astronomia ao meio-dia. CTA: Cherenkov Telescope Array: Como enxergamos o Universo em Raios Gama? (2020).

A sensibilidade do CTA será dez vezes maior do que a dos melhores detectores atuais, possibilitando a detecção de raios gama com energias na faixa de TeV ($10^{12} eV$) até centenas de TeV. Esta sensibilidade aprimorada permitirá aos cientistas investigar uma ampla gama de fenômenos astrofísicos de alta energia, como a origem dos raios cósmicos, a natureza dos buracos negros e a composição da matéria escura (FAPESP, 2018).

No centro de muitas galáxias, incluindo a Via Láctea, existem buracos negros supermassivos cujos campos gravitacionais são tão intensos que podem acelerar partículas a velocidades próximas à da luz. Essas partículas, ao interagir com o ambiente ao redor, podem emitir radiação gama. O CTA será capaz de mapear essas emissões e estudar o comportamento de partículas no interior desses buracos negros (Dal Pino. 2020).

Quando estrelas massivas chegam ao fim de sua vida, elas explodem em eventos chamados supernovas, liberando enormes quantidades de energia, incluindo radiação gama. A observação de supernovas em raios gama fornecerá informações valiosas sobre os processos de explosão estelar e a formação de elementos pesados no universo (Dal Pino. 2020).

Além disso, o CTA será capaz de estudar os aglomerados de galáxias que são algumas das estruturas mais massivas do universo, e sua composição é dominada pela matéria escura. Dal Pino (2020) explica que o CTA permitirá estudar as interações de partículas aceleradas

nesses aglomerados, proporcionando uma janela única para o estudo da matéria escura e dos processos de aceleração de partículas em escalas cosmológicas.

Um dos maiores mistérios da astrofísica moderna é a matéria escura, uma suposta substância invisível que compõe cerca de aproximadamente 25% - 27% da massa do universo. Entretanto, trata-se de uma hipótese ainda distante de consenso, pois a matéria escura não foi detectada diretamente até hoje. Dal Pino (2020) destaca que, embora essa matéria não interaja com a luz, uma das linhas de investigação atuais considera que ela poderia gerar radiação gama de forma indireta. Isso ocorreria porque certas partículas teóricas, como os *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMPs) que são candidatas a constituírem a matéria escura, poderiam se aniquilar mutuamente ao se encontrarem, produzindo entre outros subprodutos fótons de radiação gama detectáveis, mas que ainda não foi detectada diretamente.

O CTA oferece uma das melhores oportunidades para estudar a matéria escura, já que sua sensibilidade pode detectar os sinais de aniquilação de partículas de matéria escura nas regiões mais densas do universo, como no centro da Via Láctea ou em aglomerados de galáxias. O excesso de radiação gama observado nessas regiões poderia ser um indício de interações de matéria escura. Como Dal Pino coloca, o CTA será crucial para confirmar ou refutar as diferentes teorias sobre a composição da matéria escura, um dos maiores desafios da física moderna.

Segundo Dal Pino (2020), outro campo em que o CTA pode contribuir é o estudo da energia escura, uma forma misteriosa de energia que está acelerando a expansão do universo. Embora a energia escura não possa ser detectada diretamente por radiação gama, o CTA pode ajudar a entender melhor os efeitos indiretos da energia escura ao observar como a distribuição de matéria e energia no universo afeta a radiação de alta energia. Através do estudo das flutuações e da evolução de fontes de radiação gama, o CTA pode oferecer pistas importantes sobre a natureza da energia escura.

O impacto do CTA vai além do estudo do cosmos. O desenvolvimento de tecnologia necessária para a construção e operação do CTA impulsionará inovações em diversas áreas, desde a física de partículas até a engenharia de detectores. O uso de detectores altamente sensíveis e telescópios com capacidade de mapear grandes áreas do céu em alta resolução abrirá novas possibilidades para a detecção de radiação de outras fontes cósmicas e o avanço em técnicas de observação astronômica (FAPESP, 2018).

O projeto do CTA é uma colaboração que envolve instituições de mais de 30 países. No Brasil, a FAPESP apoia a participação de pesquisadores através de projetos temáticos que desenvolvem tanto a teoria quanto a instrumentação necessária para o CTA. Esta colaboração

tem sido essencial para o desenvolvimento de tecnologias avançadas e para a formação de uma nova geração de cientistas especializados em astrofísica de altas energias (FAPESP, 2018).

Dessa forma, iniciativas como o CTA não apenas expandem as fronteiras do conhecimento científico, como também consolidam o protagonismo do Brasil em colaborações internacionais de ponta. Ao integrar pesquisa, desenvolvimento tecnológico e formação de recursos humanos, esses projetos permitem que a astrofísica de altas energias avance para além das antigas limitações, revelando um universo muito mais amplo e dinâmico do que se poderia imaginar há poucas décadas.

2.3 Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino

Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino (Figura 18) é uma figura proeminente na astrofísica, suas contribuições significativas incluem pesquisas em raios cósmicos⁵ em regiões de reconexão magnética⁶ e a formação estelar no meio interestelar e intergaláctico. Além disso, seus estudos sobre a formação estelar elucidam como explosões de supernovas acarretam na formação de novas estrelas.

Seu trabalho abrange a modelagem teórica e simulações numéricas de fenômenos como jatos relativísticos emitidos por buracos negros e estrelas de nêutrons, bem como a dinâmica de plasmas em ambientes astrofísicos. Dal Pino também investigou mecanismos de aceleração de partículas que explicam a produção de radiação de altíssima energia, essenciais para a compreensão dos objetos mais violentos do cosmos. Além de sua pesquisa científica, ela tem desempenhado um papel fundamental na divulgação e no ensino da astrofísica no Brasil, contribuindo para a formação de novas gerações de cientistas.

⁵ Os raios cósmicos são partículas de alta energia que se originam fora da Terra, vindas do espaço profundo, como explosões de supernovas ou outros eventos astrofísicos. Eles são compostos principalmente por prótons, mas também podem incluir elétrons e núcleos de elementos mais pesados. Quando essas partículas atingem a atmosfera terrestre, colidem com átomos e criam chuvas de partículas secundárias, que podem ser detectadas na superfície da Terra.

⁶ A reconexão magnética é um processo físico que ocorre em plasmas altamente condutivos, no qual linhas de campo magnético de orientações opostas se encontram, rompem-se e se reconectam, liberando abruptamente energia magnética acumulada. Esse fenômeno converte energia do campo magnético em energia cinética e térmica do plasma, além de acelerar partículas a altas energias. É um mecanismo central para explicar eventos explosivos em astrofísica, como erupções solares e variabilidade rápida em jatos relativísticos de blazares e pulsares.

Figura 18: Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino



Fonte: Agência FAPESP, Elisabete de Gouveia Dal Pino fala sobre seus estudos feitos por seu grupo no IAG-USP com fenômenos de altas energias em sistemas astrofísicos e sobre o CTA (2018).

Dal Pino trabalha na investigação de fenômenos de altas energias e plasmas astrofísicos, coordenando projetos de pesquisas internacionais apoiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que permitem avanços significativos na área, além de coordenar o grupo de Astrofísica de Plasmas e Altas Energias, lidera pesquisas que aplicam as mesmas ferramentas físico-matemáticas a escalas que vão do dínamo solar aos aglomerados de galáxias.

Ela está envolvida na construção do Cherenkov Telescope Array (CTA), o maior observatório de raios gama do mundo, que ajudará a desvendar mistérios sobre a matéria escura e a astrofísica de altas energias (Agência FAPESP, 2021; Alisson, 2022). Dal Pino foi vencedora da 22ª edição do Prêmio Claudia em 2017, na categoria “Mulheres na Ciência”.

Além disso, Dal Pino tem se destacado significativamente na educação científica, particularmente em astrofísica, desde o nível de ensino médio até o doutorado. Sua dedicação à formação de novos cientistas e pesquisadores é evidente através de diversos projetos e iniciativas que lidera e apoia.

No ensino médio, Dal Pino contribui para a Competição USP de Conhecimentos (CUCo), uma iniciativa do programa "Vem pra USP!", em parceria com a Secretaria da Educação do Estado de São Paulo e a Fundação Universitária para o Vestibular (Fuvest). Este programa visa incentivar estudantes da rede pública a melhorar seu desempenho e ingressar na Universidade de São Paulo (USP). A competição testa conhecimentos em diversas áreas, e

os melhores alunos recebem certificados, acesso a materiais de estudo, e isenção da taxa de inscrição do vestibular da Fuvest (Agência FAPESP, 2021).

Para os estudantes de graduação e pós-graduação, Dal Pino tem um papel ativo na Escola Avançada em Astrofísica de Alta Energia e Plasma, organizada pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG-USP). Este evento, apoiado pela FAPESP, reúne estudantes e pesquisadores de todo o mundo para palestras, mini cursos e treinamentos práticos em astrofísica de altas energias. A escola também proporciona visitas a importantes laboratórios de pesquisa, como o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Alisson, 2017).

No nível de doutorado, Dal Pino orienta pesquisas de ponta em astrofísica de altas energias e plasmas. Sua contribuição é notável no desenvolvimento de tecnologias e infraestrutura para observatórios internacionais, como o Cherenkov Telescope Array (CTA). O grupo de Dal Pino no IAG-USP é responsável pela construção de três dos nove telescópios do ASTRI Mini-Array, parte do CTA, que permitirá o estudo detalhado de fontes de raios gama (Agência FAPESP, 2021; Alisson, 2022).

Além disso, ela participa ativamente em programas de pós-doutorado, oferecendo oportunidades de pesquisa avançada em colaboração com instituições internacionais. Este trabalho não só avança o conhecimento científico, mas também prepara uma nova geração de cientistas brasileiros para atuar em projetos globais (Agência FAPESP, 2021).

A dedicação de Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino à educação científica tem um impacto duradouro, promovendo a ciência e inspirando futuras gerações de pesquisadores no Brasil e no mundo. Documentar a trajetória e contribuições de cientistas como Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino é essencial para construir uma história da ciência. Reconhecer e valorizar as contribuições de mulheres na ciência não só corrige omissões históricas, mas também inspira futuras gerações e promove a diversidade no campo científico. Ao preencher essa lacuna biográfica, criamos uma narrativa mais rica e completa, que reflete verdadeiramente a diversidade de talentos e descobertas que moldam nosso entendimento do mundo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caminho metodológico

O objetivo desta revisão é realizar um levantamento sobre as contribuições de Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino, destacando sua participação no Cherenkov Telescope Array (CTA) e suas pesquisas relacionadas à emissão de raios gama no universo. Além disso, buscamos encontrar trabalhos que relacionem sua trajetória profissional com suas realizações científicas. Para isso, foi adotada uma metodologia que envolveu uma pesquisa detalhada em diversas fontes acadêmicas, incluindo artigos científicos, teses e dissertações.

Iniciamos a metodologia com a busca e a seleção de artigos publicados em revistas científicas indexadas e utilizando bases de dados reconhecidas. Primeiramente, iniciamos a busca em periódicos sobre ensino de ciências, de Física e de Astronomia, que foram selecionados com base em seu reconhecimento na avaliação Qualis Periódicos Quadriênio 2017-2020 na área de Ensino, realizada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Palavras-chave como "Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino", "Cherenkov Telescope Array", "emissão de raios gama do universo" "raios gama" "matéria escura" e "astrofísica de altas energias" foram empregadas simultaneamente para garantir a relevância dos resultados obtidos. O quadro a seguir (Quadro 1) apresenta os periódicos acessados, sua área de publicação e suas respectivas classificações.

Quadro 1: Periódicos acessados

Nome do Periódico	Área com publicação	Qualis em Ensino
CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA	ASTRONOMIA/FÍSICA	A1
REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA	ASTRONOMIA/FÍSICA	A1
CIÊNCIA E CULTURA	ASTRONOMIA/FÍSICA	A1
ENSAIO: PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS	ASTRONOMIA/FÍSICA	A1
INVESTIGAÇÕES EM ENSINO DE CIÊNCIAS	ASTRONOMIA/FÍSICA	A1
REVISTA BRASILEIRA DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS	ASTRONOMIA/FÍSICA	A1
JOURNAL OF CULTURAL HERITAGE	ASTRONOMIA/FÍSICA	A1
THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS	ENSINO	A2

BRAZILIAN JOURNAL OF PHYSICS	ENSINO	A3
REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA	ENSINO	A3

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Ao delimitar a pesquisa com as palavras-chaves, não foram encontrados trabalhos que contemplassem o tema abordado, tão pouco foi encontrado algum que relatasse a trajetória de Dal Pino. Deste modo, a busca passou a ser na base de dados da Scopus, onde encontramos diversas teses e dissertações em que Dal Pino é orientadora. Entretanto, não conseguimos acessá-los, apenas seus resumos. Por esta razão, não consideramos tais materiais para a revisão.

Sendo assim, a busca prosseguiu na base de dados do Google Acadêmico, em que nos deparamos com a mesma constatação: muitas teses e dissertações em que ela está como orientadora. No entanto, novamente, não foi possível acessar os trabalhos na íntegra, apenas os resumos, que em sua maioria estão na base de dados de repositórios da Universidade de São Paulo (USP).

Ainda no Google Acadêmico, foram selecionados somente seis trabalhos sobre o tema de raios gama, sendo três teses, duas dissertações e um artigo. Os trabalhos foram selecionados com base nas palavras-chave mencionadas anteriormente, e todos abordam temas relacionados ao foco da pesquisa.

Sendo assim, mediante a revisão direcionada ao nome da cientista Elisabete Maria Gouveia Dal Pino revelou-se uma extensa coleção de artigos produzidos por ela e em colaboração com outros pesquisadores. Entre esses estudos, há uma significativa atenção dedicada ao foco central de seus temas: a emissão de raios gama provenientes do universo.

No entanto, é notável a ausência de artigos que se propõem a explorar e narrar a trajetória pessoal e profissional de Elisabete. Este vácuo na literatura científica ressalta a importância de preencher essa lacuna, não apenas para reconhecer suas contribuições acadêmicas, mas também para compreender os desafios, as conquistas e o impacto de sua carreira no campo da astrofísica de altas energias.

3.2 Caracterização das pesquisas

No quadro abaixo (Quadro 2), apresentamos os trabalhos selecionados para a revisão, destacando aqueles que utilizam as palavras-chave "física de altas energias", "emissão de raios gama", "raios gama" e "matéria escura".

Quadro 2: Trabalhos selecionados para a revisão

Autoria	Título	Tipo	Fonte
Fagiani (2022)	Busca por sinais de matéria escura no fluxo de raios gama produzidos no sol	Dissertação	Google Acadêmico
Marcomini (2015)	Estudo da possibilidade de detecção de matéria escura com telescópio Cherenkov	Dissertação	Google Acadêmico
Silva (2023)	Busca por matéria escura em galáxias anãs com 14 anos de observações do Fermi Large Area Telescope	Tese	Google Acadêmico
Acharyya et al. (2021)	Sensibilidade da Matriz de Telescópios Cherenkov a um sinal de matéria escura do centro da Galáxia	Artigo	Google Acadêmico
Filho (2015)	Astrofísica de partículas: detecção, propagação e geração de partículas de altíssima energia	Tese	Google Acadêmico
Oliveira e Farias (2017)	Radiação Cherenkov com aplicação no Cherenkov Telescope Array (CTA)	Tese	Google Acadêmico

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os seis trabalhos analisados abordam diferentes metodologias e alvos para a detecção de matéria escura, todos utilizando a observação de raios gama como técnica principal, neste caso, o foco da pesquisa não é a busca por matéria escura em si, mas sim, em como podem ser utilizados os estudos das emissões de raios gama e o Cherenkov Telescope Array. Cada estudo foca em aspectos únicos e complementares do problema, contribuindo para uma compreensão mais ampla da matéria escura e de suas possíveis manifestações astrofísicas.

Para a revisão, fizemos uma separação dos temas, os primeiros quatro trabalhos exploram os raios gama e o CTA na investigação de matéria escura, já os dois últimos trabalhos tem focos distintos, deste modo as sínteses também ficaram separadas de modo que estão apresentados a seguir.

No trabalho de Fagiani (2022), o foco está na possibilidade de detectar sinais de matéria escura através do fluxo de raios gama produzidos no Sol. A pesquisa explora como as

partículas de matéria escura, capturadas pelo campo gravitacional do Sol, podem se acumular em seu núcleo e aniquilar-se, produzindo raios gama. Esse fenômeno é particularmente interessante porque o Sol pode funcionar como um "acumulador" de matéria escura, permitindo a detecção de sinais que seriam indetectáveis em outros cenários devido ao intenso brilho solar. Fagiani discute a importância de considerar cenários modificados que poderiam aumentar a detectabilidade desses sinais, como interações adicionais que amplificaram a produção de raios gama.

Marcomini (2015) investiga o potencial do Cherenkov Telescope Array (CTA) para detectar matéria escura. O CTA é um observatório de raios gama de próxima geração, com uma sensibilidade aprimorada que permite a detecção de partículas de matéria escura de menor massa do que o Fermi Large Area Telescope (LAT) pode detectar. O trabalho destaca a relevância das galáxias anãs esferoidais como alvos para a pesquisa de matéria escura. Essas galáxias, com uma alta proporção de matéria escura em comparação com matéria luminosa, são excelentes laboratórios naturais para a busca de sinais de aniquilação de matéria escura. Marcomini também discute as técnicas de análise de dados e os desafios associados à identificação de sinais fracos de aniquilação em meio ao fundo astrofísico e instrumental.

Silva (2023) utiliza uma extensa base de dados, abrangendo 14 anos de observações do Fermi LAT, para investigar sinais de matéria escura em galáxias anãs. Este trabalho enfatiza a importância dessas galáxias como ambientes ideais para a busca de matéria escura, devido à sua simplicidade dinâmica e alto conteúdo de matéria escura. Silva explora a metodologia de análise dos dados, incluindo a busca por emissões de raios gama que poderiam indicar aniquilação de partículas de matéria escura. O estudo aborda as incertezas e limitações inerentes à detecção desses sinais, como a necessidade de discriminar entre possíveis emissões de fundo e sinais genuínos de matéria escura.

O artigo de Acharyya et al. (2021) explora a capacidade do CTA de detectar sinais de matéria escura produzida termicamente na escala de TeV a partir do centro galáctico. O estudo sugere que o CTA abrirá novas possibilidades de descoberta, ampliando significativamente a gama de modelos testáveis. Mesmo com perfis de densidade de matéria escura alterados, a sensibilidade projetada do CTA será suficiente para investigar diversos modelos de matéria escura. A análise utiliza ferramentas modernas de reconstrução de eventos e modelos atualizados, considerando incertezas sistemáticas instrumentais e de fundo.

De modo geral, os quatro estudos convergem na busca por evidências de matéria escura através da observação de raios gama, embora cada um adote uma abordagem distinta.

A convergência desses trabalhos está na ênfase comum na importância da sensibilidade dos instrumentos de detecção e na necessidade de técnicas de análise sofisticadas para identificar sinais fracos de aniquilação de matéria escura. Em conjunto, esses estudos oferecem uma visão abrangente dos desafios e potenciais soluções na busca por detecções indiretas de matéria escura, contribuindo significativamente para o avanço da cosmologia.

No trabalho de Filho (2015), o autor apresenta uma análise detalhada da astrofísica de partículas, com foco na detecção, propagação e geração de partículas de altíssima energia, particularmente os raios gama, através do uso de dados do telescópio Fermi. Ele aborda os avanços recentes na compreensão da propagação de raios cósmicos e raios gama pelo meio intergaláctico, assim como a contribuição desses fenômenos para o estudo das galáxias de rádio e outras fontes astrofísicas de alta energia. O texto detalha a análise de dados do Observatório Pierre Auger, um dos principais centros de detecção de raios cósmicos de alta energia, e compara os resultados de diferentes telescópios, como o *High Energy Stereoscopic System* (HESS) e o *Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes* (MAGIC). Também são discutidos modelos de aceleração de partículas em regiões astrofísicas como a galáxia Centaurus A, explorando limites de luminosidade de raios cósmicos e as implicações desses estudos na busca por respostas sobre a origem dos raios cósmicos de ultra-alta energia.

Já o trabalho de Oliveira e Farias (2017) explora a radiação Cherenkov, que ocorre quando uma partícula carregada viaja a uma velocidade próxima da luz em um meio com índice de refração, criando um efeito visual semelhante ao sônico, mas na luz. A radiação Cherenkov é utilizada em telescópios especializados, como o CTA, para detectar raios gama de alta energia que interagem com a atmosfera da Terra. O CTA, atualmente em construção, será o maior e mais sensível observatório de raios gama já feito, composto por mais de 100 telescópios distribuídos nos hemisférios norte e sul. Sua capacidade de detectar radiação de fontes cósmicas de altíssima energia permitirá avanços na observação de fenômenos astrofísicos, como buracos negros, pulsares e explosões de supernovas. O estudo também revisita a história da descoberta da radiação Cherenkov e sua importância na astrofísica de partículas, desde a primeira observação do fenômeno por Marie Curie até o desenvolvimento de novos detectores que poderão aumentar significativamente o volume de dados capturados sobre o cosmos.

Ambos os estudos reforçam a importância do desenvolvimento de observatórios como o CTA e o uso de tecnologias como os telescópios mais avançados para ampliar o entendimento do universo em energias extremas. As descobertas feitas com esses instrumentos avançados estão na fronteira da astrofísica de partículas e podem proporcionar

uma compreensão mais profunda sobre os mistérios do cosmos, desde a origem das partículas de alta energia até a estrutura das galáxias e o comportamento dos buracos negros.

Para finalizar, é evidente que o avanço científico depende diretamente do investimento em tecnologias de fronteira. No entanto, esse progresso só será plenamente alcançado se for acompanhado de um compromisso com a educação. É preciso formar não apenas cientistas, mas cidadãos capacitados para liderar essas inovações e integrá-las à sociedade de maneira responsável e eficaz. Dessa forma, o desenvolvimento tecnológico e educacional caminharão lado a lado, fazendo com que os desafios do futuro sejam enfrentados com conhecimento e competência.

4 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida teve como propósito atender o objetivo geral, que é “explorar como os aspectos sobre a trajetória e as contribuições de Dal Pino, associadas à sua pesquisa científica e sua atuação na educação, podem enriquecer o ensino de Física e Astronomia”.

Para atender o primeiro objetivo específico “elencar conhecimentos de física necessários para compreensão do trabalho de Elisabete”, foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de se apropriar dos conhecimentos de física envolvidos nos trabalhos de Elisabete.

Para o segundo e terceiro objetivo específico que é “documentar os feitos e a trajetória de Elisabete, de modo a evidenciar a relevância para a ciência” e “refletir sobre as potencialidades dos estudos de Elisabete para a educação científica”, foi proposta uma entrevista com a cientista, a fim de relatar a trajetória e seu trabalho. Para isso, adotamos o referencial metodológico da História Oral, que permitirá uma compreensão profunda e pessoal de sua jornada, bem como das influências e desafios que marcaram sua carreira.

4.1 Referencial Metodológico: História Oral

A História Oral é uma metodologia qualitativa que envolve a coleta de relatos de vida e experiências pessoais por meio de entrevistas. Este método é particularmente valioso para a documentação de trajetórias individuais, pois permite capturar não apenas fatos e eventos, mas também emoções, percepções e contextos sociais e culturais que moldaram a vida dos entrevistados (Thompson, 2000).

A escolha pela História Oral como método central desta pesquisa não se dá apenas por conveniência técnica, mas está fundamentada em uma compreensão epistemológica específica sobre o fazer científico e sobre a maneira como histórias individuais contribuem para iluminar o caráter social, cultural e político da ciência.

Longe de enxergar a ciência como um conjunto fechado de verdades definitivas, parte-se aqui da noção de que ela é um processo dinâmico, histórico e frequentemente marcado por revisões profundas. Popper (1975) destaca que o conhecimento científico não avança por comprovar hipóteses indiscutíveis, mas pelo exato oposto: pela formulação de teorias passíveis de serem refutadas. Como afirma Popper: “A ciência não se baseia em provas, mas em conjecturas ousadas que tentamos refutar. É esse método de tentativas e eliminações que garante o crescimento do conhecimento” (1975, p. 50).

No mesmo sentido, Thomas Kuhn (2012) demonstra que o progresso científico não ocorre de forma cumulativa, mas por meio de mudanças de paradigma que rompem as estruturas vigentes e reorganizam a maneira como se enxerga o mundo.

Essa visão reforça a importância de acessar o testemunho daqueles que viveram diretamente essas transições e incertezas, revelando o lado humano e contingente do trabalho científico. É o que Latour e Woolgar (1986) destacam ao descrever o laboratório como um espaço onde o técnico, o social e o simbólico se misturam. Para eles:

O laboratório é um teatro de operações onde a ciência se faz, e não um palco passivo para confirmar leis universais. Nele, as interações, disputas e negociações são tão constitutivas dos fatos científicos quanto os instrumentos ou cálculos (p. 48).

Neste trabalho, a História Oral foi escolhida justamente por permitir registrar esses aspectos subjetivos e sociais, dando voz à própria cientista para narrar como construiu sua trajetória, enfrentou desafios e viveu as incertezas e descobertas características da prática científica.

Além disso, a História Oral encontra especial relevância quando articulada à categoria gênero, entendida aqui como um princípio organizador das relações sociais, que impacta oportunidades, reconhecimentos e narrativas. Joan Scott (1995, p. 86) define gênero de modo que se tornou clássico na historiografia: “O gênero é um elemento constitutivo das relações sociais baseadas nas diferenças percebidas entre os sexos; é também uma forma primária das relações de poder”.

Considerar gênero como categoria analítica permite questionar por que certas trajetórias se tornam visíveis na história da ciência enquanto outras permanecem marginais ou são deliberadamente esquecidas. Margaret Rossiter (1993) chama atenção para o chamado Efeito Matilda, que faz referência à ativista norte-americana Matilda Joslyn Gage, que já no Século XIX denunciava como as realizações de mulheres eram frequentemente desconsideradas ou atribuídas a homens. Esse conceito descreve a tendência histórica de minimizar ou até invisibilizar as contribuições femininas no campo científico, reforçando estereótipos de gênero e distorcendo a memória coletiva sobre quem, de fato, impulsionou avanços importantes no conhecimento.

Portanto, ao utilizar a História Oral para construir a narrativa de uma mulher em um campo predominantemente masculino, como a astrofísica, este estudo adota não apenas uma

técnica metodológica, mas uma postura epistemológica: considera o conhecimento científico como uma construção humana, permeada por disputas simbólicas, por barreiras de gênero e por mudanças de paradigma, que só podem ser plenamente compreendidas quando se dá espaço para que as próprias protagonistas contem suas histórias.

4.2 Desenvolvimento da entrevista

A coleta dos dados ocorreu por meio de uma entrevista semiestruturada realizada com Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino no dia 27 de junho de 2025, após a aprovação do projeto pelo Comitê de Ética em Pesquisa, conforme determina a Resolução CNS nº 466/12 (projeto aprovado sob Certificado de Apresentação de Apreciação Ética 87232425.0.0000.0185). A entrevista teve duração aproximada de uma hora e meia e foi conduzida de forma remota, utilizando a plataforma online *Google Meet*, que garantiu a qualidade do áudio e a privacidade da participante.

O encontro foi previamente agendado em diálogo com a entrevistada, que foi informada sobre todos os aspectos do estudo, assinando o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), vide Apêndice 1. Durante a entrevista, utilizou-se um roteiro semiestruturado (Quadro 3), elaborado com base na trajetória acadêmica de Dal Pino e nos objetivos deste trabalho, permitindo que a cientista narrasse sua história em seus próprios termos, destacando eventos, desafios e reflexões sobre sua carreira, o ensino de Física e Astronomia e o lugar das mulheres na ciência.

A gravação do encontro foi realizada com a anuência da participante e o arquivo foi armazenado em ambiente seguro, na nuvem do *Google Drive*, a fim de garantir sua preservação. Para possibilitar uma análise aprofundada, o áudio foi integralmente transcrito, respeitando as pausas, entonações e marcas discursivas, o que permitiu captar não apenas o conteúdo informativo, mas também as nuances subjetivas presentes no relato.

Quadro 3: Perguntas elaboradas para a entrevista

1. O que despertou seu interesse inicial pela astrofísica e pela ciência em geral? Houve algum evento ou pessoa que influenciou essa escolha?
2. Quais foram os maiores desafios que você enfrentou durante a sua carreira como mulher na ciência, especialmente em uma área majoritariamente masculina?
3. Como você percebe as mudanças em termos de oportunidades para mulheres na ciência desde o início de sua trajetória até hoje?

4. Você teve alguma mentora ou figura inspiradora durante sua formação acadêmica? Se sim, como ela impactou sua carreira?
5. Ao longo de sua carreira, como você conseguiu equilibrar a vida pessoal e profissional, considerando a dedicação que a pesquisa exige?
6. Grande parte do seu trabalho é focado em magneto-hidrodinâmica (MHD) e em jatos astrofísicos. Quais foram os momentos mais significativos de suas descobertas nessas áreas?
7. Como você vê o impacto das suas contribuições no campo da astrofísica, especialmente em relação à compreensão dos fenômenos de alta energia no universo?
8. Seu trabalho é internacionalmente reconhecido. Como as colaborações com outros países têm influenciado ou ampliado o alcance de suas pesquisas?
9. Como foi o processo de se estabelecer como uma das principais pesquisadoras do Brasil em astrofísica teórica? Você enfrentou barreiras locais, seja em infraestrutura ou reconhecimento?
10. Há algum projeto ou pesquisa atual que esteja particularmente empolgada? Quais são os objetivos a longo prazo dessa pesquisa?
11. O que você acredita que ainda precisa ser feito para que mais mulheres sigam carreiras em áreas como a astrofísica e a física teórica?
12. Quais conselhos você daria para jovens cientistas, especialmente mulheres, que estão começando a trilhar seus caminhos em áreas de STEM (ciência, tecnologia, engenharia e matemática)?
13. Como você vê o papel das instituições acadêmicas e científicas na promoção da diversidade de gênero nas ciências exatas?
14. Pensando na sua história de vida e na sua trajetória acadêmica, que aspectos foram essenciais para possibilitar seu pleno desenvolvimento como cientista?
15. Poderia nos explicar por que os raios gama são tão importantes para o estudo do universo?
16. O que podemos aprender sobre o universo a partir da detecção de raios gama? Que mistérios da astrofísica essa área de estudo pode ajudar a desvendar?
17. O que torna os raios gama tão desafiadores para serem detectados e estudados, e como os avanços tecnológicos têm superado essas barreiras?
18. O que você pode nos contar sobre sua participação no projeto do Cherenkov Telescope Array (CTA)? Como esse observatório poderá revolucionar o estudo de fenômenos de alta energia no universo?

19. Quais são as expectativas e possíveis descobertas que o CTA poderá trazer no campo da emissão de raios gama e outros fenômenos extremos do universo?

20. Como você vê o futuro da astrofísica de alta energia nos próximos 10 a 20 anos, especialmente com o advento de grandes projetos como o CTA?

21. Você tem participado de diversos projetos voltados à educação científica. Poderia nos falar sobre algum desses projetos e os objetivos que eles buscam alcançar?

22. Qual é a sua visão sobre a importância de promover a educação científica nas escolas desde o ensino básico? Como você acredita que isso impacta a formação de futuros cientistas?

23. Em sua opinião, como a universidade pode se aproximar mais dos ambientes escolares para estimular o interesse dos jovens pela ciência, especialmente em áreas como a astrofísica?

24. Como você vê o papel dos cientistas, além da pesquisa, na divulgação e promoção da ciência para o público em geral? Existe uma responsabilidade que os cientistas devem assumir nessa área?

25. Qual é a sua percepção sobre a educação científica no Brasil hoje? Quais são os principais desafios que enfrentamos e que avanços ainda precisam ser feitos para melhorar o ensino de ciências no país?

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Trajetória de vida

Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino, atual professora titular do Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), narra sua trajetória como marcada por uma curiosidade intelectual desde muito cedo. Ainda criança, fascinava-se não apenas pelas ciências exatas, mas por múltiplas áreas do conhecimento.

De ciências exatas, mas eu gostava de tudo. História me fascinava, tudo, eu gostava de tudo. Eu sempre fui aquela CDF [Cabeça de Ferro ou Crânio de Ferro], a nerd, eu era a típica, sempre fui... E você realmente tem que ser muito nerd para fazer ciência, porque tem que ter muita dedicação (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Esse relato se aproxima do conceito de habitus científico formulado por Bourdieu (1999), que entende as disposições e interesses cultivados ao longo da socialização como fundamentais para orientar escolhas profissionais e legitimar a permanência em campos de alta exigência simbólica, como a ciência. O gosto pelo estudo e o interesse pela resolução de problemas são dimensões que se constroem historicamente, sendo resultados de múltiplas influências familiares e escolares.

Dal Pino relembra que sempre foi uma estudante curiosa, com um interesse que ultrapassou as ciências exatas, estendendo-se à história e outros campos do saber. Importante atentar-se que, em sua fala, apesar de apresentar características associadas à pessoas estudiosas, como os termos *nerd* e CDF, ressalta a importância da dedicação dos cientistas no empreendimento científico. Ainda assim, foi um evento específico, o pouso do homem à Lua, carregado de simbolismo para toda a humanidade, que despertou sua curiosidade.

Eu realmente decidi ser astrônoma quando... Eu nem sabia direito o que era isso, mas foi naquela época que o homem estava fazendo a viagem na Lua. Eu era pequena, mas aí eu vi o primeiro pouso, o Neil Armstrong e o Aldrich Edwin que pousaram na Lua, os astronautas, meu Deus, eu era pequena, mas aquilo foi televisionado a branco e preto para o mundo inteiro. Era uma imagem muito diluída, mas eu lembro toda a minha família, todo mundo sentadinho em volta dos meus pais, porque era o acontecimento do planeta. Acho que todas as televisões do mundo estavam fazendo a mesma coisa. Era uma noite de junho, final de junho, começo de julho, e acho que a gente já estava até de férias na escola... (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

O impacto do evento foi tal que, logo após a transmissão, Dal Pino saiu ao quintal, observou o céu e identificou ali, a decisão de seguir a astronomia como trajetória profissional.

Eu fui no quintal da minha casa e estava em escuridão, era uma noite bonita, estrelada, não tinha nem lua. Eu olhei para as estrelas e falei: ‘meu Deus, eu descobri, é isso que eu quero fazer, eu quero ser uma astrônoma.’ Eu achava que ia sair, viajar de foguete, claro, quando você é pequenininha você acha que vai fazer tudo isso, mas eu falei: ‘É isso que eu vou fazer’ e eu decidi ali (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

O impacto daquele episódio histórico, somado às disposições intelectuais já cultivadas em seu ambiente familiar, consolidou a escolha de Dal Pino pela astronomia. Esse direcionamento a levou ao bacharelado em Física na USP, seguido pelo mestrado e doutorado em Astrofísica, além de um pós-doutorado em Harvard. Seu percurso acadêmico ilustra como escolhas profissionais se estruturam na confluência entre interesses pessoais, redes de apoio e oportunidades educacionais, culminando em seu retorno ao Brasil, onde passou a atuar como pesquisadora e docente, contribuindo para a formação científica de novas gerações.

Quando Dal Pino descreve o instante em que “uma lampadinha acendeu” e decidiu que queria ser astrônoma, o relato revela algo mais complexo do que um simples ato de vontade individual ou uma vocação inata. Ao contrário, esse momento só ganhou significado porque reflete em disposições já construídas ao longo de sua socialização, em uma família numerosa que valorizava o aprendizado, mesmo em um contexto sem acesso fácil à informação. Tudo isso permitiu que o pouso na Lua fosse interpretado não apenas como espetáculo, mas como possibilidade concreta.

Ao dizer: “*Eu fui muito sortuda nisso, lembro que naquela noite até agradei a Deus, falei: Nossa, obrigada, eu descobri o que eu quero ser*”, ela reconhece que ter clareza tão cedo é um privilégio, condicionado por fatores que ultrapassam o esforço individual e dizem respeito a contextos coletivos que legitimam certas aspirações.

Durante a graduação, fez iniciação científica em diversas áreas, incluindo física de partículas no Pelletron⁷, mas seu entusiasmo maior estava nas questões teóricas e na

⁷ O Pelletron é um acelerador eletrostático que usa uma correia com pellets condutores, pequenos elementos metálicos que transportam carga elétrica, para gerar alta tensão. Esse campo elétrico acelera partículas carregadas, como prótons e íons, sendo usado em física nuclear e análise de materiais.

modelagem numérica⁸. Após concluir o bacharelado, migrou para o mestrado no Instituto de Astronomia da USP.

Seu mestrado envolveu espectroscopia da atmosfera solar e modelagem numérica. Prosseguiu então para o doutorado, já trabalhando com instabilidades em jatos astrofísicos, desde estrelas até jatos relativísticos⁹. Posteriormente, realizou o pós-doutorado no *Center for Astrophysics* da Universidade Harvard, em Cambridge, nos Estados Unidos, enquanto o marido, também físico, fazia o pós-doutorado no *Instituto de Tecnologia de Massachusetts* (MIT). Foram acompanhados pela filha pequena, que se tornou bilíngue e hoje é cientista política atuando em Bruxelas. Ela comenta: “*Depois do pós-doutorado eu voltei para o Brasil e assumi como docente no Departamento de Astronomia da USP. Desde então, fiz visitas acadêmicas, inclusive na Universidade de Berkeley, na Califórnia*”.

Sua trajetória evidencia não apenas a dedicação individual, mas sobretudo a importância do apoio familiar e das redes acadêmicas que permitiram consolidar sua carreira. Ao refletir sobre seu percurso, Dal Pino destaca o caráter coletivo e histórico do fazer científico: “*Para chegar até onde chegamos, os que vieram antes de mim, e eu que vim antes de vocês, a gente fez muita coisa, né? E é assim que a humanidade caminha*”.

Essa perspectiva se encontra no conceito de *habitus científico* formulado por Bourdieu (1999), ao evidenciar que disposições para o estudo e a pesquisa não surgem de maneira espontânea, mas se constroem socialmente, alimentadas por capitais culturais e relações que legitimam certas escolhas profissionais. Ao mesmo tempo, indica que trajetórias acadêmicas de destaque são viabilizadas por um campo que é resultado do trabalho de gerações anteriores, o que também dialoga com Freire (1996), ao destacar a educação como prática social que amplia horizontes coletivos. Assim, o avanço de Dal Pino, que envolveu desde o ambiente doméstico que valorizava a curiosidade até a inserção em centros de pesquisa no Brasil e no exterior, revela como as carreiras científicas se consolidam por articulações que transcendem o esforço individual e incorporam histórias sociais mais amplas.

Esse entendimento é ampliado pelo referencial epistemológico de Thomas Kuhn, que ao discutir ciência normal, paradigmas e rupturas, mostra como avanços científicos dependem tanto de condições históricas. Ao mesmo tempo, essas trajetórias ilustram como a ciência é

⁸ A Modelagem numérica é uma técnica que utiliza algoritmos e métodos computacionais para simular sistemas físicos, químicos ou biológicos, permitindo prever comportamentos, testar hipóteses e analisar cenários complexos que seriam difíceis ou inviáveis de estudar apenas experimentalmente.

⁹ Jatos relativísticos são feixes extremamente energéticos de partículas carregadas (como elétrons e prótons) que são ejetados a velocidades próximas à da luz ($v \approx 0,99c$) a partir de certos objetos astrofísicos muito compactos e energéticos, como buracos negros, estrelas de nêutrons ou galáxias ativas.

um empreendimento social marcado por desafios, disputas e também preconceitos, evidenciando a relevância de historicizar e desnaturalizar o caminho de pesquisadores que hoje ocupam posições de destaque. Assim, no percurso de Dal Pino, observa-se a confluência entre um ambiente familiar que estimulou a curiosidade, as oportunidades acadêmicas no Brasil e no exterior e o constante diálogo com uma comunidade científica internacional, fatores que destacam o caráter histórico, social e coletivo da construção do conhecimento científico.

Dal Pino traz também um relato do fazer científico ao descrever as dificuldades enfrentadas no desenvolvimento de suas simulações numéricas. Em sua fala, ela revela um cotidiano distante do ideal de precisão imediata muitas vezes associado popularmente à ciência:

Quando você começa a fazer pesquisa, investigar uma coisa, fazer uma simulação numérica, por exemplo, dá um monte de pepino, até você conseguir ter as condições de contorno, as condições iniciais bem controladas pro teu experimento numérico, nossa, é uma frustração atrás da outra. Até a coisa começar a sair, é muito sangue, suor e lágrimas (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Essa descrição conecta-se diretamente à epistemologia de Popper (1975), para quem a ciência avança não pela comprovação de hipóteses infalíveis, mas por meio de conjecturas ousadas que estão sempre sujeitas à refutação. O que Dal Pino chama de “pepinos” e “frustrações” são, na perspectiva popperiana, momentos estruturantes do progresso científico, pois evidenciam o caráter falível e provisório de toda investigação rigorosa.

Ela narra sua rotina como coordenadora de um grupo de pesquisa que modela fenômenos que vão do Sol a buracos negros supermassivos, sempre fundamentados na física de plasmas e na magneto-hidrodinâmica (MHD). Ela destaca um ponto crucial:

Eu coordeno o grupo... Fazemos modelagem teórica e numérica, usando magneto-hidrodinâmica para entender desde o Sol, discos de acreção em torno de buracos negros supermassivos, até jatos relativísticos e o meio interestelar turbulento. O bacana é que, apesar de falar de escalas tão diferentes, os processos físicos são os mesmos (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Ao reconhecer o universo como um grande laboratório onde leis semelhantes operam em múltiplas escalas, Dal Pino evoca a ideia de que o objeto da ciência não é dado de

antemão, mas construído pela interação entre teoria, observação e tecnologia. Latour e Woolgar (1986) sublinham esse ponto ao descrever o laboratório como espaço social onde se “fabricam fatos científicos”, por meio de instrumentos, cálculos, debates e avaliações. No caso da astrofísica, o “laboratório” extrapola o espaço físico: é o universo inteiro, decifrado a partir de dados indiretos e de modelos computacionais robustos.

A história de Elisabete Dal Pino revela como uma trajetória científica é entrelaçada por disposições pessoais e circunstâncias históricas que, somadas, orientam escolhas fundamentais. Seu relato sobre o encanto pelas estrelas na infância, impulsionado pela epopeia do pouso na Lua, mostra como marcos coletivos podem acender vocações individuais.

O percurso de Dal Pino mostra como escolhas científicas são sempre atravessadas por contextos históricos, apoios coletivos e oportunidades institucionais que tornam certos caminhos possíveis. Sua experiência ilustra que trajetórias acadêmicas não se sustentam apenas em esforço individual, mas resultam de uma construção compartilhada, que envolve condições sociais e o trabalho de gerações anteriores.

5.2 Física de Altas Energias no CTA e o trabalho de Elisabete

Dal Pino aponta que o CTA é mais do que um observatório, é uma ferramenta experimental de física fundamental. Nesta seção, nos debruçamos sobre as dimensões teóricas e experimentais que sustentam a física do CTA.

O CTA opera com base na detecção da radiação Cherenkov atmosférica, uma emissão de luz azulada que ocorre quando partículas eletricamente carregadas ultrapassam a velocidade da luz em um meio, no caso, o ar atmosférico. Esse fenômeno é análogo ao “estruído sônico”, mas no domínio óptico. Quando um fóton gama de altíssima energia entra na atmosfera terrestre, ele interage com núcleos atômicos e produz uma cascata eletromagnética (efeito cascata), gerando elétrons, pósitrons e outras partículas relativísticas. Estas, por sua vez, emitem a radiação Cherenkov. Os telescópios do CTA detectam essa luz difusa, permitindo reconstruir a energia, a direção e a polarização do fóton original.

O CTA detecta o clarão azul da radiação Cherenkov, gerado por partículas que viajam mais rápido que a luz no ar. É uma forma indireta, mas extremamente precisa, de observar raios gama do universo (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Esse método transforma a atmosfera em parte integrante do detector, o próprio ar torna-se o meio sensível. Isso diferencia o CTA de telescópios espaciais como o Fermi, por exemplo, e permite acesso à faixa 20 gigaelétron-volts (GeV) – 300 teraelétron-volts (TeV), regime inacessível por satélite devido ao tamanho necessário dos detectores (Dal Pino, 2025).

O universo funciona como um laboratório natural de física de partículas, abrigando aceleradores cósmicos capazes de atingir energias muito superiores às dos construídos na Terra. Enquanto estruturas como o Grande Colisor de Hádrons (*Large Hadron Collider* – LHC) operam na escala dos teraelétron-volts (TeV), diversas fontes astrofísicas naturais aceleram partículas até petaelétron-volts (PeV) ou mais, gerando fótons gama de altíssima energia, que podem ser detectados por instrumentos como o Conjunto de Telescópios Cherenkov (Dal Pino, 2025).

Entre as fontes mais relevantes estudadas pelo CTA estão os buracos negros de massa estelar e supermassiva, frequentemente cercados por discos de acreção, estruturas formadas por gás e poeira em rotação. A interação entre esse disco e os campos magnéticos intensos pode gerar jatos relativísticos altamente colimados, que são feixes estreitos de partículas carregadas e radiação emitidos a velocidades próximas à da luz. Esses jatos se formam ao longo do eixo de rotação do sistema, onde os campos magnéticos organizados canalizam e aceleram o plasma a altíssimas velocidades, mantendo a direção do fluxo bem definida por longas distâncias (Rohoza et al., 2023).

Devido às velocidades extremas, os efeitos da relatividade restrita tornam-se significativos, havendo dilatação temporal, intensificação do brilho na direção do observador (efeito Doppler relativístico¹⁰) e estreitamento angular da radiação emitida. Esse grau de colimação é fundamental para que os jatos consigam atravessar o meio interestelar com pouca dispersão, sendo observáveis mesmo a bilhões de anos-luz da Terra (Rohoza et al., 2023). Esses jatos constituem verdadeiros aceleradores naturais, em que partículas podem ser

¹⁰ O efeito Doppler relativístico ocorre quando uma fonte luminosa se move a velocidades próximas à da luz em relação ao observador. Nesse regime, a frequência da radiação percebida é alterada não apenas pelo movimento da fonte (como no efeito Doppler clássico), mas também por efeitos relativísticos, como a dilatação do tempo. Quando a fonte se aproxima, a luz é "comprimida" (blueshift), aumentando sua frequência e intensidade aparente fenômeno conhecido como *Doppler boosting*. Para uma fonte se afastando, ocorre o oposto (redshift). Esse efeito é essencial para explicar a emissão intensa observada em jatos relativísticos que apontam para a Terra.

impulsionadas por choques ou reconexão magnética, emitindo radiação gama por processos como emissão síncrotron¹¹ e espalhamento Compton inverso¹² (Dal Pino, 2025).

Outra classe importante de objetos estudados pelo CTA, são os remanescentes de supernova (Supernova Remnants - SNRs), formados a partir da explosão catastrófica de estrelas massivas, fenômeno que marca o final de seu ciclo evolutivo. Após a supernova, o material ejetado se expande rapidamente, interagindo com o meio interestelar e gerando ondas de choque supersônicas. Essas ondas atuam como verdadeiras “usinas aceleradoras” de partículas carregadas (principalmente prótons e elétrons), por meio de um processo chamado aceleração difusiva de primeira ordem, ou modelo de Fermi I, proposto por Enrico Fermi (Blasi, 2013).

Nesse mecanismo, partículas cruzam repetidamente o choque supersônico, sendo espalhadas por irregularidades magnéticas de um lado para o outro. A cada travessia, elas ganham energia, o que leva à formação de um espectro de partículas não térmicas com altas energias. Essas partículas relativísticas podem, então, produzir raios gama através de dois caminhos principais: (i) Interações hadrônicas, quando prótons energéticos colidem com núcleos do meio interestelar, gerando mésons π (píons neutros), que rapidamente se decompõem em dois fótons gama. (ii) Interações leptônicas, quando elétrons relativísticos emitem raios gama via espalhamento Compton inverso (ao transferirem energia para fótons de baixa energia) ou por bremsstrahlung (radiação de frenagem em campos elétricos dos íons) (Blasi, 2013).

Observações modernas com telescópios de raios gama, como o Sistema Estereoscópico de Alta Energia (The High Energy Stereoscopic System - HESS) e o Fermi-LAT, confirmam que SNRs são importantes aceleradores cósmicos e fontes potenciais de raios cósmicos galácticos (Blasi, 2013).

Também são estudadas estrelas de nêutrons e pulsares, remanescentes ultradensos de supernovas que apresentam campos magnéticos extremamente intensos ($\sim 10^{12} - 10^{13}$ G) e

¹¹ Emissão síncrotron: é um processo de radiação não térmica gerado quando partículas carregadas, como elétrons relativísticos (isto é, com velocidades próximas à da luz), espiralam em torno de linhas de campo magnético. A aceleração centrípeta dessas partículas ao longo das trajetórias helicoidais leva à emissão de fótons em uma ampla faixa do espectro eletromagnético, desde ondas de rádio até raios X ou gama, dependendo da energia das partículas e da intensidade do campo magnético envolvido.

¹² Espalhamento Compton inverso: é um processo no qual elétrons altamente energéticos transferem parte de sua energia cinética para fótons de baixa energia, como os do fundo de micro-ondas ou da própria radiação síncrotron. Esse choque resulta na amplificação da energia dos fótons, que podem ser promovidos a faixas de alta frequência, como a dos raios X ou raios gama. Esse processo é fundamental para explicar a emissão de alta energia em diversos objetos astrofísicos.

rotação rápida (dezenas a centenas de rotações por segundo). Esses fatores criam uma magnetosfera¹³ complexa onde elétrons e pósitrons são acelerados por campos elétricos não neutralizados, especialmente em regiões chamadas lacunas de aceleração. As principais lacunas são: Lacuna polar (polar cap): localizada perto dos polos magnéticos, onde linhas de campo magnético emergem da superfície, formando um feixe por onde partículas são aceleradas. A Lacuna de fenda (slot gap): estreita zona adjacente às lacunas polares, estendendo-se até limites das linhas fechadas. E a Lacuna externa (outer gap): situada próxima à linha de luz, região onde a rotação relativística impede neutralização dos campos elétricos (Harding, 2017).

Nessas lacunas, partículas relativísticas geram radiação gama por três mecanismos principais: (i) radiação de curvatura, gerada pela aceleração centrípeta de partículas que seguem trajetórias curvas ao longo das linhas do campo magnético; (ii) radiação síncrotron, oriunda do movimento helicoidal de partículas em torno das linhas do campo, resultando em emissão transversal (Longair, 2011); e (iii) espalhamento Compton inverso, em que partículas relativísticas transferem energia a fótons de baixa energia, elevando-os ao regime gama. Esses modelos encontram forte respaldo nas medidas de polarização, observações indicam que a radiação síncrotron apresenta polarização inferior a 10%, enquanto a radiação de curvatura alcança 40 – 60%, validando a coexistência desses mecanismos nos pulsares (Harding, 2017).

Um destaque importante no estudo do CTA são as galáxias com núcleos ativos (*Active Galactic Nuclei* – AGNs), em particular os blazares, que são um tipo de AGN, ou seja, são galáxias que possuem no centro um buraco negro supermassivo (com milhões ou bilhões de massas solares) que está ativamente “acretando” matéria, ou seja, puxando gás, poeira e até estrelas para seu disco de acreção (Reimer, 2012).

O que torna o blazar especial entre os AGNs é o alinhamento do jato relativístico. Os buracos negros centrais frequentemente lançam jatos de plasma a velocidades próximas à da luz (efeitos relativísticos), perpendicularmente ao disco de acreção. Um objeto é classificado como blazar quando um desses jatos está apontado quase diretamente para a Terra. Esse alinhamento faz com que vejamos o brilho do jato altamente amplificado pelo efeito Doppler

¹³*Magnetosfera* é a região ao redor do corpo celeste onde o campo magnético domina o movimento das partículas carregadas. Nos pulsares, essa estrutura é extremamente energética e relativística, formada por linhas de campo magnético que aprisionam e aceleram elétrons e pósitrons. Devido à rápida rotação e ao intenso campo magnético, surgem regiões com campos elétricos não neutralizados (as lacunas), que permitem a aceleração de partículas a altíssimas energias e a emissão de radiação de alta frequência.

relativístico, aumentando intensamente a sua luminosidade aparente e causando grande variabilidade no tempo (Reimer, 2012).

A emissão observada nos blazares é predominantemente não térmica, ou seja, não segue uma distribuição de corpo negro como aquela típica de estrelas ou discos de acreção. Em vez disso, apresenta-se como uma lei de potência, resultado da presença de populações de elétrons ultra relativísticos distribuídos por leis de potência, que irradiam energia através de processos como radiação síncrotron e espalhamento Compton inverso. Esse comportamento espectral indica que as partículas estão sendo continuamente aceleradas em ambientes extremos, o que caracteriza uma física muito diferente das fontes térmicas usuais (Bottcher, 2007).

Além disso, esses sistemas exibem uma variabilidade intensa em curtíssimas escalas de tempo, que podem ir de apenas algumas horas a poucos dias. Tal variabilidade rápida é interpretada como consequência de dois fatores principais: primeiramente, a própria natureza turbulenta dos jatos relativísticos, que possuem choques internos, regiões de reconexão magnética e variações na taxa de injeção de partículas aceleradas, produzindo mudanças abruptas na emissão. Em segundo lugar, o chamado *beaming* relativístico, fenômeno que ocorre porque o jato está se movendo a velocidades muito próximas à da luz e quase na direção da linha de visada do observador. Esse efeito faz com que a radiação seja altamente colimada e amplificada na direção do movimento, resultando não apenas em um aumento significativo do fluxo observado, mas também em uma contração do tempo observado em comparação ao tempo intrínseco do evento, de modo que variações internas ao jato aparecem ainda mais rápidas para nós (Bottcher, 2007).

Os dois principais mecanismos responsáveis por essa emissão não térmica são complementares. O primeiro é a radiação síncrotron, processo em que elétrons com energias de GeV a TeV espiralam ao redor das linhas do campo magnético presente no jato, emitindo fótons que podem cobrir um amplo espectro que vai do rádio aos raios X. A forma detalhada desse espectro, suas inclinações, quebras e cortes fornece pistas sobre o campo magnético local, o regime de resfriamento cooling¹⁴ dos elétrons e a própria distribuição energética

¹⁴ O regime de cooling (ou resfriamento) refere-se a como elétrons relativísticos perdem energia ao longo do tempo, principalmente via radiação síncrotron e espalhamento Compton inverso. Em um regime de cooling rápido, o tempo característico de perda energética é menor que o tempo de escape ou o tempo dinâmico do sistema, fazendo com que os elétrons rapidamente irradiem quase toda sua energia. Já em um regime de cooling lento, o resfriamento ocorre em uma escala de tempo maior, permitindo que apenas elétrons mais energéticos sofram perdas significativas. Essa distinção afeta diretamente a forma do espectro não térmico observado, indicando propriedades como intensidade do campo magnético, densidade de fótons e mecanismos dominantes de dissipação de energia no jato relativístico.

dessas partículas. O segundo mecanismo é o espalhamento Compton inverso (ou leptônico), pelo qual esses mesmos elétrons relativísticos colidem com fótons de baixa energia, como aqueles produzidos pela própria emissão síncrotron no jato no chamado processo SSC, do inglês *Synchrotron Self-Compton* ou com fótons externos oriundos do disco de acreção ou da coroa em torno do buraco negro central (Bottcher, 2007).

Nessas colisões, os elétrons transferem parte de sua energia cinética aos fótons, impulsionando-os para o regime de altas energias, muitas vezes chegando aos raios gama. Esse processo é denominado “inverso” porque difere do efeito Compton clássico, em que um fóton energético perde energia ao interagir com um elétron em repouso; aqui, o fóton é quem ganha energia do elétron relativístico (Bottcher, 2007).

Portanto, a combinação entre a natureza não térmica da emissão, a extrema variabilidade temporal e a presença desses dois mecanismos radiativos fundamentais, tudo isso amplificado pelo beaming relativístico, faz dos blazares objetos extraordinários para o estudo da física de partículas e campos em condições extremas. Observatórios como o CTA, com sua alta sensibilidade e capacidade de cobrir o regime de dezenas de GeV a TeV, têm papel em investigar em detalhes esses fenômenos, ajudando a esclarecer a física dos jatos relativísticos e o ambiente imediato ao redor dos buracos negros supermassivos que alimentam essas galáxias ativas.

Nesse sentido, Dal Pino explica que seu grupo trabalha justamente nesses contextos:

Modelagem teórica e numérica [...] modelando num computador, numericamente, a origem e evolução de fontes astrofísicas e meios astrofísicos”, que incluem desde “o disco de acreção em torno de um buraco negro supermassivo no centro de uma galáxia” até “jatos relativísticos de matéria e galáxias ativas” (Dal Pino, 2025).

Na modelagem desses objetos, Dal Pino e seu grupo trabalham com simulações tridimensionais de magneto-hidrodinâmica relativística (RMHD). Isso permite compreender a formação e aceleração de jatos relativísticos, estruturas colimadas que se estendem por milhares de anos-luz, emitindo radiação desde o rádio até os raios gama. “*Modelamos desde o disco de acreção até os jatos e o meio intergaláctico. Apesar das escalas diferentes, os processos físicos, como reconexão magnética e choques são os mesmos*” (Dal Pino, 2025).

A reconexão magnética é um dos mecanismos centrais, ocorre quando linhas de campo magnético em direções opostas se rompem e se reconectam, liberando energia armazenada em

campos magnéticos. Esse processo é observado no Sol (erupções solares), mas também em AGNs e pulsares. Esse ambiente de reconexão é capaz de acelerar partículas a altíssimas energias em tempo curto, formando espectros de energia que se ajustam bem aos observados em fontes astrofísicas (Dal Pino, 2025).

Ela destaca que praticamente toda a matéria visível do universo está no estado de plasma, um gás ionizado composto por partículas carregadas, permeado por campos magnéticos. Plasmas são sistemas coletivos que obedecem às equações de MHD (magneto-hidrodinâmica), incorporando efeitos de viscosidade, pressão térmica, forças de Lorentz, resistência elétrica e turbulência. A descrição da evolução de grandes estruturas, como meios interestelares, aglomerados de galáxias ou jatos galácticos, requer modelagem de MHD em escalas relativísticas, envolvendo equações diferenciais parciais não lineares. É neste sentido que atua o trabalho desenvolvido por Dal Pino.

Além de explorar as fontes compactas e violentas do universo, o CTA também será uma ferramenta importante na busca por matéria escura. Como explica Dal Pino (2025), uma das hipóteses é que partículas de matéria escura colidam e aniquilem entre si, produzindo radiação gama. O CTA poderá detectar essas assinaturas em regiões onde a densidade de matéria escura é elevada, como o centro da nossa galáxia ou galáxias anãs.

É nesse sentido que a astrofísica de altas energias também se cruza com a física de partículas ao investigar possíveis assinaturas indiretas de matéria escura. A análise da distribuição da matéria no universo revela que a maior parte do conteúdo material não é observável por radiação eletromagnética. Dal Pino explica que apenas uma pequena fração do cosmos é composta pela matéria visível:

Isto aqui é matéria visível, que produz raio gama, é matéria que a gente vê, mas a matéria, a quantidade, a porcentagem da matéria que a gente consegue ver pela radiação eletromagnética é apenas, é menos de 5% de matéria visível. Todo o resto é matéria invisível, é matéria invisível, que é dark matter, que a gente só observa, quer dizer, a gente não observa diretamente, a gente sabe que ela está lá porque ela interage através do seu campo gravitacional com a matéria visível, mas a gente não vê a matéria escura, e acontece que essa matéria escura são outros 25% e depois 70% é energia escura [...]. E a matéria escura propriamente [...] não emite radiação eletromagnética de nenhuma forma, [...] só interage através da força gravitacional [...], mas a gente não sabe a cara dela, nem a constituição dela (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Além disso, Dal Pino destaca que teorias de física de partículas, como extensões do modelo padrão, preveem que certos candidatos à matéria escura podem interagir de forma a gerar emissões detectáveis. Ela observa:

A gente sabe que entre os candidatos de matéria escura, porque você faz previsões teóricas para a natureza da matéria escura a partir da parte da ciência, que é a ciência de partículas, né? Física de partículas. E uma das possibilidades é que essa matéria escura seja formada de partículas que quando colidem entre si, elas aniquilam e produzem radiação gama, mas nas altíssimas energias. [...] Então tem que ser com um arranjo de telescópios raios gama de altíssima resolução, então o CTAO vai conseguir observar essa radiação vinda de galáxias anãs, porque galáxias anãs têm grandes halos de matéria escura [...], talvez observando também o centro da nossa galáxia (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Ela também relaciona esses estudos à atividade de projetos observacionais atuais, apontando o interesse em investigar a possível origem e as características da matéria escura por meio de fontes astrofísicas energéticas:

A ciência que a gente faz tanto no AstroMediaWay como no CTAe que vai ser feita, ela é muito abrangente, porque ela abraça desde estudar, investigar essas fontes compactas que são aceleradores de raios cósmicos, como jatos, [...] supernovas, pulsares [...]. A gente também vai estudar, por exemplo, a origem da matéria escura, que você sabe que o universo é formado de matéria que a gente não vê, né? (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Segundo hipóteses que estendem o modelo padrão da física de partículas, como a supersimetria¹⁵, uma classe relevante de candidatos a matéria escura são os WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). Esses hipotéticos constituintes do universo teriam massa e interagiriam apenas por gravidade e pelas forças fracas, o que os tornaria praticamente invisíveis para detecções diretas via radiação eletromagnética. Entretanto, em determinadas

¹⁵ Supersimetria (SUSY) é uma extensão teórica do modelo padrão da física de partículas que propõe uma simetria entre férmions (partículas de spin semi-inteiro, como elétrons e quarks) e bósons (partículas de spin inteiro, como fótons e glúons). Cada partícula conhecida teria um parceiro supersimétrico mais massivo — os chamados “spartners”. Embora ainda não confirmada experimentalmente, a supersimetria oferece soluções elegantes para problemas como a hierarquia de massas e fornece candidatos naturais para matéria escura, como os WIMPs.

condições, esses WIMPs poderiam colidir entre si e se aniquilar, gerando como subproduto fótons gama, isto é, com energias bem definidas, formando linhas espectrais características.

As regiões prioritárias para apontar esses telescópios, como o CTA, são determinadas por onde a distribuição de matéria escura se estima ser mais densa. As galáxias anãs esferoidais, por exemplo, têm baixo conteúdo de gás e estrelas, mas apresentam halos massivos de matéria escura, o que reduz ruídos astrofísicos e aumenta a chance de isolar um sinal. O centro da Via Láctea também é um alvo natural, pois simulações cosmológicas indicam um pico de concentração de matéria escura nessa região. Já os aglomerados de galáxias são considerados porque o movimento de suas galáxias componentes sugere a presença de massa não explicada pela matéria luminosa.

A detecção de uma linha gama estreita e estável, coincidente com as energias previstas por modelos teóricos para a aniquilação de partículas de matéria escura, representaria um avanço histórico, seria a primeira evidência indireta e quase direta de matéria escura, confirmando experimentalmente conjecturas fundamentais da física de partículas e da cosmologia. Tal observação não apenas revelaria um componente oculto do universo, responsável por cerca de 25% do seu conteúdo energético, como também abriria novas perspectivas para compreender a formação e evolução das estruturas cósmicas.

Embora o CTA não seja um instrumento cosmológico tradicional, ele permite refinar modelos da estrutura do universo ao estudar a distribuição de fontes de radiação gama, fenômenos de absorção extragaláctica e efeitos do fundo cósmico infravermelho. Isso auxilia na determinação da densidade de fótons no universo.

Além do impacto científico, Dal Pino enfatiza a importância formativa do CTA, tanto na pesquisa quanto no ensino: “O CTA não é só pesquisa de fronteira. É também uma plataforma educativa. A gente forma alunos do ensino médio ao pós-doutorado” (Dal Pino, 2025).⁶⁰ O CTA participa de projetos de extensão, feiras científicas e colaborações institucionais que permitem o uso de dados reais de astrofísica em salas de aula e trabalhos de iniciação científica, tornando o ensino mais conectado à ciência em construção.

5.3 Educação e o papel do professor

Em determinado momento da entrevista, Elisabete Dal Pino, a partir de sua experiência como cientista e professora, apresentou uma visão crítica sobre os desafios contemporâneos da formação humana.

Um dos pontos mais contundentes levantados pela cientista refere-se à relação entre o uso massivo do celular, a superficialidade cognitiva e os riscos ao desenvolvimento mental,

sobretudo em crianças e adolescentes:

Hoje o professor tá ali, tá lecionando e o aluno já tá aqui, né? Nem tá escutando o que tu tá falando. [...] A gente tá competindo com isso aqui, ó [disse ela, mostrando o celular na mão] (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

A imagem do professor competindo com o celular sintetiza um dos maiores desafios pedagógicos contemporâneos: disputar a atenção dos estudantes com plataformas projetadas justamente para capturá-la de modo fragmentado e imediato. Para Dal Pino, isso não é apenas um incômodo superficial, mas um risco concreto ao desenvolvimento cognitivo: *“Precisamos tirar o celular da mão da garotada durante a aula, antes dos 16 [anos] é um perigo pro desenvolvimento mental”* (Dal Pino, 2025).

Seu alerta dialoga diretamente com Nicholas Carr (2011), que discute como a *internet* e seus fluxos rápidos de informação moldam o cérebro para processos cada vez mais curtos, fragmentados, dificultando o aprofundamento, a leitura longa e a construção de raciocínios complexos. Dal Pino vai além, sugerindo consequências neurológicas mais sérias, o que reforça a necessidade de repensar o espaço escolar como ambiente protegido para o cultivo da atenção e do pensamento disciplinado.

Do ponto de vista crítico, o desafio é justamente equilibrar as possibilidades didáticas que as tecnologias oferecem com a preservação do tempo lento da reflexão. O professor, nesse contexto, não é um mero “animador digital”, mas alguém que organiza o caos informacional, ajudando o aluno a distinguir o que é relevante do que é ruído.

Dal Pino sublinha o papel do professor como figura central para a qualidade da educação no Brasil. Para ela, o país pode até prescindir de alguns pesquisadores, mas jamais de bons professores:

A gente precisa expandir pesquisadores, mas principalmente não pode faltar educador num país com mais de 200 milhões de habitantes. Vocês são essa chave num país que está emburrecendo (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Esse entendimento ressoa fortemente com Paulo Freire (1996), para quem o educador deve formar sujeitos críticos, capazes de “ler o mundo” e intervir nele. Não basta, portanto, transmitir conteúdos: é preciso inspirar inquietações, encorajar perguntas e criar contextos nos quais o educando possa reconstruir ativamente o conhecimento.

Sob a ótica de Bourdieu (1999), essa mediação é também um ato político: o professor é quem pode democratizar o acesso ao capital cultural, permitindo que estudantes que não cresceram cercados por livros ou códigos acadêmicos possam decifrar os sistemas simbólicos que estruturam a ciência e as artes. Dal Pino aponta para isso ao destacar que sem professores comprometidos, o país não apenas estaciona, ele regride intelectualmente.

Dal Pino não limita suas críticas ao ambiente escolar. Ela expande sua análise para o impacto das chamadas *fake news* e do negacionismo científico, alertando para o perigo que é quando pessoas em posição de destaque, sejam políticos, influenciadores ou líderes religiosos, difundem teorias sem respaldo empírico, abalando a confiança pública na ciência:

Tem muita coisa ruim por trás, porque tem muita gente ruim também espalhando informação ruim nesses nossos meios. [...] Fica difícil você saber onde tá a verdade (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

De um ponto de vista mais analítico, combater o negacionismo não significa doutrinar, mas abrir espaços para o debate fundamentado, incentivando a dúvida saudável, ancorada em evidências e não em boatos. Trata-se de um desafio pedagógico que exige tanto didática quanto coragem intelectual.

Para Dal Pino, essa “crise do pensamento crítico”, acentuada por escolas fragilizadas, professores desvalorizados e cidadãos desinformados, tem reflexos diretos em escolhas políticas que determinam o futuro do país e do planeta. É nesse ponto que ela amplia o raciocínio, apontando como recursos que poderiam ser destinados à ciência, à saúde, à educação e ao meio ambiente acabam direcionados para projetos bélicos ou disputas de poder que pouco contribuem para o bem coletivo:

Essa é uma grande preocupação da minha geração agora, uma responsabilidade imensa. O aquecimento global... a gente devia estar investindo todo esse dinheiro das guerras em desenvolvimento sustentável, e a gente não tá fazendo isso, não tá fazendo a lição de casa no planeta (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Ao relacionar a fragilidade do debate científico no cotidiano que permite que teorias infundadas prosperem e que prioridades orçamentárias caminhem para áreas que não promovem bem-estar, Dal Pino revela como tudo está conectado: desinformação, ausência de educação crítica e más decisões estruturais são partes do mesmo problema.

Essa reflexão expõe que a falta de investimento sério em educação não é um “déficit setorial”, mas um traço de um projeto de sociedade que abre mão do conhecimento, do diálogo fundamentado e da responsabilidade coletiva. Um país que não valoriza professores, ciência e pensamento estruturado acaba igualmente vulnerável a boatos, a escolhas imediatistas e a políticas que negligenciam o futuro, seja ele climático, democrático ou social.

Dal Pino, ao falar sobre sua trajetória e suas convicções como cientista, traz também, como o fazer científico e o ato educativo são indissociáveis. Para ela,

Ensinar para o pesquisador, ensinar em sala de aula e orientar é fundamental para todo pesquisador, porque isso te mantém reciclando. Você recicla não só por causa da pesquisa que você faz aqui, mas sobretudo porque você tem que passar isso adiante e ampliar. [...] Graças ao ensino e à orientação. É fundamental e é muito importante para a gente. A gente aprende muito porque você recicla o tempo todo (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Essa percepção desloca a docência do lugar acessório que muitas vezes ocupa, destacando-a como parte constitutiva do próprio trabalho científico, essencial para manter vivo o processo investigativo.

Ela amplia ainda mais essa visão ao refletir sobre o papel do educador na sociedade, afirmando:

Eu acho que o trabalho que a gente, eu digo a gente no âmbito de pesquisadora, de professora, é de que a gente tá indo buscar essa verdade, tá indo atrás das fontes, né? E educar essa nova geração, que atualmente só fica aqui [no celular]. É um papel do educador (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

A fala sublinha a responsabilidade dos educadores, sobretudo num contexto em que a desinformação e o consumo superficial de conteúdos ameaçam o pensamento crítico. Ela ainda acrescenta que,

O ensino é uma peça fundamental, o professor precisa ser mais respeitado e mais valorizado nesse país, né? Desde lá o ensino fundamental, o ensino médio... Um país que investe em educação seriamente, vira potência (Dal Pino, 2025).

Seu argumento articula diretamente política pública, valorização docente e desenvolvimento nacional, defendendo que o investimento em educação deve ser estrutural e estratégico.

Por fim, Dal Pino faz um apontamento que resume, de certo ponto, sua visão integrada sobre ciência e ensino: “*O pesquisador que não é educador também, tende a travar [...] A licenciatura precisa ser não só mantida, mas valorizada, para que a gente tenha professores de altíssimo nível*”. Ao reconhecer que o pesquisador que se afasta do ensino corre o risco de estagnar, ela reposiciona o professor não apenas como mediador de conteúdos, mas como elemento importante para o próprio avanço da ciência, sustentando uma cadeia de renovação que beneficia toda a sociedade.

5.3.1 Reflexões sobre o papel do professor no contexto da educação brasileira

A partir das falas de Elisabete sobre o papel do professor, da educação e o enfraquecimento do pensamento crítico diante da desinformação e da superficialidade, encontra-se um desafio: como traduzir a ciência contemporânea, como o trabalho desenvolvido por Elisabete, por exemplo, para o contexto do Ensino Médio público, sem cair em idealismos descolados da realidade?

Falar em radiação gama, física de partículas e instrumentos como telescópios Cherenkov, como os do projeto CTA, pode parecer distante da vida escolar de estudantes que frequentemente sequer têm acesso a laboratórios básicos, livros atualizados ou uma conexão estável à *internet*. As propostas pedagógicas de Nascimento e Carvalho (2003), que defendem o uso da História e Filosofia da Ciência para abordar a Natureza da Ciência (NdC) em sala de aula, são de grande apoio no plano teórico e metodológico.

Contudo, sua implementação sistemática esbarra em obstáculos estruturais, como a ausência de políticas de valorização docente, a precarização do trabalho do professor e a descontinuidade de programas de formação continuada. Como destacam Peduzzi e Raicik (2020), ensinar NdC requer tempo, apoio institucional, acesso a materiais e condições de trabalho que permitam pesquisa, experimentação e reflexão, condições que, no Brasil, permanecem concentradas em situação de privilégio acadêmico.

Projetos de extensão universitária que envolvem observações astronômicas com telescópios, visitas a planetários ou oficinas com experimentação ativa são experiências ricas e transformadoras. No entanto, ainda estão majoritariamente restritas a instituições de ensino superior com infraestrutura consolidada, localizadas em regiões urbanas centrais e com financiamento contínuo. Esperar que o professor da escola básica reproduza essas práticas,

sem o mesmo apoio, é ignorar a desigualdade epistêmica e material que atravessa o sistema educacional brasileiro.

O que está em jogo, portanto, é mais do que uma questão didática. Trata-se de uma questão de política educacional. A crítica de Dal Pino ao desprestígio do professor não pode ser lida apenas como um apelo à vocação, mas como indício de uma estrutura que desvaloriza aqueles que têm a missão de formar sujeitos críticos.

Nesse cenário, o papel do professor-pesquisador precisa ser reconceituado. Não como figura idealizada que consegue reinventar o ensino a despeito de todas as adversidades, mas como um agente que tensiona os limites impostos pela realidade escolar e que busca para que o conhecimento científico não seja privilégio de poucos. Incorporar temas como a astrofísica, os raios gama e a investigação da matéria escura não deve significar impor ao professor mais uma carga de inovação sob pressão, mas abrir espaços para colaboração institucional, para a construção coletiva de saberes e para a formulação de políticas públicas que sustentem práticas emancipatórias.

É nesse ponto que a Natureza da Ciência, entendida como construção histórica, coletiva, revisável e imersa em disputas, pode ser trabalhada também como metáfora do próprio fazer docente. O professor que se vê diante da ausência de recursos, do isolamento institucional ou da sobrecarga de trabalho, vive, em seu cotidiano, os conflitos, resistências e reinvenções que a ciência historicamente enfrentou. Ensinar ciência, nesse contexto, não é apenas transmitir conteúdos, mas posicionar-se frente a um projeto de sociedade que escolhe, ou não, investir no pensamento crítico.

Conforme argumentam Peduzzi e Raicik (2020), uma das tarefas centrais do ensino de ciências é permitir que os estudantes reconheçam os mecanismos sociais que condicionam a produção e a circulação do conhecimento. Ao discutir com os alunos por que não há um laboratório em sua escola, por que os telescópios não estão disponíveis, por que não estudam astronomia com o mesmo entusiasmo que em vídeos do YouTube, o professor pode abrir caminho para uma alfabetização científica que não apenas explica o mundo, mas problematiza as condições de acesso a ele.

Deste modo, apresentar a trajetória de Elisabete Dal Pino sem mediação crítica corre o risco de reforçar a ideia de que o êxito científico é resultado apenas de esforço individual, apagando os marcadores sociais que condicionam o acesso e a permanência na ciência. Ao mesmo tempo em que sua trajetória pode inspirar, ela também evidencia os limites estruturais de pertencimento, pois Dal Pino formou-se em uma universidade pública de excelência, teve acesso a bolsas, redes de colaboração e oportunidades de pesquisa, realidades inacessíveis à

maioria das estudantes brasileiras, sobretudo negras, periféricas e da rede pública. Reconhecer isso não diminui seus méritos, mas os insere num contexto de privilégios que precisam ser problematizados para que a ciência se torne, de fato, um campo mais democrático.

5.4 Debate de gênero e a importância de narrar trajetórias

As falas de Elisabete revelam uma perspectiva historicamente situada sobre o papel das mulheres na ciência, especialmente nas áreas da física e da astronomia. Ao narrar suas experiências e observações, ela ilumina não apenas trajetórias individuais, mas também os caminhos coletivos percorridos por mulheres que desafiaram estruturas acadêmicas marcadas por valores tradicionalmente masculinos. Sua visão evidencia avanços importantes, como o relativo equilíbrio de gênero hoje observado na astronomia, mas também ressalta as persistentes assimetrias que caracterizam a física, onde a presença feminina ainda é reduzida. Essas colocações se entrelaçam com um panorama mais amplo de estudos sobre gênero e ciência, que apontam como preconceitos sutis, expectativas sociais e dinâmicas institucionais continuam a dificultar a plena participação das mulheres em campos considerados “masculinos”.

Conforme análise de Silva e Ribeiro (2014), mesmo com o aumento expressivo do número de mulheres em universidades e instituições de pesquisa nas últimas décadas, observa-se uma concentração feminina em campos tradicionalmente tidos como “guetos femininos”, como Psicologia, Serviço Social e Enfermagem, enquanto áreas como física e astronomia permanecem majoritariamente masculinas. Ademais, o estudo evidencia que, quando mulheres ingressam nesses espaços, enfrentam o chamado “teto de vidro”, barreiras invisíveis que restringem seu acesso aos níveis mais altos da carreira científica, como bolsas de produtividade e posições de liderança. Essa desigualdade é reforçada por valores e padrões culturais que associam o fazer científico a atributos considerados masculinos, criando ambientes competitivos e exigências de dedicação exclusiva, que dificultam especialmente para aquelas que também assumem responsabilidades familiares (Silva; Ribeiro, 2014).

Já as falas de Elisabete revelam uma percepção geracional marcada por mudanças culturais significativas na forma como as mulheres vêm sendo vistas na ciência, especialmente na astronomia. Ao afirmar que seus colegas, formados em centros europeus e norte-americanos, trouxeram “uma mentalidade aberta para a mulher”, Dal Pino indica que,

Na nossa geração, a gente já pegou colegas que tinham um olhar mais igual para a mulher; colegas que fizeram seus doutorados, praticamente 100% deles fizeram seus

doutorados, ou na Europa, ou nos Estados Unidos, sobretudo na Europa. Então eles já vieram com essa mentalidade aberta para a mulher, né? A pesquisadora do século XX, tudo bem, a mulher astrônoma não era um bicho de sete cabeças para eles. E ver nessas alunas mulheres, e ver nessas alunas colegas futuros, foi natural, tanto é que mais ou menos contratados, docentes contratados no Brasil na área de astronomia e astrofísica, é quase que 50% (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Esse trecho reflete avanços conquistados à custa de lutas históricas, mas não homoganeamente distribuídos. Como ela mesma aponta, “isso não acontece tanto na física”, área onde o percentual de pesquisadoras permanece consideravelmente menor, fenômeno interpretado por Silva e Ribeiro (2014) como consequência de uma cultura acadêmica ainda firmemente ancorada em padrões masculinos, que dificultam a inserção e permanência das mulheres. Quando Dal Pino destaca que o ambiente acadêmico absorveu essa população feminina “*porque as mulheres pesquisadoras são muito aguerridas, são muito boas, são tão boas quanto os homens*”, expõe um ponto frequentemente naturalizado, a necessidade de constante comprovação da competência feminina em espaços em que o modelo ideal de cientista segue atrelado a atributos historicamente masculinos (Schiebinger, 2001). Assim, o testemunho de Elisabete não apenas confirma dados recentes, mas também revela nuances do processo social que transformou a presença da mulher na astronomia em algo “natural”, ao passo que, paradoxalmente, segue demandando da cientista uma reafirmação contínua de sua excelência.

As falas de Dal Pino também recorda o caso de Sueli Aldrovandi, uma das primeiras astrônomas brasileiras a obter doutorado na França, que, segundo ela,

Embora, se você falar com a astrônoma, Sueli Aldrubandi, por exemplo, das primeiras astrônomas brasileiras que fez doutorado na França, inclusive, ela sofreu, sofreu barreiras aqui, ela costumava contar que ela sofreu barreiras por ser mulher (Dal Pino, 2025, entrevista pessoal).

Esse exemplo reforça o que Schiebinger (2001) discute ao analisar a história da ciência como um campo historicamente marcado por padrões masculinos que, não raro, tornam as mulheres invisíveis ou subestimadas. Como destaca a autora, “o sucesso de muitas mulheres foi obscurecido pela prática, comum na ciência, de dar crédito ao cientista homem, não raro seu colega, orientador ou marido, mesmo quando as ideias ou descobertas partiram dela” (Schiebinger, 2001, p. 115).

Nesse sentido, as reflexões trazidas por Dal Pino não só documentam o avanço da presença feminina em setores como a astronomia, mas também convidam a problematizar a ciência como um empreendimento socialmente situado, permeado por valores e dinâmicas históricas que moldam quem pode ser cientista e em que condições. Como argumenta Schiebinger (2001, p. 27), “o feminismo não apenas pressionou pela inclusão de mulheres na ciência; questionou o que conta como conhecimento científico e por que”, sublinhando que discutir gênero na ciência é mais do que uma pauta de acesso, é também uma pauta epistemológica, que incide sobre o próprio modo de fazer ciência.

A trajetória de Elisabete Dal Pino, tal como reconstruída nesta História Oral, abre espaço para refletir de modo mais profundo sobre a presença feminina na ciência e sobre o sentido de registrar essas histórias. Embora Dal Pino não relate episódios diretos de discriminação, ao longo de sua fala surgem sinais claros de que o gênero atravessa a prática científica, seja nos pequenos gestos do cotidiano, seja na forma como o reconhecimento institucional acontece.

Ao mencionar colegas astrônomas brasileiras que enfrentaram barreiras significativas para firmar suas carreiras, Dal Pino evidencia que o caminho para as mulheres no meio acadêmico, sobretudo em áreas de forte tradição masculina como a física e astrofísica, continua sendo marcado por desafios que vão além da competência técnica. Esses desafios muitas vezes se manifestam não em hostilidades abertas, mas em olhares, desconfianças, expectativas menores ou sobrecargas silenciosas. É o que estudiosas como Joan Scott (1995) apontam ao mostrar que o gênero organiza as relações sociais e define, muitas vezes de forma implícita, quem tem legitimidade para ocupar certos espaços de poder e prestígio.

Ao mesmo tempo, esse olhar nos lembra que a presença de Dal Pino hoje como professora titular, coordenadora de grupos de pesquisa e referência em astrofísica, não é obra apenas de seu esforço individual. É também fruto de um processo histórico, no qual gerações anteriores abriram brechas e conquistaram espaços que antes lhes eram vedados. A geração dela, por sua vez, amplia esses caminhos, tornando o percurso mais “leve” para as jovens cientistas que hoje ingressam na universidade ou na pós-graduação.

Assim, o debate de gênero aqui não se reduz a denunciar preconceitos explícitos, mas se amplia para compreender como redes acadêmicas, culturas institucionais e valores simbólicos se articulam, afetando quem é ouvido, quem é incentivado, quem lidera projetos e quem fica à margem. Registrar a trajetória de Dal Pino é também uma forma de escrever na história da ciência brasileira o protagonismo de uma mulher que, com talento, disciplina e

curiosidade, ajudou a consolidar um campo de pesquisa sofisticado abrindo espaço, com sua presença, para que outras possam também construir suas próprias trajetórias.

Essas observações ganham força quando ligadas à importância de se registrar histórias como a de Dal Pino pela perspectiva da História Oral. Ouvir a cientista falar de seus medos, entusiasmos e escolhas permite enxergar além dos currículos ou das métricas de produção acadêmica. É perceber o que Barbara Carine (1994) sugere: biografias, especialmente as de mulheres, revelam não apenas trajetórias pessoais, mas as condições sociais, institucionais e simbólicas que tornaram essas trajetórias possíveis ou quase impossíveis.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Encerrar este trabalho a partir da trajetória de Elisabete Dal Pino permite-nos ver um aspecto muitas vezes invisível nas discussões sobre ciência, gênero e educação: a pluralidade de percursos possíveis no fazer científico e os diferentes acessos a esses caminhos. Ao relatar como foi tratada com respeito durante o pós-doutorado em ambientes onde a presença de mulheres na astronomia já era naturalizada, Dal Pino oferece um vislumbre, espaço ainda distante da realidade de muitas. Um lugar onde a cientista pode ser apenas isso, cientista, sem

que se questione sua legitimidade ou se espere dela um desempenho acima da média para compensar preconceitos sutis.

Esse tipo de ambiente, em que as mulheres não carregam o peso constante de provar que merecem estar ali, é fundamental não só para o bem-estar pessoal, mas para o pleno florescimento do trabalho científico. Quando as pesquisadoras podem dedicar suas energias ao estudo, à experimentação e à orientação, sem distrações corrosivas que exigem reafirmações permanentes de valor, todo o campo do conhecimento se beneficia. A ciência ganha em diversidade de perspectivas, em ousadia intelectual e em humanidade, porque passa a ser praticada por pessoas que estão inteiras, e não exauridas por resistências silenciosas.

Além disso, histórias como a de Dal Pino cumprem um papel simbólico. Em um contexto onde tantas mulheres, por medo de fracassar ou por não encontrarem exemplos que lhes mostrem ser possível, acabam abandonando carreiras promissoras, testemunhos como o dela ajudam a abrir frestas de esperança. É claro que sua trajetória foi moldada por condições muito próprias como oportunidades, redes acadêmicas, apoio familiar e, que nem todas encontram. Mas justamente por isso, narrar e analisar seu percurso serve para relatar o que é necessário construir coletivamente: políticas, instituições e culturas que permitam a cada menina ou jovem mulher se ver, um dia, plenamente no lugar que deseja ocupar.

No entanto, é preciso reconhecer que a construção dessa trajetória não dependeu apenas de esforço ou excelência pessoal, foi possibilitada por uma rede de apoios institucionais, familiares e acadêmicos, além de condições estruturais favoráveis que ainda não estão ao alcance de todas. Ao ignorar esses fatores, corre-se o risco de transformar uma história inspiradora em um exemplo meritocrático, reforçando a lógica da exceção e escondendo os mecanismos de exclusão que operam de forma persistente no sistema científico brasileiro.

Ao mesmo tempo, não se pode perder de vista o impacto concreto do trabalho científico que ela realiza. Dal Pino coordena grupos que modelam o comportamento de plasmas, jatos relativísticos e buracos negros, e participa do Cherenkov Telescope Array (CTA), um dos maiores projetos internacionais para entender os fenômenos mais energéticos do universo. Mas, curiosamente, mesmo quando fala desses saltos impressionantes da astrofísica, não deixa de retornar ao ponto que considera mais crucial: a educação, o professor, a formação de jovens capazes de pensar criticamente. É como se dissesse, implicitamente, que sem isso não há telescópio que baste, porque não haverá quem saiba para onde apontá-lo, nem como interpretar o que ele revelar.

E é justamente quando a educação, a ciência e o compromisso com uma sociedade mais justa caminham juntos, enfrentando não só as barreiras de gênero, mas também as de classe, raça e todas as formas de preconceito que ainda estruturam o acesso ao conhecimento, que a ciência, educação e igualdade deixam de ser pautas isoladas e se tornam, juntas.

Por fim, se este trabalho pode deixar uma contribuição, ela está na afirmação de que ciência, educação e justiça social não são pautas separadas, mas dimensões profundamente interligadas. A trajetória de Elisabete Dal Pino, ao mesmo tempo em que revela as possibilidades da ciência brasileira, também convida à reflexão sobre seus limites e contradições e o quanto essas condições ainda não estão amplamente distribuídas. Reconhecer o valor de sua produção científica e educacional é também reconhecer a importância de ampliar as oportunidades que possibilitaram sua formação e atuação, para que não sigam sendo privilégio de poucos. Seu percurso é valioso não apenas pelas conquistas que representa, mas também por nos permitir discutir as condições que tornam tais trajetórias possíveis e tantas outras, inviáveis. Que sua história nos inspire, sim, mas sobretudo nos faça questionar o que ainda podemos construir coletivamente.

7 APÊNDICES

7.1 TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)



Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)

Prezada Prof.^a Dr.^a Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino,

Convidamos cordialmente a senhora para participar do estudo “**ELISABETE MARIA DE GOUVEIA DAL PINO: TRAJETÓRIA E CONTRIBUIÇÕES DA CIENTISTA BRASILEIRA EM PESQUISA DE RAIOS GAMA E IMPLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO**”,

que está sendo realizado pela pesquisadora Alice Daiane Farias de Souza, aluna do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) - Campus Araranguá, sob a orientação e responsabilidade do Prof. Dr. [Bruno Leal Dias](#) e sob a orientação da Profa. Ma. [Larissa do Nascimento Pires](#).

Este estudo integra o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) da pesquisadora e tem como objetivo registrar e analisar sua trajetória científica e educacional, com ênfase em suas contribuições para a astrofísica de altas energias, especialmente no projeto **Cherenkov Telescope Array (CTA)**, bem como sua atuação na promoção da educação científica no Brasil. A pesquisa será realizada por meio de uma entrevista semiestruturada, com previsão de duração de 60 a 90 minutos, realizada remotamente (via videoconferência), e será gravada em áudio e vídeo, mediante sua autorização.

Os dados coletados serão utilizados inicialmente na elaboração do TCC e, com a devida autorização, poderão ser incorporados a pesquisas futuras e artigos científicos, com possibilidade de publicação em revistas acadêmicas da área. O material também será disponibilizado no repositório institucional do IFSC e respeitando todas as diretrizes éticas quanto ao uso das informações.

De acordo com a legislação vigente, toda pesquisa envolvendo seres humanos implica riscos, mesmo que mínimos. Esses riscos devem ser analisados e minimizados com medidas de precaução, em conformidade com a Resolução CNS nº 466/12, que define o risco como qualquer possibilidade de dano físico, psíquico, moral, intelectual, social, cultural ou espiritual ao participante da pesquisa, em qualquer fase do estudo. No contexto deste projeto é importante destacar algumas possibilidades e as medidas preventivas adotadas:

a) Desconforto emocional ao abordar questões pessoais ou profissionais. A entrevista será explicada previamente por meio deste TCLE, garantindo transparência. A entrevista também será conduzida com empatia e respeito e você poderá recusar-se a responder qualquer pergunta, bem como pausar ou encerrar a entrevista a qualquer

momento, sem necessidade de justificativa.

b) Fadiga ou estresse emocional durante a entrevista. Serão oferecidos intervalos sempre que necessário, respeitando seus limites físicos e emocionais.

c) Quebra de sigilo ou uso indevido das informações compartilhada. Os dados coletados serão armazenados com segurança e acesso restrito à equipe de pesquisa. A gravação será preservada por, no mínimo, cinco anos e descartada conforme a legislação vigente. A divulgação de seu nome ou imagem ocorrerá apenas com sua autorização expressa.

d) Interpretação inadequada de suas **falas**. A transcrição da entrevista será compartilhada com você para validação prévia, garantindo fidelidade às suas palavras e intenção.

e) Reações emocionais mais intensas durante ou após a entrevista. Será garantida assistência imediata em caso de desconfortos físicos e emocionais decorrentes da participação na pesquisa, com encaminhamento a serviços especializados próximos, sendo os custos integralmente assumidos pelos responsáveis pela pesquisa. Essa providência visa assegurar o cuidado necessário, conforme previsto na Resolução nº 466/2012/CNS (item V.6) e na Resolução nº 510/2016/CNS (art. 3º, inciso X, e art. 19, §2º), sem repassar quaisquer encargos ao IFSC e ao SUS.

A participação não implicará em qualquer custo, tampouco haverá remuneração. Sua colaboração é voluntária e poderá ser retirada a qualquer momento, inclusive após a entrevista, sem qualquer prejuízo pessoal ou institucional.

Os resultados serão utilizados para fins acadêmicos e científicos, com previsão de publicação no repositório institucional do IFSC e eventualmente em revistas científicas da área. Sua identidade será mencionada nos resultados da pesquisa, uma vez que a entrevista tem como foco central sua trajetória. Todas as informações serão apresentadas com o devido respeito, e o uso do seu nome e imagem ocorrerá conforme autorizado neste termo.

Para qualquer outra informação ou esclarecimento, você poderá entrar em contato com a pesquisadora Alice Daiane Farias de Souza, pelo telefone (51) 996626818 ou pelo email: alicedaianefs@gmail.com (pessoal) e alice.dfs@aluno.ifsc.edu.br (institucional), ou ainda poderá consultar o pesquisador responsável, o Prof. Bruno Leal Dias pelo e-mail: bruno.leal@ifsc.edu.br. Em caso de dúvidas quanto aos seus direitos você poderá entrar em contato com o Comitê de Ética em Pesquisa do IFSC localizado dentro da própria Instituição, à Rua 14 de Julho nº150 segundo andar sala 33B Florianópolis-SC CEP (correios): 88075-

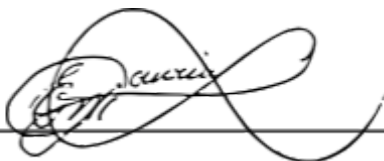
010). Horário de funcionamento definido de segunda-feira a sexta-feira das 8h às 12h e das 14h às 17h para contato dos pesquisadores e participantes das pesquisas. Telefone para contato (48)3877-9054 e e-mail cepsh@ifsc.edu.br.

CONSENTIMENTO DA PESSOA (TITULAR) COMO PARTICIPANTE DE PESQUISA

Eu, ELISABETE MARIA DEGOUVEIA DAL PINO, abaixo assinado, concordo em participar do estudo. Fui devidamente informado e esclarecido pelo pesquisador sobre a pesquisa e os procedimentos nela envolvidos, bem como os riscos e benefícios decorrentes da minha participação. Foi-me garantido que posso retirar meu consentimento a qualquer momento e ter acesso ao registro do consentimento sempre que solicitado.

São Paulo, 11 de agosto de 2025.

Assinatura do participante da pesquisa:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Elisabete Maria Degouveia Dal Pino', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

Assinatura do pesquisador responsável

7.2 TERMO DE CESSÃO DE DIREITO DE USO DE IMAGEM



Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

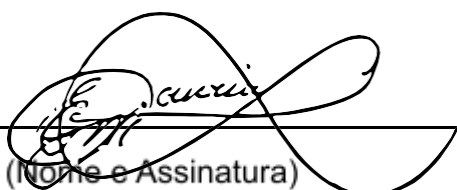
TERMO DE CESSÃO DE DIREITO DE USO DE IMAGEM

Eu, Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino, inscrito(a) no CPF nº05099806864, autorizo o uso de minha imagem em conformidade com os art. 6º, 7º, 8º e 17º nos termos da Lei nº 13.709/2018 (Lei Geral de Proteção de Dados), exclusivamente, no projeto intitulado "ELISABETE MARIA DE GOUVEIA DAL PINO: TRAJETÓRIA E CONTRIBUIÇÕES DA CIENTISTA BRASILEIRA EM PESQUISA DE RAIOS GAMA E IMPLICAÇÕES NA EDUCAÇÃO", de autoria/organizada(o) por Álice Daiane Farias de Souza, Larissa do Nascimento Pires e Bruno Leal Dias e seus posteriores desdobramentos, como publicações e divulgação, desde que respeitadas os preceitos éticos.

A autorização é concedida a título gratuito, abrangendo o uso da imagem acima mencionada em todo território nacional e no exterior.

Por esta ser a expressão da minha vontade **declaro que autorizo o uso acima descrito** sem que nada haja a ser reclamado a título de direitos conexos à minha imagem ou a qualquer outro.

São Paulo, 11 de agosto de 2025


(Nome e Assinatura)

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA FAPESP. Novo telescópio irá detectar radiação de mais alta energia produzida no universo, 2022. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/novo-telescopio-ira-detectar-radiacao-de-mais-alta-energia-produzida-no-universo/39252>. Acesso em: 7 jul. 2024.

AGÊNCIA FAPESP. Observatório possibilitará estudar raios gama com precisão sem precedentes, 2017. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/observatorio-possibilitara-estudar-raios-gama-com-precisao-sem-precidentes/25497>. Acesso em: 7 jul. 2024.

AGÊNCIA FAPESP. Pesquisadores brasileiros obtêm importantes resultados no estudo de plasmas astrofísicos, 2013. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/pesquisadores-brasileiros-obtem-importantes-resultados-no-estudo-de-plasmas-astrofisicos/16720>. Acesso em: 7 jul. 2024.

AGÊNCIA FAPESP. Raios gama ajudam a entender a formação do universo, 2018. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/raios-gama-ajudam-a-entender-a-formacao-do-universo/29354>. Acesso em: 7 jul. 2024.

AGÊNCIA FAPESP. Reconexão magnética, maximizada por turbulência, explica formação de raios cósmicos super energéticos, 2024. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/reconexao-magnetica-maximizada-por-turbulencia-explica-formacao-de-raios-cosmicos-superenergeticos/50547>. Acesso em: 7 jul. 2024.

BOURDIEU, Pierre. O campo científico. In: ORTIZ, Renato (org.). Pierre Bourdieu: sociologia. São Paulo: Ática, 1999. p. 122-155.

BÖTTCHER, M. Modeling the emission processes in blazars. *Astrophysics and Space Science*, v. 309, p. 95–104, 2007. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0610650.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

BRASIL ESCOLA. Ilustração da radiação gama. Brasil Escola, [s.d.]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br>. Acesso em: 3 jul. 2025.

CHARTIER, R. A pesquisa sobre identidade e cidadania nos EUA: da Nova História Social à Nova História Cultural. *Revista Brasileira de História*, 2011.

DAL PINO, Elizabeth Maria de Gouveia. Entrevista pessoal concedida ao autor em 27 jul. 2025, São Paulo.

DE-ACADEMIC. SAS 2. Disponível em: <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/1297591>. Acesso em: 05 jul. 2025.

EUROPEAN SPACE AGENCY. COS-B: Orbit and Operation. Disponível em: <https://www.cosmos.esa.int/web/cos-b/orbit-and-operation>. Acesso em: 05 jul. 2025.

FISHMAN, G. J.; MEEGAN, C. A. Burst and Transient Source Experiment (BATSE) for the Gamma Ray Observatory. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 35, n. 1, p. 559-564, 1988. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/Burst-and-Transient-Source-Experiment-\(BATSE\)-for-Fishman-Meegan/473b453d5db361e119245b1acda4cc237f5b1ad7](https://www.semanticscholar.org/paper/Burst-and-Transient-Source-Experiment-(BATSE)-for-Fishman-Meegan/473b453d5db361e119245b1acda4cc237f5b1ad7). Acesso em: 05 jul. 2025.

GOUVEIA, Rosimar. Ondas. *Toda Matéria*, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/ondas/>. Acesso em: 2 jan. 2025.

HARDING, A. K.; KALAPOTHARAKOS, C. Multiwavelength Polarization of Rotation-Powered Pulsars. *arXiv*, 20 abr. 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1704.06183>. Acesso em: 10 jul. 2025.

HARDING, S. *The Science Question in Feminism*. Cornell University Press, 1986.

KUHN, Thomas S. *A estrutura das revoluções científicas*. 4. ed. São Paulo: Perspectiva, 2012.

LASI, P. *The origin of Galactic Cosmic Rays*. *Astronomy & Astrophysics Review*, v. 21, p. 70, 2013.

Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1311.7346>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LATOURET, Bruno; WOOLGAR, Steve. *Laboratory life: the construction of scientific facts*. 2. ed. Princeton: Princeton University Press, 1986.

LOCKWOOD, P. Someone like me can be successful: Do college students need same-gender role models? *Psychology of Women Quarterly*, v. 30, n.1, p. 36-46, 2006.

MERCHANT, C. *The Death of Nature: Women, Ecology, and the Scientific Revolution*. Harper & Row, 1980.

MILITARIA SURPLUS. BC-348. Disponível em: <https://www.doctsf.com/militaria-surplus-bc-348/f23667>. Acesso em: 04 jul. 2025.

NASA. Compton Gamma Ray Observatory (CGRO). Disponível em: <https://science.nasa.gov/mission/cgro/>. Acesso em: 05 jul. 2025.

NASCIMENTO, Viviane Briccia do; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. A natureza do conhecimento científico e o ensino de ciências. *Enseñanza de las Ciencias*, Universidade Estadual de Santa Cruz / Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228711597_A_natureza_do_conhecimento_cientifico_eo_ensino_de_ciencias. Acesso em: 17 jul. 2025.

NERONOV, Andrii; SEMIKOZ, Dmitry V. Evidence for a change of cosmic ray diffusion coefficient in the Galactic disk. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, v. 2019, n. 02, p. 048, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1907.06061>. Acesso em: 3 jul. 2025.

OCDE. *Education at a Glance 2022: OECD Indicators*. Paris: OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://www.oecd.org/education/education-at-a-glance/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

PEDUZZI, L. O. Q.; RAICIK, A. C. **A Natureza da Ciência como eixo articulador para o ensino de Ciências no século XXI**. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 25, n. 3, p. 281–302, 2020. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/1-v25_n3_a2020.pdf. Acesso em: 15 jul. 2025.

PEDRO, J. M. *Historiografia Feminista*. Revista Estudos Feministas, 2011.

POPPER, Karl R. *Conjecturas e refutações: o desenvolvimento do conhecimento científico*. 3. ed. São Paulo: Edusp, 1975.

PORTELLI, A. *The Battle of Valle Giulia: Oral History and the Art of Dialogue*. University of Wisconsin Press, 1997.

ROHOZA, K. A. et al. *How to turn jets into cylinders near supermassive black holes in 3D GRMHD simulations*. 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2311.00018>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ROSSITER, M. W. *The Matthew Matilda effect in science*. Social Studies of Science, 1993.

ROSSITER, M. W. *Women Scientists in America: Struggles and Strategies to 1940*. Johns Hopkins University Press, 1982.

REIMER, A.; BÖTTCHER, M. *Studies of active galactic nuclei with CTA. Astroparticle Physics*, preprint (arXiv:1208.5926), 2012. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1208.5926>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SCHIEBINGER, Londa. *O feminismo mudou a ciência?* Bauru: EDU-SC, 2001. Disponível em: <https://bibliotecaonlinedahisfj.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/schienbinger-2001.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SCHNEIDER, P. *Extragalactic Astronomy and Cosmology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

SCOTT, J. *História das mulheres. A escrita da história: novas perspectivas*. São Paulo: UNESP, 1992.

SCOTT, Joan W. *Gênero: uma categoria útil de análise histórica*. Educação & Realidade, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 71-99, jul./dez. 1995.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. *Física para cientistas e engenheiros*. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

SILVA, Fabiane Ferreira da; RIBEIRO, Paula Regina Costa. *Trajetórias de mulheres na ciência: “ser cientista” e “ser mulher”*. Ciência & Educação, Bauru, v. 20, n. 2, p. 449-466, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1516-73132014000200012>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SOIHET, R. *História, mulheres, gênero: contribuições para um debate*. In: AGUIAR, N. *Gênero e ciências humanas: desafio às ciências desde a perspectiva das mulheres*. Rio de Janeiro: Record: Rosa dos Tempos, 1997.

SÖDERQVIST, Thomas et al. Existential projects and existential choice in science: science biography as an edifying genre. In: Telling lives in science: Essays on scientific biography, 1996.

THOMPSON, P. The Voice of the Past: Oral History. Oxford University Press, 2000.

UNESCO. Influencers need urgent fact-checking training. The Guardian, Londres, 26 nov. 2024. Disponível em: <https://www.theguardian.com/media/2024/nov/26/online-influencers-need-urgent-fact-checking-training-warns-unesco>. Acesso em: 5 jul. 2025.

UNIVESP. Astronomia: Uma visão geral II - Aula 15 - As fontes de pulsos de raios gama. YouTube, 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=...> Acesso em: 3 jul. 2025.

8.1 REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

GRIFFITHS, David J. Introdução à mecânica quântica. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2018.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

LONGAIR, M. S. High Energy Astrophysics. 2. ed. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. Física para cientistas e engenheiros. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. Física moderna. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. Física para cientistas e engenheiros. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

