

Ficha de identificação da obra elaborada pelo bibliotecário
Marcelo José Rodrigues da Conceição (CRB1-2323)

Mata, Armando do Egypto Feitoza Silva da

M425c Construção de uma câmara de nuvens para o ensino de física de partículas / Armando do Egypto Feitoza Silva da Mata. Brasília-DF, 2025.

57 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília, Campus Taguatinga, 2025.

Orientador: Hara Dessano Menezes.

Inclui referências.

1. Física – Estudo e ensino. 2. Física nuclear. 3. Relatividade (Física). 4. Partículas (Física nuclear). 5. Eletromagnetismo. I. Título. II. Menezes, Hara Dessano. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília.

CDU 531.3



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília

Armando de Egypto Feitoza Silva da Mata

CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA DE NUVENS PARA O ENSINO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física do Campus Taguatinga do Instituto Federal de Brasília como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciada em Física.

Orientador: Prof. Dr. Hara Dessano Menezes

Aprovado em: 17 de julho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Maia Dias Ledo - Instituto Federal de Brasília

Prof. Dr. Tiago de Jesus e Castro - Instituto Federal de Brasília

Prof. Dr. Hara Dessano Menezes - Instituto Federal de Brasília

Documento assinado eletronicamente por:

- **Hara Dessano Menezes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/07/2025 18:28:56.
- **Rodrigo Maia Dias Ledo**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/07/2025 18:36:59.
- **Tiago de Jesus e Castro**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 28/07/2025 09:54:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 17/07/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 631283

Código de Autenticação: f28bc48a27



Campus Taguatinga
QNM 40 A/E 01, None, TAGUATINGA NORTE,
TAGUATINGA / DF, CEP 72.146-050
(61) 2103-2200



**INSTITUTO
FEDERAL**

Brasília

Instituto Federal de Brasília

Campus Taguatinga

Licenciatura em Física

Armando do Egypto Feitoza Silva da Mata

**CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA DE NUVENS PARA O ENSINO
DE FÍSICA DE PARTÍCULAS**

Brasília

2025

Armando do Egypto Feitoza Silva da Mata

**CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA DE NUVENS PARA O ENSINO
DE FÍSICA DE PARTÍCULAS**

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Brasília do *Campus* Taguatinga, como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Dr. Hara Dessano Menezes
Universidade de Brasília

Brasília
2025

Armando do Egypto Feitoza Silva da Mata

**CONSTRUÇÃO DE UMA CÂMARA DE NUVENS PARA O ENSINO
DE FÍSICA DE PARTÍCULAS**

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Brasília do *Campus* Taguatinga, como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em Física.

Aprovado em dia de mês de ano

BANCA EXAMINADORA

Dr. Hara Dessano Menezes
Universidade de Brasília

Dr. Tiago de Jesus e Castro
Universidade de Brasília

Dr. Rodrigo Maia Dias Ledo
Universidade de Brasília

A minha eterna companheira, Mylena Colaço
Ferreira, a minha mãe, Theresinha do Egypto
Feitoza e a meu pai, Armando Silva da Mata.

AGRADECIMENTOS

A jornada acadêmica que se personifica neste trabalho foi construída por muito estudo e dedicação, mas também e, principalmente, pelo apoio incondicional de pessoas incríveis a quem sou imensamente grato.

À minha amada Mylena Colaço Ferreira, minha amiga e companheira, dedico um agradecimento especial. Seu apoio e incentivo foram o alicerces essenciais durante toda a minha trajetória no curso de Licenciatura em Física. Sua paciência e empolgação ao ouvir sobre meus "devaneios" e descobertas sobre a física foram um combustível constante que me impulsionou a seguir em frente.

Aos meus pais, Theresinha do Egypto Feitoza e Armando Silva da Mata, minha eterna gratidão. O apoio e o incentivo que recebi de vocês, do início ao fim, foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Este trabalho é também fruto da dedicação e do amor que sempre me ofereceram. Ressaltando o companheirismo de minha mãe e suas palavras que me ajudaram a não desistir de minhas ambições.

Ao professor Hara Dessano, meu orientador, muito obrigado. Mais do que um professor, o senhor foi um guia que me ensinou as maravilhas ocultas da maneira como a Física vê a natureza. Sua orientação foi crucial para a concretização deste projeto.

Por fim, agradeço aos demais professores do curso de Licenciatura em Física, em especial a Tiago Castro e Jesus, Rodrigo Maia e Frederico Jordão. A vocês, minha gratidão por me ensinarem as belezas das diversas áreas da Física, ampliando meus horizontes e consolidando minha paixão pela Física. Gostaria também de expressar minha gratidão às professoras Fernanda Bezerra e Veruska Ribeiro. Por meio de seus ensinamentos, elas me mostraram a verdadeira importância da educação e o profundo impacto que a licenciatura pode ter na vida dos alunos.

“É errado pensar que a tarefa da física é descobrir como a natureza é. A física trata do que podemos dizer sobre a natureza.”
— **Niels Bohr**

RESUMO

Este trabalho propõe a utilização da câmara de nuvens como recurso didático para o ensino de física no nível médio, com foco na análise das partículas provenientes de raios cósmicos e emissões de partículas *alfa*. Através das análises dos traços deixados pelas partículas no interior da câmara de nuvens pelos raios cósmicos foi possível distinguir partícula interagindo com o vapor do álcool como também foi utilizado o *software* Tracker®, para calcular as energias das partículas *alfa*, que variou entre 1,89 e 4,6 MeV, cujos resultados mostraram-se distintos com os dados da literatura, porém levando em consideração a diferença de densidade do ar e do álcool foi possível propor uma constante de correção que se relaciona a densidade do meio em estudo, no presente trabalho o vapor de álcool, assim tornando factível com a literatura, possibilitando que a câmara de nuvens seja utilizada como ferramenta para estimar a energia das partículas, ressaltando a necessidade de mais estudos com diferentes densidades para constatação da equivalência da constante e a densidade. A proposta visa expandir o currículo de física no ensino médio, introduzindo tópicos de física de partículas, frequentemente ausentes nesse nível de ensino. Aproveitando as novas diretrizes do ensino médio e a inclusão de matérias eletivas, busca-se proporcionar aos alunos uma abordagem experimental que integre teoria e prática, promovendo um aprendizado mais significativo. Apesar dos benefícios, a implementação dessa abordagem enfrenta desafios, como a acessibilidade de materiais específicos e a deficiência na base matemática de alguns alunos, o que pode dificultar a compreensão de conceitos mais avançados. Contudo, a proposta tem grande potencial de engajamento, ao aproximar os estudantes da ciência contemporânea e estimular o pensamento crítico. Essa abordagem pode ser adaptada para diferentes níveis de complexidade, desde o ensino de conceitos básicos até tópicos mais avançados, como a relatividade restrita, oferecendo uma valiosa oportunidade para o aprofundamento no estudo da física de partículas.

Palavras-chave: Física de partículas. Câmara de nuvens. Partículas elementares.

ABSTRACT

This study proposes the use of a cloud chamber as a didactic tool for teaching Physics at the high school level, focusing on the analysis of particles from cosmic rays and alpha particle emissions. By analyzing the tracks left by cosmic rays inside the cloud chamber, it was possible to identify the interactions of particles with alcohol vapor. The Tracker software was also used to calculate the energies of alpha particles, which ranged from 1.89 to 4.6 MeV, although the results differed from literature data, a correction constant was proposed based on the density differences between air and alcohol, making the results consistent with the literature. This validated the cloud chamber as an effective tool for estimating particle energy. The proposal aims to expand the high school Physics curriculum by introducing particle physics topics, which are often not covered at this level. By taking advantage of new high school guidelines and the inclusion of elective subjects, the aim is to provide students with an experimental approach that integrates theory and practice, promoting more meaningful learning. Despite its benefits, the implementation of this approach faces challenges, such as the accessibility of specific materials and the lack of mathematical background among some students, which may hinder the understanding of more advanced concepts. Nevertheless, the proposal holds significant potential to engage students, bridging them to contemporary science and fostering critical thinking. This approach can be adapted to different levels of complexity, from basic concepts to more advanced topics, such as special relativity, offering valuable opportunities for further exploration of particle physics.

Keywords: Particle Physics. Cloud Chamber. Elementary Particles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Gráficos de densidade de probabilidade do hidrogênio. <i>Fonte: Tokita et al, 2006.</i>	1
Figura 1.2 – Detecção do bóson de <i>Higgs</i> . <i>Fonte: Galileu, 2018.</i>	3
Figura 2.1 – Modelo Padrão da Física. <i>Fonte: Jornal da USP, 2019.</i>	7
Figura 2.2 – Bárions. <i>Fonte: Universidade Estadual de Campinas, 2025.</i>	8
Figura 2.3 – Mésons. <i>Fonte: Universidade Estadual de Campinas, 2025.</i>	8
Figura 2.4 – Octeto dos Bárions. <i>Fonte: GRIFFITHS, 2020.</i>	10
Figura 2.5 – Decupleteo de Bárions. <i>Fonte: GRIFFITHS, 2020.</i>	11
Figura 2.6 – Chuveiro cósmico <i>Fonte: Grieder, 2001.</i>	14
Figura 2.7 – Partícula de baixa energia. <i>Fonte: Laganá, 2011.</i>	15
Figura 2.8 – Partícula de baixa energia. <i>Fonte: Laganá, 2011.</i>	15
Figura 2.9 – Partícula de alta energia. <i>Fonte: Laganá, 2011.</i>	16
Figura 3.1 – Pote de Azeitona 500 gramas. <i>Fonte: Autoria própria.</i>	20
Figura 3.2 – Tampa metálica, tingida de uma coloração escura. <i>Fonte: Autoria própria.</i>	21
Figura 3.3 – Álcool Isopropílico 99% <i>Fonte: Autoria própria.</i>	21
Figura 3.4 – Recipiente isolante. <i>Fonte: Autoria própria.</i>	22
Figura 3.5 – Gelo seco. <i>Fonte: Autoria própria.</i>	23
Figura 3.6 – Aparato de baixo custo montado. <i>Fonte: Autoria própria.</i>	24
Figura 3.7 – Eletrodo de tungstênio com tório (1,0 mm), ponta vermelha. <i>Fonte: Autoria própria.</i>	25
Figura 3.8 – Ímãs de neodímio. <i>Fonte: Autoria própria.</i>	25
Figura 4.1 – A) Possíveis interações das partículas <i>alfa</i> com o campo magnético do ímã de neodímio. B) Negativo: possíveis interações das partículas <i>alfa</i> com o campo magnético do ímã de neodímio. <i>Fonte: Autoria Própria.</i>	30
Figura 4.2 – A) Possíveis interações das partículas <i>alfa</i> com o campo magnético do ímã de neodímio. B) Negativo: possíveis interações das partículas <i>alfa</i> com o campo magnético do ímã de neodímio. <i>Fonte: Autoria Própria.</i>	31
Figura 4.3 – A) Possíveis interações das partículas <i>alfa</i> com o campo magnético do ímã de neodímio. B) Negativo: possíveis interações das partículas <i>alfa</i> com o campo magnético do ímã de neodímio. <i>Fonte: Autoria Própria.</i>	32
Figura 4.4 – A) Rastro de uma partícula <i>alfa</i> . B) Negativo do rastro da partícula <i>alfa</i> . <i>Fonte: Autoria Própria.</i>	33
Figura 4.5 – A) Rastro de uma partícula <i>alfa</i> . B) Negativo do rastro da partícula <i>alfa</i> . <i>Fonte: Autoria Própria.</i>	34
Figura 4.6 – A) Rastro de uma partícula <i>alfa</i> . B) Negativo do rastro da partícula <i>alfa</i> . <i>Fonte: Autoria Própria.</i>	34

Figura 4.7 – A) Rastro deixado por uma partícula de baixa energia. B) Negativo	
do rastro deixado por uma partícula de baixa energia. <i>Fonte: Aatoria</i>	
<i>Própria.</i>	36
Figura 4.8 – A) Rastro deixado por uma partícula de baixa energia. B) Negativo	
do rastro deixado por uma partícula de baixa energia. <i>Fonte: Aatoria</i>	
<i>Própria.</i>	36
Figura 4.9 – A) Rastro deixado por uma partícula de alta energia. B) Negativo do	
rastro deixado por uma partícula de alta energia. <i>Fonte: Aatoria Própria.</i>	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
LHC	Large Hadron Collider
ZDP	Zona de desenvolvimento proximal
T	Inversão Temporal
C	Conjugação da carga
Pa	Paridade
CTP	Conjugação da carga, inversão temporal e paridade
Nd	Neodímio
Fe	Ferro
B	Boro
PISA	Programa Internacional de Avaliação de Estudantes
BNCC	Base Nacional Comum Curricular

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Número Bariônico
\vec{B}	Campo Magnético
CC	Constante de Correção
E	Energia
\vec{F}_m	Força Magnética
\vec{F}_c	Força Centrípeta
\hat{r}	Vetor unitário
I	Isospin
I_3	Terceira componente do isospin
K^0	Káon neutro
L	Número Leptônico
MeV	MegaElétron-volt
n	Nêutron
p	Próton
P	Momento
Q	Carga
R	Raio
S	Estranheza
Th	Tório
\vec{v}	Velocidade
$\bar{\nu}_e$	Antineutrino do Elétron
π^-	Píon de carga negativa
e	Elétron
e^+	Pósitron

Λ^0	Lambda neutro
Σ^+	Sigma positivo
Σ^0	Sigma neutro
Σ^-	Sigma negativo
Ξ^0	Xi neutro
Ξ^-	Xi negativo
Ω^-	Omega negativo
eV	Elétron-volt
m_0	Massa de repouso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	Categorização das partículas elementares e suas leis de conservação	5
2.2	Processo de decaimento mediado pela interação fraca e mecanismo da interação forte	11
2.3	Câmara de nuvens	12
2.4	Partículas detectadas por uma câmara de nuvens	14
2.5	Partículas <i>alfa</i> sobre influência de um campo magnético	17
3	CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE NUVENS	19
3.1	Montagem da Câmara de nuvens	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1	Abordagem pedagógica	27
4.2	Câmara de nuvens	27
4.3	Análise com auxílio do <i>software</i> Tracker®	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
	REFERÊNCIAS	40

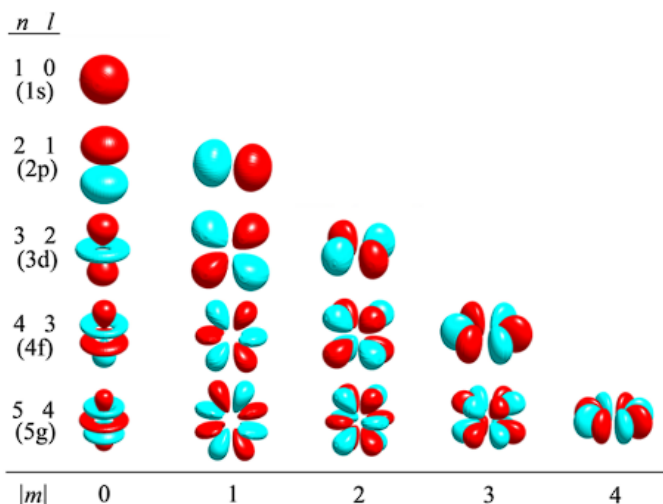
1 INTRODUÇÃO

A ideia do átomo surgiu na Grécia antiga a partir dos filósofos Demócrito e Leucipo e tinham o propósito de explicar os constituintes do universo (HAWKING, 2015). Porém, em função da ausência de provas experimentais por conta do nível tecnológico exigido para se obter evidências da existência de objetos tão pequenos, tal linha de pensamento se manteve em hibernação até o século XIX. Com a retomada da ideia do átomo, motivada pela modernização dos aparatos experimentais, novas formas de explicar a matéria foram propostas que, futuramente, se tornaram a base da física Moderna. A partir disso, foram descobertas as primeiras partículas e, conseqüentemente, surgiu um campo da física voltado ao estudo destes constituintes básicos da matéria que, como antigamente, tem como propósito explicar como o universo funciona, como abordado em forma de divulgação no livro *O discreto charme das Partículas Elementares*, de Abdalla (2016).

O modelo atômico mais aceito atualmente é descrito pela mecânica quântica, no qual os elétrons não possuem uma posição definida, mas podem ser encontrados com maior probabilidade em regiões denominadas orbitais, representados por nuvens eletrônicas. Essas regiões possuem diferentes formatos, dependendo do estado quântico do átomo, conforme representado pela Figura 1.1, para o átomo de hidrogênio.

Figura 1.1 – Gráficos de densidade de probabilidade do hidrogênio.

Fonte: Tokita et al, 2006.



Todavia, para chegar nesse modelo, vários outros foram propostos e que, ao longo da história da ciência, foram descartados sempre que não passavam pelo crivo experimental, porém, essenciais para o avanço do entendimento da comunidade científica, como discutido no trabalho de Ostermann (1999). O primeiro modelo foi o de Dalton, proposto no início do século XIX, em 1808. Porém, por não prever a existência de partículas

subatômicas, foi necessária uma nova teorização. Noventa anos depois, Thomson propôs o modelo que hoje é conhecido como “pudim de passas”, época em que a primeira partícula elementar foi descoberta: o elétron (ABDALLA, 2016). No início do século XX, em 1911, foi proposto o modelo atômico de Rutherford, que refutou o modelo de Thomson ao mostrar experimentalmente que o átomo era composto por um grande espaço vazio. Pouco tempo depois, em 1913, o modelo planetário de Rutherford progrediu para o modelo atômico de Bohr, que corrigia o problema do colapso do elétron com o núcleo devido às propriedades eletromagnéticas das cargas. Desse momento em diante, a física clássica já não era o bastante para sanar as dúvidas acerca do mundo subatômico. Posteriormente, em 1926, veio o modelo atômico de Schrödinger, que adotou totalmente a visão quântica sobre a estrutura atômica e foi utilizado para o átomo de hidrogênio.

Da mesma forma que os modelos atômicos foram se atualizando, a física de partículas, que estuda principalmente os constituintes mais fundamentais da matéria, também teve que se reformular sempre que se deparava com um novo obstáculo. A solução feita para progredir nos estudos das partículas foi a criação de um sistema pragmático de organização, sejam elas elementares ou não, e suas respectivas interações, como pode ser visto no trabalho de Moreira (2009). Com isso, surgiu o modelo padrão da física, que possui um papel semelhante ao da tabela periódica, separando as partículas através de suas leis de conservação. Contudo, ainda existem algumas lacunas a serem respondidas e, se necessário, novas reformulações para que o modelo padrão da física evolua com novas descobertas.

De maneira similar, a câmara de nuvens de Wilson é um dos marcos mais importantes da física experimental, criada no início do século XX por Charles Thomson Rees Wilson. Inspirado por suas observações de nevoeiros e formações de nuvens no Monte Ben Nevis, na Escócia, Wilson inicialmente buscava recriar condições atmosféricas em laboratório. Contudo, suas pesquisas levaram à criação de um instrumento capaz de revelar trajetórias de partículas subatômicas, revolucionando o estudo da radiação e das partículas fundamentais como abordado por Pinheiro (2015).

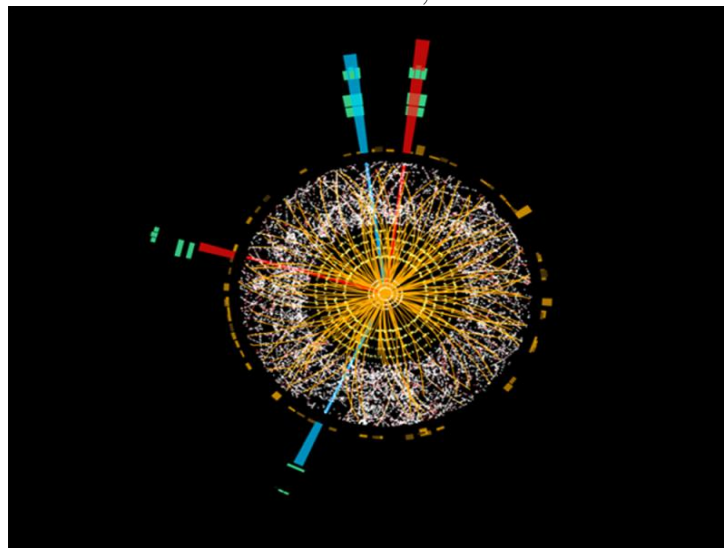
O funcionamento da câmara de nuvens baseia-se no princípio de condensação de vapor supersaturado. O dispositivo é um recipiente selado contendo vapor de água ou álcool. Quando uma partícula carregada, como prótons ou elétrons, atravessa o vapor, ela ioniza as moléculas do meio. Esse vapor supersaturado se condensa ao redor dos íons, formando pequenas gotas visíveis que desenham a trajetória da partícula, permitindo sua observação indireta.

A invenção de Wilson desempenhou um papel essencial na física de partículas. A câmara foi usada para estudar a radiação cósmica, observar partículas *alfa* e *beta* e, sobretudo, possibilitar a descoberta de novas partículas, como o pósitron, identificado por Carl Anderson em 1932. Por sua contribuição pioneira, Wilson foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1927.

Embora tenha sido eventualmente substituída por tecnologias mais avançadas, como câmaras de bolhas e detectores eletrônicos, a câmara de nuvens permanece um símbolo do avanço científico. A conexão entre a câmara de nuvens e os aceleradores de partículas é intrínseca, uma vez que os aceleradores, como o Grande Colisor de Hádrons (LHC), são projetados para colidir partículas a velocidades próximas à da luz, criando uma gama de partículas subatômicas que podem ser monitoradas em detectores. A Figura 1.2 mostra um dos resultados mais importantes obtidos no LHC, que é a descoberta do bóson de Higgs. Embora, em muitos casos, tecnologias mais avançadas, como detectores baseados em silício ou câmeras digitais, tenham superado a câmara de nuvens em termos de precisão e capacidade de análise, ela ainda desempenha um papel crucial, especialmente em contextos educacionais e experimentais, devido à sua simplicidade e eficácia em fornecer uma representação visual intuitiva e clara das interações entre partículas. A câmara de nuvens tem sido vital na investigação de fenômenos da física de partículas, incluindo a detecção de radiação cósmica e a observação de partículas instáveis. Além disso, ela continua a ser uma ferramenta importante para a exploração das forças fundamentais da natureza, auxiliando na compreensão dos comportamentos e das propriedades das partículas elementares, e colaborando com os aceleradores de partículas no avanço do conhecimento das leis que regem o universo subatômico. Dessa maneira, a câmara de nuvens, embora parte de um desenvolvimento histórico, permanece relevante no panorama atual da física experimental, sendo um elo entre o passado e as tecnologias de ponta que continuam a moldar a física moderna como abordado no trabalho de Gupta (1946).

Figura 1.2 – Detecção do bóson de *Higgs*.

Fonte: Galileu, 2018.



Este trabalho foi estruturado de forma a proporcionar uma análise detalhada sobre o uso da câmara de nuvens no ensino de física de partículas, com foco na detecção e caracterização de partículas cósmicas e emissões *alfa*. Inicialmente, são apresentados os fundamentos teóricos que embasam a interação das partículas com o meio, seguidos da

descrição da metodologia utilizada, incluindo a montagem experimental e o tratamento dos dados coletados. Em seguida, são discutidos os resultados obtidos, comparando os valores da energia estimados das emissões das partículas *alfa*, o comportamento das diferentes partículas cósmicas capturadas pela câmara de nuvens fazendo o paralelo com as referências da literatura, além de explorar a viabilidade do experimento em ambientes escolares. Por fim, as considerações finais avaliam as contribuições e desafios da implementação desse material de apoio, destacando seu potencial para tornar o ensino de física mais dinâmico e alinhado com temas contemporâneos.

2 Fundamentação teórica

Este capítulo aborda o conceito de aprendizagem significativa pela integração entre prática e teoria, conforme sugerem Piaget, Vygotsky e Ausubel. Justifica que atividades experimentais seguidas de reflexão teórica promovem a construção do conhecimento, considerando interação com o ambiente, colaboração social e ativação de conhecimentos prévios. Também apresenta as leis de conservação fundamentais no contexto das partículas subatômicas, com foco nas distinções entre férmions e bósons, incluindo a conservação do momento angular intrínseco, o número leptônico e o número bariônico. Introduz as leis de conservação de *isospin* e estranheza, que descrevem as interações das partículas nos grupos de simetria entre outras leis de conservação. A partir dessas leis, são analisados os decaimentos de partículas, como o decaimento inverso, e as interações mediadas pelas forças fraca e forte, que regem fenômenos como o decaimento *beta* e a coesão nuclear. O capítulo também explora o uso de câmaras de nuvens para detectar partículas, detalhando como diferentes partículas deixam rastros característicos ao interagir com o vapor supersaturado, com destaque para as partículas de alta energia, como os múons, originados por raios cósmicos sendo uma excelente ferramenta de visualização de tais fenômenos a ser utilizada no ensino de física.

2.1 Categorização das partículas elementares e suas leis de conservação

O modelo padrão da física é uma teoria sofisticada que define e caracteriza as partículas elementares e suas respectivas interações (Moreira, 2009). Essa organização das partículas elementares é dividida em dois grupos, férmions e bósons (OSTERMANN, 2021). Os primeiros caracterizam toda a matéria existente no universo e os bósons são responsáveis pelas inúmeras interações entre a matéria, comumente conhecidas como forças fundamentais.

Nesse modelo de classificação, os férmions possuem dois grupos de partículas elementares, os léptons e os *quarks*. No bloco dos *quarks*, notamos seis diferentes tipos de partículas que são ordenadas em três gerações, tal que, a primeira geração é a mais estável, enquanto a terceira, a mais instável (ABDALLA, 2016). Igualmente, a combinação de *quarks* entre si gera as chamadas matérias hadrônicas onde possuem subdivisões denominadas bariônicas ou mesônicas. Já no bloco dos léptons, percebe-se de maneira semelhante três gerações onde a primeira é mais estável e a terceira menos estável. Essa combinação dos léptons e *quarks*, pontuando que tanto os *quarks* quanto os léptons possuem suas respectivas antipartículas, formam um dos grupos intitulado férmions (BETTINI, 2014).

A teorização das antipartículas foi feita pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), que analisou a relação entre a energia, o momento e a massa de repouso

das partículas, isto é,

$$E^2 = m_0^2 c^4 + P^2 c^2, \quad (2.1)$$

onde E corresponde à energia da partícula, P o momento linear, m_0 a massa de repouso da partícula (medida em um referencial em repouso em relação à própria partícula) e c , a velocidade da luz. É necessário considerar ambos os sinais ao fazer a radiação, pois as duas quantidades possuem significado físico. Assim, uma mesma partícula possui sua contraparte totalmente semelhante, divergindo no sinal da carga elétrica. A existência de tais partículas possibilita um mecanismo conhecido como aniquilamento entre matéria-antimatéria, que ocorre quando uma partícula interage diretamente com sua antipartícula, aniquilando-se mutuamente e transformando-se em radiação fotônica. Um exemplo desse fenômeno que atestou experimentalmente a existência das antipartículas é a criação de pares, que ocorre quando um fóton de alta energia é freado e, desse modo, cria-se um par elétron-antieletron que se aniquilam posteriormente à sua criação (EISBERG, 1988).

Já o grupo dos bósons, partícula responsável por mediar as interações da matéria, possui 13 partículas, onde 12 estão relacionadas às forças fundamentais, sendo elas: gravitacional, eletromagnética, força fraca e força forte. A respeito da décima terceira partícula, a mais recente descoberta está relacionada à caracterização da massividade de algumas partículas elementares. De maneira geral, temos: o fóton, responsável por mediar a força eletromagnética, os bósons de *gauge* (Calibre), responsáveis por mediar a força fraca, os glúons, responsáveis por mediar a força forte e o bóson de Higgs, responsável por caracterizar a massa das partículas. Essas partículas já foram detectadas nos aceleradores de partículas, com exceção do gráviton, que é responsável pela força gravitacional. Ademais, os mésons também são partículas responsáveis por mediar a força forte, porém não são elementares por serem constituídos de *quarks*. Todas essas 13 partículas são denominadas de partículas elementares mediadoras de todas as interações da matéria intitulada bósons (ABDALLA, 2016).

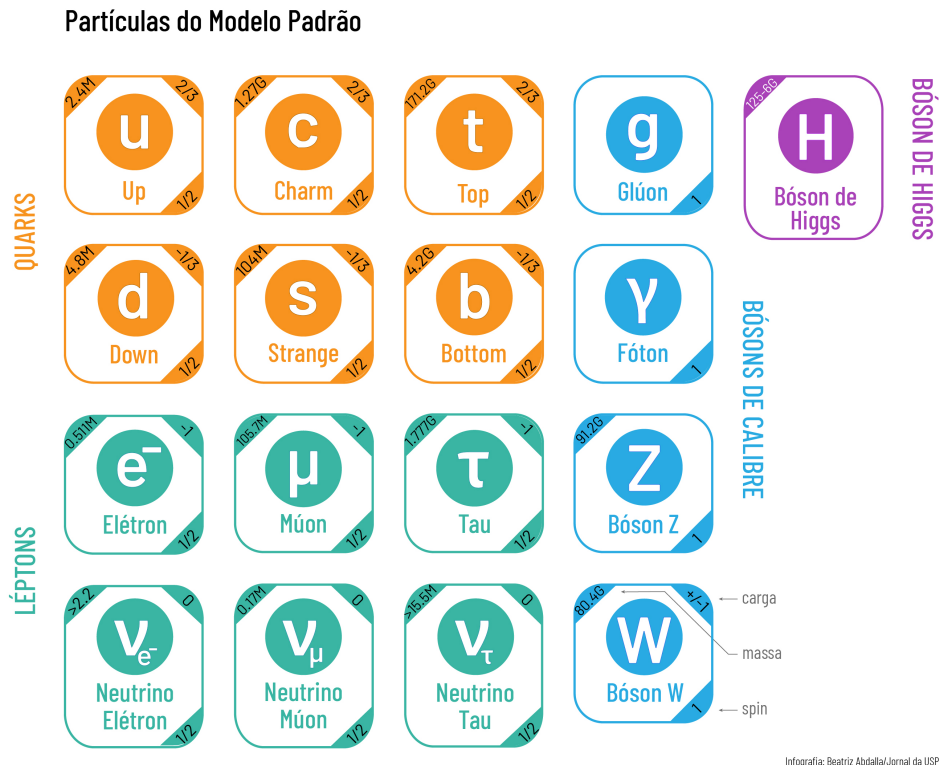
No total, o modelo padrão da física é constituído por 61 partículas elementares, separadas em blocos alcunhados de férmions e bósons. Todas as interações da matéria podem ser, em sua grande maioria, explicadas através da interação dessas partículas, demonstrando o êxito do modelo e a importância do estudo das partículas na física. O sistema de organização das partículas atual foi construído seguindo uma categorização pragmática para a criação dos blocos dos férmions e bósons e suas subdivisões. Assim como na física clássica, a física de partículas possui leis de conservação, e através delas foi possível construir o padrão que hoje é conhecido. Essa categorização de maneira mais técnica foi feita através da teoria dos grupos.

Para que um grupo seja formado, é necessário atender certos requisitos, tais como fechamento, associatividade, elemento identidade e elemento inverso. No grupo dos *quarks* temos o *up* e *down* como primeira geração, *charm* e *strange* como segunda geração e *top* e *bottom* como terceira geração. No dos léptons temos como primeira geração o elétron e

seu neutrino, como segunda geração o múon e seu neutrino e por fim a terceira geração o *tau* e seu neutrino (BARBOSA, 2019). Essas informações podem ser organizadas conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Modelo Padrão da Física.

Fonte: *Jornal da USP*, 2019.



Para o grupo dos férmions, uma característica que os distingue está relacionada à conservação do momento angular intrínseco das partículas. Neste caso, o *spin* das partículas são números semi-inteiros, enquanto os bósons possuem *spin* representado por números inteiros. Essa primeira lei da conservação já distingue bastante as partículas, porém foi necessária a formulação de outras leis de conservação não intuitivas para transformar o modelo padrão em uma ferramenta que auxilie a explicar e estudar o comportamento das partículas subatômicas (OSTERMANN, 1999). Por exemplo, a conservação de um número quântico relacionado aos léptons. Esta lei foi intitulada de conservação do número leptônico, um para cada uma das três gerações de léptons, sendo o número eletrônico, relacionado aos elétrons, número muônico, relacionado aos múons e número tauônico, relacionado à partícula *tau*. Esta lei de conservação, assim como em outras, é aplicada na análise do produto de decaimento das partículas após realizada uma colisão (ABDALLA, 2016). A lei da conservação do número leptônico L funciona da seguinte maneira:

- $L = +1$ para os léptons;
- $L = -1$ para os anti-léptons;
- $L = 0$ para as demais partículas.

Um exemplo bastante conhecido é o decaimento *beta* inverso, onde um próton se transforma em um nêutron e em um pósitron,

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+,$$

que pode ser representado através dos números leptônicos

$$-1 + 0 \rightarrow 0 + (-1),$$

onde $\bar{\nu}_e$ corresponde ao antineutrino do elétron¹, p ao próton, n ao nêutron e e^+ ao antielétron (pósitron). Analisando a conservação do número leptônico, é possível dizer que tal decaimento é possível, pois respeita sua lei de conservação.

Algumas outras leis de conservação se aplicam às partículas conhecidas como hádrons (estado ligado de *quarks*), formados por dois grupos, os bárions e os mésons. Os bárions são partículas não fundamentais, formados com a combinação de 3 *quarks* conforme ilustrado na Tabela 2.2. Já os mésons são formados pela combinação de dois *quarks*, sempre na combinação partícula antipartícula. Assim, os mésons são formados por um *quark* e um *antiquark*, como pode ser visto na Tabela 2.3.

Figura 2.2 – Bárions.

Fonte: Universidade Estadual de Campinas, 2025.

Bárions qqq e antibárions $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Bárions são hádrons fermiônicos					
Estes são alguns dos muitos bárions existentes:					
Símbolo	Nome	Conteúdo de Quarks	Carga Elétrica	Massa GeV/c^2	Spin
p	próton	uud	1	0,938	$\frac{1}{2}$
\bar{p}	antipróton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0,938	$\frac{1}{2}$
n	nêutron	udd	0	0,940	$\frac{1}{2}$
Λ	lambda	uds	0	1,116	$\frac{1}{2}$
Ω^-	ômega	sss	-1	1,672	$\frac{3}{2}$

Figura 2.3 – Mésons.

Fonte: Universidade Estadual de Campinas, 2025.

Mésons $q\bar{q}$					
Mésons são hádrons bosônicos					
Estes são alguns dos muitos mésons existentes:					
Símbolo	Nome	Conteúdo de Quarks	Carga Elétrica	Massa GeV/c^2	Spin
π^+	píon	$u\bar{d}$	+1	0,140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0,494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0,776	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5,279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2,980	0

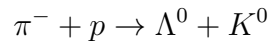
O número quântico S , denominado estranheza, também foi proposto para explicar um fenômeno peculiar, onde essa lei de conservação é válida na interação forte entre

¹ Neste trabalho, as antipartículas serão representadas com uma barra encima de sua letra correspondente

partículas na interações que envolvem os bárions e mésons, não sendo válida nas interações fracas (ABDALLA, 2016). A estranheza funciona da seguinte maneira:

- $S = 1$ para as partículas *Káon*;
- $S = -1$ para as partículas *Sigma* e *Lambda*;
- $S = 0$ para as demais partículas.

Um exemplo da conservação da estranheza pode ser visto na seguinte reação comumente encontrada na colisão de raios cósmicos com partículas da atmosfera,



ou,

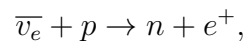
$$0 + 0 \rightarrow -1 + 1,$$

onde π^- é um *píon* com carga negativa, p é um próton, Λ^0 é um *lambda* neutro e K^0 é um *káon* neutro.

Outra lei de conservação semelhante ao número leptônico é a do número bariônico A , que pode ser expressa da seguinte maneira:

- $A = +1$ para os bárions;
- $A = -1$ para os anti-bárions;
- $A = 0$ para as demais partículas.

Utilizando como exemplo o decaimento *beta* inverso é possível observar a funcionalidade das leis de conservação, demonstrando sua eficácia em distinguir partículas e validar processos possíveis de decaimento de partículas, isto é



que, em termos dos números bariônicos, fica escrita na forma

$$0 + 1 \rightarrow 0 + 1.$$

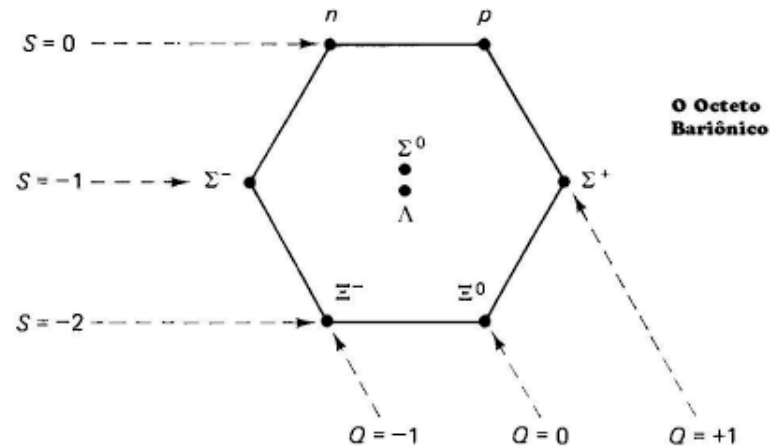
Partículas formadas pelas combinações de *quarks* geram múltiplos que referem-se a conjuntos de partículas que formam representações de um grupo de simetria. Em termos mais concretos, os múltiplos agrupam partículas que possuem propriedades semelhantes, como massa, mas que diferem em outras características, como carga elétrica (Q) ou número de estranheza (S). Um exemplo é o octeto dos bárions, ilustrado na Figura 2.4, na qual o próton e o nêutron constituem junto de outras partículas um múltiplo, que inclui:

- p : $Q = +1, S = 0$
- n : $Q = 0, S = 0$
- Λ : $Q = 0, S = -1$
- Σ^+ : $Q = +1, S = -1$
- Σ^0 : $Q = 0, S = -1$
- Σ^- : $Q = -1, S = -1$

- Ξ^0 : $Q = 0, S = -2$
- Ξ^- : $Q = -1, S = -2$

Figura 2.4 – Octeto dos Bárions.

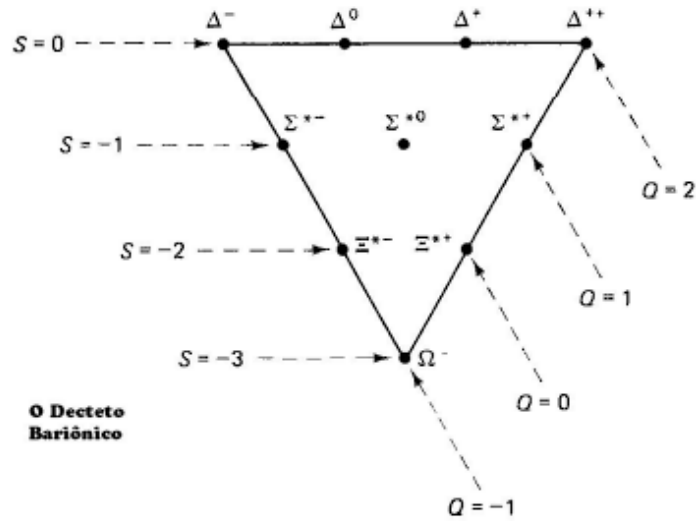
Fonte: GRIFFITHS, 2020.



Outro exemplo é o decuplo de bárions, representado na Figura 2.5. Aqui, a organização segue também a carga elétrica e estranheza, mas as partículas têm *spin* $3/2$ (ao invés de $1/2$ como no octeto).

- Δ^{++} : $Q = +2, S = 0$
- Δ^+ : $Q = +1, S = 0$
- Δ^0 : $Q = 0, S = 0$
- Δ^- : $Q = -1, S = 0$
- Σ^{*+} : $Q = +1, S = -1$
- Σ^{*0} : $Q = 0, S = -1$
- Σ^{*-} : $Q = -1, S = -1$
- Ξ^{*0} : $Q = 0, S = -2$
- Ξ^{*-} : $Q = -1, S = -2$
- Ω^- : $Q = -1, S = -3$

Figura 2.5 – Decuplete de Bárions.
 Fonte: GRIFFITHS, 2020.



A formulação desses múltiplos é essencial, não somente para organização das partículas mas também na previsão de partículas que até então não tinham sido detectadas como por exemplo o ômega Ω^- do decuplete de bárions.

Por fim, as leis de conservação são reflexos de simetrias, como a teoria de grupos descreve. Outras conservações encontradas no mundo subatômico das partículas são as da conservação do *Isospin*, conservação da terceira componente do *Isospin* I_3 , da inversão Temporal (T), da conjugação de carga (C), da paridade (Pa) e a junção das três últimas (CPT). A contribuição de cada uma dessas leis de conservação dos números quânticos é responsável pela organização das partículas elementares no modelo padrão atual da física (BARBOSA, 2019).

2.2 Processo de decaimento mediado pela interação fraca e mecanismo da interação forte

As interações da matéria podem produzir certos fenômenos, que hoje chamamos de decaimento, que só foi possível obter uma explicação mais precisa ao utilizar uma descrição relativística e quântica, construída pelo físico italiano Enrico Fermi (ABDALLA, 2016). Esse fenômeno é regido pela interação fraca e alguns exemplos são o decaimento *beta*, o decaimento do pión carregado e o do múon (BETTINI, 2014).

Uma característica da interação fraca é que para que ocorra é necessário que as partículas que estejam envolvidas nesse fenômeno estejam a uma distância menor que 10^{-17} m (Ostermann, 1999). O motivo de ser denominada força fraca se deve pela baixa probabilidade de execução, sendo atribuído esse fator às partículas mediadoras da força fraca, os bósons, serem massivos. Os bósons responsáveis por essa mediação são os bósons de *gauge*.

Já as interações fortes que ocorrem nos núcleos atômicos são responsáveis pela coesão das partículas nucleares. A força forte possui essa nomenclatura por se tratar da força mais poderosa da natureza, pois é necessário que seja mais intensa que a força eletromagnética para poder manter partículas carregadas do mesmo sinal enclausuradas, formando assim os núcleos atômicos.

A força forte pode ser separada em duas categorias: a força forte fundamental, que é regida pelos bósons glúons que atuam diretamente nos *quarks*, que formam as partículas do núcleo e a força forte residual, que é regida pelos bósons mésons que mantêm a coesão dos núcleos atômicos. Ambas em conjunto mantêm a estabilidade nuclear dos átomos estáveis da tabela periódica.

A teoria responsável por explicar de maneira adequada as interações da força forte é a que hoje intitulamos de Cromodinâmica Quântica, que descreve o comportamento da carga nuclear, associada às cores verde, vermelho e azul e suas respectivas anti-cores, ressaltando que essa carga é semelhante a carga elétrica, porém mais complexa por possuir três possíveis estados, assim como seus anti-estados (ABDALLA, 2016). A junção de todas essas características dos grupos dos férmions e dos bósons geram o que hoje conhecemos como modelo padrão da física.

2.3 Câmara de nuvens

Existem diversos tipos de câmara de nuvens, dentre elas a de expansão, a de gelo seco, a de termoeletrica e a de mudança de fase. Neste trabalho vamos estudar a câmara de gelo seco, que se utiliza álcool isopropílico como fluido supersaturado (“Cloudylabs Different technologies of cloud chambers”, 2019). Seu funcionamento consiste na criação de um vapor supersaturado por conta da diferença de temperatura no topo e na parte inferior do recipiente, criando efeitos de condensação (Laganá, 2011). Devido às trocas de calor entre as fontes térmicas do aparato, ocorre o processo de convecção do álcool, evaporando da parte superior e condensando na parte inferior do recipiente. Próximo à tampa, um pouco acima da área de condensação do álcool, o vapor do líquido encontra-se em um estado instável intermediário, comumente conhecido como supersaturado, onde qualquer perturbação de pressão ou temperatura produz uma condensação do vapor.

A passagem de partículas eletricamente carregadas dentro da câmara de nuvens, na região supersaturada do vapor, ioniza as moléculas, criando uma perturbação na região instável e formando um rastro de condensação onde as moléculas foram ionizadas (Gupta, 1946). Através dos rastros deixados pela ionização, é possível, de maneira indireta, tomar conhecimento da trajetória das partículas subatômicas, assim como sua energia estimada e sua catalogação, dependendo do processo utilizado, conforme feito no trabalho de Laganá (2011).

Além da passagem de partículas elétricas provenientes de fontes radioativas, é possível acontecer a passagem de raios cósmicos, que por sua vez, são conhecidos por

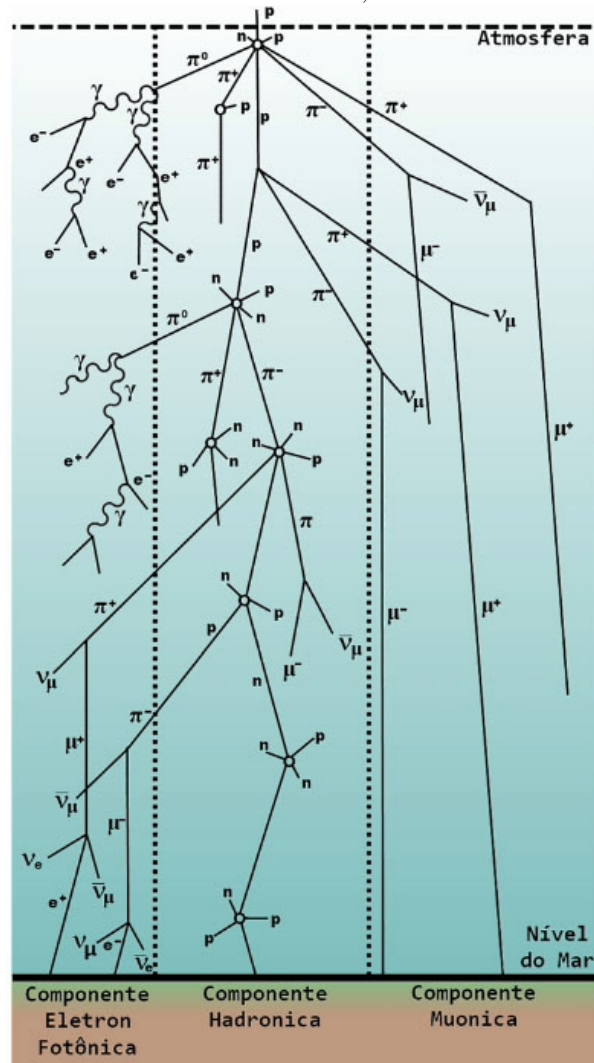
serem o fenômeno de interação de partículas carregadas a velocidades próximas da luz com moléculas da atmosfera terrestre. Em média, suas energias estão na escala de 10^{20} eV (Cabral, Raphaella Bahia Soares et al., 2022).

Essas partículas podem ser classificadas como raios cósmicos solares e raios cósmicos anômalos, onde, respectivamente, são partículas aceleradas pelo Sol, possuindo em média a energia de 10^9 eV, e as outras são partículas provenientes de gases interestelares que são capturados pela heliosfera² (Cabral, Raphaella Bahia Soares et al., 2022). A distribuição das partículas dos raios cósmicos consiste em prótons (86%), partículas *alfa* (11%), núcleos de elementos mais pesados (1%), elétrons (2%) e neutrinos (<1%) (Perkins, 2003).

A interação de tais partículas fortemente energizadas resulta no “chuveiro cósmico”, que é formado por diversas partículas, dentre elas, elétrons, múons, píons e prótons. As partículas primárias, ou seja, as primeiras partículas a entrarem em contato com a atmosfera terrestre, sofrem em média 12 interações até que as partículas secundárias, às provenientes das colisões das partículas primárias com as moléculas da atmosfera, cheguem até o nível do mar, como pode ser visto na Figura 2.6. (GRIEDER, 2001).

² Região ao redor do Sol que é influenciada pelo vento solar, uma corrente de partículas carregadas emitidas pela estrela. Essa região forma uma espécie de “bolha” protetora no espaço, que envolve o Sistema Solar e ajuda a protegê-lo da radiação cósmica vinda de outras partes da galáxia.

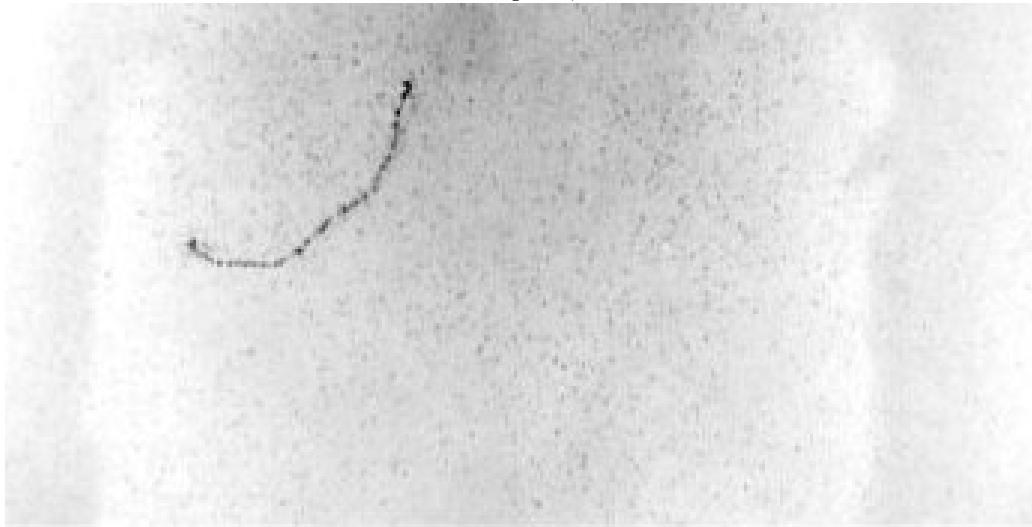
Figura 2.6 – Chuveiro cósmico
 Fonte: Grieder, 2001.



2.4 Partículas detectadas por uma câmara de nuvens

As interações das partículas com o vapor dentro da câmara de nuvens gera rastros distintos, dependendo da partícula que tenha interagido com as moléculas do vapor. A maioria das partículas captadas por uma câmara de nuvens são partículas de baixa energia. Seus traços são característicos por possuírem bastante desvios, por conta da provável partícula ser um elétron ou sua antipartícula, o pósitron, e sofrer atuação da força coulombiana dos demais núcleos de átomos presentes nas moléculas do vapor de álcool, como pode ser visto na Figura [2.7](#).

Figura 2.7 – Partícula de baixa energia.
Fonte: Laganá, 2011.



Outra possível partícula que pode ser detectada são partículas como o próton ou partículas *alfa* que são formadas por dois prótons e dois nêutrons, igual ao núcleo do átomo de hélio. O trajeto característico deste tipo de partícula é formado por linhas praticamente retilíneas e por serem partículas mais massivas depositam mais energia nas moléculas do vapor de álcool, assim fazendo rastros mais grossos que os das demais partículas. E sua interação coulombiana com os demais núcleos também possibilita tal trajeto, pois os núcleos dos átomos que formam o vapor de álcool são mais pesados que um próton, por conta disso há uma baixa probabilidade de ocorrer uma colisão entre um próton e um núcleo do mesmo, como pode ser visto na Figura [2.8](#).

Figura 2.8 – Partícula de baixa energia.
Fonte: Laganá, 2011.

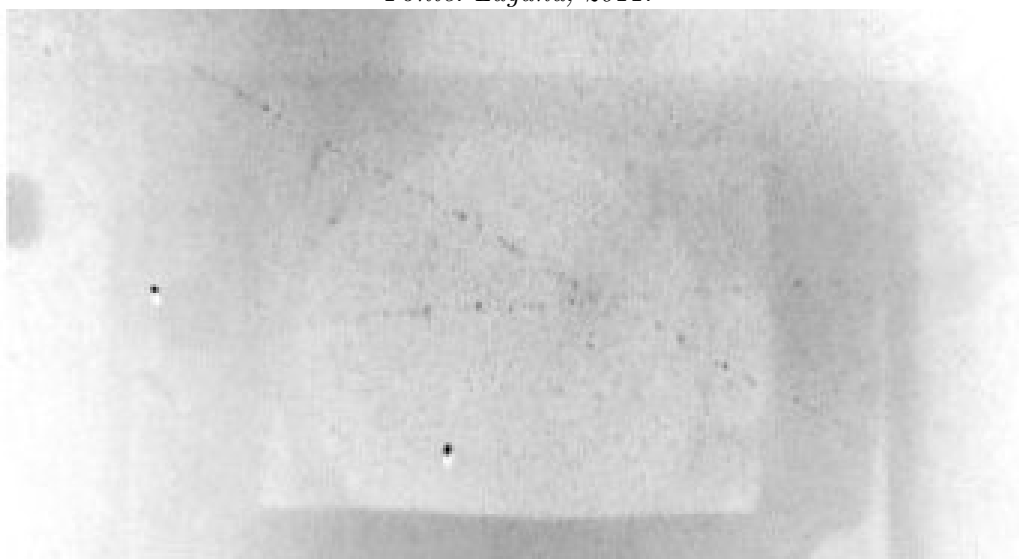


Na atmosfera terrestre é difícil encontrar partículas com altas energias, isto é, com altas velocidades. Para acelerá-las é necessário uma energia na ordem de giga elétronsvolts.

Já em outras regiões do espaço, essa energia é facilmente disponibilizada, como em estrelas e supernovas, por exemplo. Partículas energéticas vindas não somente do sistema solar como também fora da heliosfera são possíveis de serem detectadas no nível do mar. A Figura 2.6 ilustra que a maioria das partículas de alta energia que chegam ao nível do mar se trata de partículas múônicas. Seu trajeto na câmara de nuvens também possui suas peculiaridades, sendo elas traços longos e extremamente finos como pode ser visto na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Partícula de alta energia.

Fonte: Laganá, 2011.



Também é possível visualizar e retirar informações relevantes de emissões de partículas provenientes de materiais radioativos. Para que um elemento seja considerado radioativo é preciso que sua composição atômica seja instável, e no processo de procurar estabilidade denominado decaimento radioativo, o elemento emite partículas nucleares a fim de alcançar tal estado (BOFF, BASTOS e MELQUIADES, 2017).

Elementos com número atômico superior a 82 são responsáveis pela emissão de partículas *alfa*, que são compostas por dois prótons e dois nêutrons, igual ao núcleo do átomo de hélio, considerado partículas pesadas (BOFF, BASTOS e MELQUIADES, 2017). Partículas *alfa* podem sofrer interações com campos magnéticos e elétricos por serem partículas carregadas.

O elemento tório (Th) possui o número atômico 90, portanto considerado um metal actínídeo radioativo emissor de partículas *alfa*. A energia das partículas *alfa* provenientes do tório pode alcançar de 3,95 a 8,78 MeV (BOFF, BASTOS e MELQUIADES, 2017).

Para a análise da energia das partículas *alfa*, através da trajetória em uma câmara de nuvens, pode ser utilizada uma equação empírica dada por Sorensen e Phelps (WILLIAMS 2009),

$$R = 0,325 \cdot E^{3/2}, \quad (2.2)$$

onde E é a energia medida da partícula em MeV e R a distância percorrida pela partícula no meio, em centímetros, da fonte até o final do traçado. No caso de Sorensen e Phelps, a equação foi realizada para a densidade do ar. Contudo, como a densidade do vapor de álcool isopropílico é diferente do ar é necessário trazer certas considerações — sendo a densidade do ar considerada $1,225\text{kg}/\text{m}^3$ e a do álcool $2,1\text{kg}/\text{m}^3$ (CETESB,2025) é possível adotar a mesma fórmula para obtenção dos valores das energias, sabendo-se que os valores calculados podem variar para menos, pois as partículas farão traços menores por ser um meio mais denso no álcool que no ar.

2.5 Partículas *alfa* sobre influência de um campo magnético

Sabe-se que uma partícula de carga não nula submetida a um campo magnético uniforme produz uma trajetória circular (GRIFFITHS, 2021). Como a força magnética é bem mais intensa que a gravitacional, corresponde à resultante centrípeta. Para um movimento circular, nas condições específicas onde a velocidade é perpendicular ao campo magnético e a força magnética que atua em uma partícula de carga q pode ser calculada por

$$F_m = q v B, \quad (2.3)$$

onde F_m é a força magnética, q é a carga, v é a velocidade da carga e B é o campo magnético, com todas as grandezas sendo representadas por seus respectivos módulos.

A força centrípeta é definida por

$$F_{cp} = \frac{m v^2}{R}, \quad (2.4)$$

onde m é a massa, e R é o raio da trajetória. Igualando a Equação (2.3) com a Equação (2.4), encontramos o raio descrito pela partícula com o campo magnético ao qual ela está submetida, ou seja

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (2.5)$$

Analisando a Equação (2.5), é possível afirmar que quanto menor for o campo magnético, maior será o raio descrito pela partícula. Por conta disso, é esperado que ao ter uma fonte radioativa emitindo partículas *alfa*, ao entrar em contato com o campo magnético, por exemplo de ímãs de neodímio³, sua trajetória que naturalmente seria retilínea agora mostrará desvios devido a interação da partícula com o campo magnético. Vale ressaltar que por conta do ímã ser um dipolo e não produzir um campo uniforme, o desvio dependerá do ângulo e a distância das partículas em relação ao ímã.

³ São um tipo de ímã permanente feito a partir de uma liga de neodímio (Nd), ferro (Fe) e boro (B), geralmente expressa como NdFeB. Eles pertencem à família dos ímãs de terras raras e são conhecidos por serem os mais fortes ímãs permanentes disponíveis comercialmente.

No capítulo seguinte será apresentado a metodologia adotada, na qual consistirá na construção da câmara de nuvens, nos fenômenos possíveis de serem visualizados com a interação dos raios cósmicos com a câmara e as análises possíveis ao se utilizar uma fonte de partículas *alfa*.

3 Construção da câmara de nuvens

Neste capítulo será apresentada a montagem da câmara de nuvens assim como a maneira que foi coletado os dados para análise dos fenômenos. Primeiramente, apresentaremos um método de construção de uma câmara de nuvens de baixo custo, indicando ressalvas relativas às possibilidades de não funcionamento da mesma. Posteriormente, discutiremos a metodologia para a obtenção da trajetória deixados por raios cósmicos e das emissões de partículas *alfa*, bem como a captura de imagens ou vídeos dos fenômenos ocorridos no interior da câmara de nuvens. Em sequência será feita a análise dos dados obtidos comparando com os resultados divulgados na literatura em paralelo com os fenômenos estudados pela física de partículas.

3.1 Montagem da Câmara de nuvens

Apesar de ser um dispositivo utilizado nos experimentos de física de fronteira, é possível a construção de uma câmara de nuvens com materiais de baixo custo. Além de ser um excelente material para observar e estudar partículas, pode ser construído sem grandes dificuldades. Por conta de sua acessibilidade os materiais utilizados são de fácil acesso, podendo haver dificuldades somente na obtenção do gelo seco e do álcool isopropílico.

Para a construção da câmara de nuvens utilizada nesse trabalho, serão necessários os seguintes materiais:

- **Álcool isopropílico (99%)**: Essencial para criar a atmosfera supersaturada dentro da câmara.
- **Esponja**: Servirá como suporte para reter e liberar o álcool isopropílico dentro do recipiente.
- **Gelo seco**: Utilizado como fonte de resfriamento para gerar a nuvem supersaturada.
- **Smartphone**: Utilizado para filmar e iluminar o interior da câmara, ajudando a identificar os rastros das partículas.
- **Recipiente transparente com tampa metálica**: Um pote de vidro com tampa metálica (ex.: pote de azeitonas de 500 g).
- **Recipiente de isopor**: Para isolar o gelo seco e reduzir a dispersão térmica.
- **Copo metálico**: Para aquecer água e criar um gradiente de temperatura.
- **Chapa de aquecimento**: Para aquecer a água de forma controlada.
- **Tripé**: Suporte para fixar o smartphone ou lanterna, garantindo estabilidade na gravação.
- **Luvas de proteção**: Indispensáveis para manusear o gelo seco, que pode causar queimaduras devido à baixa temperatura.
- **Ímãs de neodímio**: Fonte do campo magnético para defletir as partículas *alfa*.

- **Eletrodo Tungstênio com Tório 1,0mm Ponta Vermelha:** Fonte radioativa de emissão de partículas *alfa*.

Para a construção da câmara foi utilizado um pote de azeitonas com capacidade de aproximadamente 830 ml, na qual a tampa deve ser de metal para garantir a transferência de calor necessária. No fundo do pote foi colocado uma esponja de cozinha, como mostrado Figura 3.1.

Figura 3.1 – Pote de Azeitona 500 gramas.

Fonte: Autoria própria.



Foi necessário fazer algumas alterações na parte metálica para melhor visualização do efeito da câmara de nuvens. Assim, pintamos o interior da tampa (a parte que estará dentro do recipiente) com tinta preta como indicado na Figura 3.2, este procedimento possibilitou criar um contraste, auxiliando a visualização dos rastros das partículas.

Figura 3.2 – Tampa metálica, tingida de uma coloração escura.

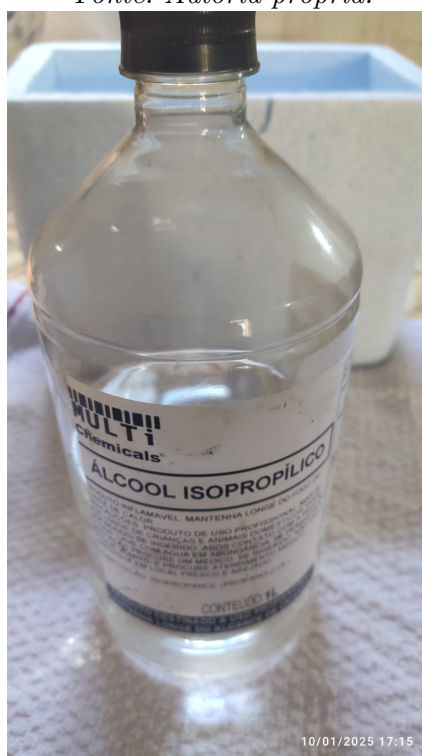
Fonte: Autoria própria.



Com 50 mL de álcool isopropílico, Figura 3.3, encharcamos a esponja, vedado o pote logo em seguida com a tampa metálica para evitar a evaporação do álcool antes do início do experimento.

Figura 3.3 – Álcool Isopropílico 99%

Fonte: Autoria própria.



Em seguida, construímos um recipiente para comportar o gelo seco que estará em contato com o material de metal do pote de vidro, tampa. Foi utilizado um recipiente de isopor, como demonstrado na Figura 3.4, porém pode ser adaptado com materiais como madeira ou um material isolante com profundidade suficiente para acomodar o gelo e o

recipiente de vidro. É necessário garantir que o fundo do pote de vidro (lado da tampa metálica) esteja em contato direto com o gelo seco.

Figura 3.4 – Recipiente isolante.

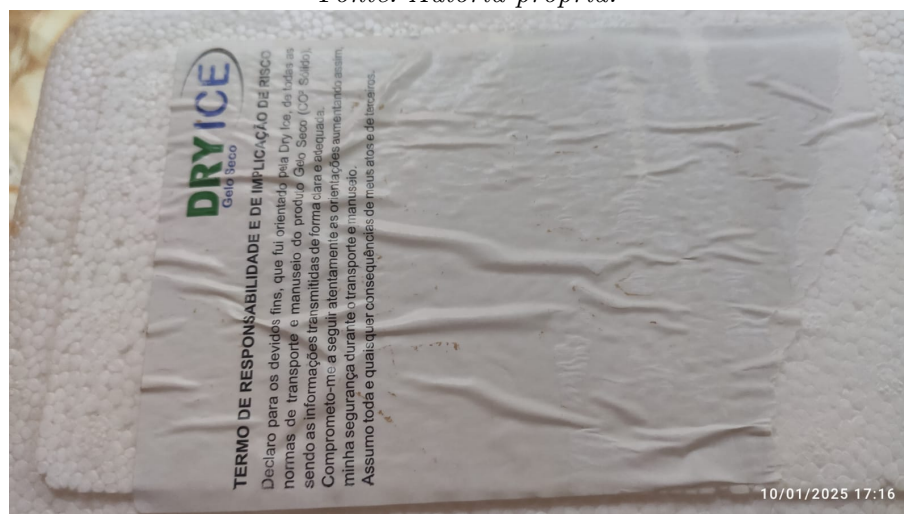
Fonte: Autoria própria.



Para o manuseio do gelo seco foram utilizadas luvas de proteção, posicionando pedaços de gelo seco no fundo do recipiente de isopor, Figura 3.5, verificando que a quantidade de gelo seco seja suficiente para manter o resfriamento constante durante o experimento (mínimo de 2-3 cm de espessura). Em seguida, foi posicionado o pote de vidro no recipiente de isopor com a tampa metálica voltada para baixo, em contato direto com o gelo seco.

Figura 3.5 – Gelo seco.

Fonte: Autoria própria.



Para que ocorra a condensação do álcool é necessário fazer um gradiente de temperatura, ou seja, colocar uma fonte de calor na parte superior do recipiente para auxiliar na evaporação do álcool presente na esponja. Assim, o vapor ao entrar em contato com a superfície do metal começa a se condensar e cria uma área supersaturada logo acima da tampa onde ocorrerá a visualização da ionização das moléculas de álcool por conta das partículas subatômicas.

Com esse fim, aquecemos 300 ml de água utilizando uma chapa de aquecimento e em seguida transferimos a água para um copo metálico quando atingiu uma temperatura de aproximadamente 60–70 °C. Colocamos o copo metálico com água quente no topo do pote de vidro (lado oposto à tampa metálica), de maneira similar a Figura [3.6](#).

Figura 3.6 – Aparato de baixo custo montado.

Fonte: Autoria própria.



Após a construção da câmara de nuvens, para capturar do fenômeno que ocorrerá no interior, foi montado um tripé próximo ao recipiente, ajustando-o de modo que a câmera do smartphone ficou alinhada com o recipiente transparente. Em seguida foi ativado a lanterna do smartphone para iluminar o interior do pote de vidro de forma uniforme. Então, foi inicializada a gravação, na velocidade normal do smartphone, para registrar os rastros formados pelas partículas subatômicas na nuvem supersaturada. Após alguns minutos, a interação de partículas carregadas (como prótons, elétrons ou múons) com a nuvem supersaturada de álcool foi visível através de rastros finos e brilhantes no fundo preto.

Feita a coleta das filmagens, foram selecionados *frames* onde foi possível analisar os traços da ionização das partículas. As análises foram feitas observando as características dos traços, seja na sua espessura ou no formato da trajetória do rastro para diferenciar as possíveis partículas. Finalizadas as análises, comparamos os resultados com o artigo do Lagána (2011) a respeito das possíveis partículas detectadas.

Após a captura dos raios cósmicos, foi feito o estudo da emissão de partículas *alfa*. Para isso, posicionamos no interior câmara o eletrodo tungstênio com tório 1,0mm. com ponta vermelha, um material radioativo, como mostrado na Figura 3.7. Com o material inserido no interior da câmara, certificou-se que a esponja estava com o álcool isopropílico e após isso foi vedado novamente o recipiente. Após alguns minutos foi possível observar a emissão das partículas alfa provenientes do material radioativo.

Figura 3.7 – Eletrodo de tungstênio com tório (1,0 mm), ponta vermelha.

Fonte: Autoria própria.



Em sequência, foi aberta novamente a câmara e colocado perto do material radioativo um ímã de neodímio, indicado na Figura 3.8 e logo em seguida, a câmara foi vedada. Como foi introduzida uma fonte de campos magnéticos, as linhas observadas deixaram de ter um comportamento retilíneo, apresentando pequenas deflexões.

Figura 3.8 – Ímãs de neodímio.

Fonte: Autoria própria.



Com as filmagens das emissões das partículas *alfa* coletadas, novamente foram selecionado frames onde foi possível analisar a distância que as partículas conseguiram ionizar no vapor do álcool. Utilizando o *software* Tracker®, foi possível estimar a distância percorrida e então, determinar as energias das partículas emitidas pelo elemento radioativo, utilizando a Eq.(2.2). Também, frames onde foi possível observar deflexões das partículas *alfa* quando exposto ao campo magnético dos ímãs de neodímio. Os dados coletados foram correlacionados com o artigo publicado em 2017 do Boff et al para comparar com as energias calculadas neste trabalho.

No capítulo a seguir, serão discutidos os resultados obtidos na detecção de partículas, seja de raios cósmicos ou por emissão de partículas *alfa*. Traremos uma discussão das imagens capturadas pelo presente experimento e um debate sobre as vantagens, des-

vantagens e desafios de se utilizar a câmara de nuvens em um sala de aula do ensino médio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Abordagem pedagógica

Na educação, diversos teóricos defendem abordagens centradas na experimentação e na reflexão teórica, promovendo um aprendizado mais significativo. Uma atividade experimental seguida de uma reflexão teórica pode ser enriquecida ao aplicar as ideias de pensadores como Jean Piaget, Lev Vygotsky e David Ausubel (Moreira, 1999).

Jean Piaget argumenta que o aprendizado ocorre a partir da interação entre o indivíduo e o ambiente. Em atividades experimentais, os alunos constroem conhecimento através da prática e da observação direta. Piaget destaca que a fase de desenvolvimento influencia como os alunos assimilam e acomodam novas informações, o que pode ser trabalhado em atividades experimentais onde eles têm a oportunidade de testar hipóteses e reorganizar conceitos. Após a experiência prática, a reflexão teórica permite consolidar o aprendizado através de esquemas mentais previamente ativados (Piaget, 1994).

Lev Vygotsky, por sua vez, enfatiza o papel do ambiente social e das interações no aprendizado. Ele propõe que, ao participar de atividades experimentais em grupo, os alunos construam conhecimento colaborativamente, orientados por colegas ou pelo professor em sua zona de desenvolvimento proximal (ZDP). Ao complementar a prática com uma atividade teórica, os alunos podem consolidar o aprendizado e discutir conceitos, incorporando o conhecimento de maneira significativa. Essa troca social e a reflexão individual tornam o aprendizado mais completo (Vygotsky, 1978).

David Ausubel defende a importância do conhecimento prévio e do aprendizado significativo. Ao começar com uma atividade experimental, o professor ativa o conhecimento prévio dos alunos e promove a aprendizagem por descoberta. Na etapa teórica subsequente, as novas informações se conectam com os conceitos experimentados, fortalecendo a retenção e a compreensão dos conteúdos de forma mais rigorosa e significativa (Ausubel, 2003).

Assim, existem evidências fundamentadas que uma atividade experimental seguida de uma reflexão teórica permite que os alunos integrem prática e teoria, promovendo uma aprendizagem ativa e significativa, conforme sugerido pelas teorias de Piaget, Vygotsky e Ausubel.

4.2 Câmara de nuvens

A utilização de uma câmara de nuvens no ensino médio pode ser uma maneira de motivar os estudantes a entender fenômenos complexos da física, como os raios cósmicos e a emissão de partículas *alfa* (Cabral, Raphaella Bahia Soares et al, 2022), e possibilitar inúmeras abordagens pedagógicas distintas. Esse dispositivo permite visualizar a interação de partículas subatômicas com a matéria, criando trajetórias visíveis que se manifestam

como trilhas de condensação. Ao observar essas trilhas, os alunos podem compreender de forma prática a presença de partículas altamente energéticas, como os raios cósmicos, e como elas interagem com a atmosfera da Terra como demonstra Laganá (2011). Além disso, o estudo das partículas *alfa*, emitidas por elementos radioativos, pode ser explorado de maneira visual, facilitando a compreensão de conceitos como radiação e decaimento nuclear. A câmara de nuvens oferece uma oportunidade única para uma abordagem experimental desses conceitos, transformando a aprendizagem e conectando com fenômenos reais do universo.

Com a montagem da câmara de nuvens em sala de aula, é importante trazer para os estudantes como é possível detectar partículas subatômicas em seu interior. Para justificar os fenômenos observados é necessário trazer informações de como ocorre a ionização das moléculas de álcool presente no interior da câmara pelas partículas energéticas advindas do espaço sideral ou alguma fonte de radiação. Para que seja possível visualizar essas trilhas de ionização é necessário criar uma zona supersaturada dentro da câmara vedada, pois com isso essa zona estará instável e qualquer mínima perturbação ocasionará a condensação do vapor do álcool, gerando as trilhas visualizadas no interior do recipiente. Por conta dessa necessidade, a utilização do gelo seco se deve por condensar o vapor de álcool na parte metálica enquanto a fonte de calor na parte superior intensifique a evaporação do álcool assim gerando um gradiente de temperatura, possibilitando o surgimento da zona supersaturada que encontra-se alguns centímetros acima da tampa metálica, onde será possível visualizar/capturar registros de partículas cósmicas na câmara de nuvens.

Vale salientar que a altitude do local de realização do experimento, interfere no tipo de partículas que podem ser detectáveis. Partículas mesônicas como os *píons*, que se formam em altitudes mais elevadas devido à interação dos raios cósmicos primários com a atmosfera, não são observadas em localidades com altitude do nível do mar. Por conta disso, o presente trabalho foca em partículas como múons, prótons, elétrons e partículas *alfa*, cujas ocorrências são mais prováveis, no presente trabalho o experimento foi realizado a cerca de 1000 metros do nível do mar.

Existem algumas configurações de trilhas que podem ocorrer no interior da câmara, por exemplo trilhas longas e retilíneas, provenientes de partículas muônicas, trilhas curtas, densas e retilíneas, típicas de partículas *alfa*, trilhas curvas ou espiraladas, oriundas de partículas como elétrons/pósitrons ou partículas *beta* e trilhas em formatos de V, deixadas por partículas mesônicas como por exemplo o *píon*. É possível trazer discussões em sala de aula tal como, qual partícula foi responsável por determinado rastro, explicar o porquê de partículas alfas ou muônicas deixam rastros quase retilíneos enquanto as trilhas provenientes de elétron/pósitrons ou partículas *betas* apresentam curvas e espirais.

Já para as análises das partículas provenientes do material radioativo é possível fazer uma comparação do comportamento dos traços das partículas *alfa* antes e após a introdução dos ímãs de neodímio. É possível trazer discussões em sala do porquê aquele

material é considerado radioativo assim como trazer conceitos de eletromagnetismo ao relacionar a diferença de traços deixados pelas partículas antes e depois delas estarem em contato com o campo magnético dos ímãs.

Com a construção da câmara de nuvens de baixo custo, foram coletadas fotos de autoria própria de partículas cósmicas de baixa energia, com características de partículas como elétrons, também chamados de partículas *betas*, apresentado na Figura 4.7. A Figura 4.8, por sua vez, evidencia um traçado retilíneo, típico de partículas *alfa* ou também prótons. Também foi possível detectar partículas de altas energias, porém como mencionado anteriormente, seu traçado é fraco porém longo devido a sua alta energia 4.9. É possível trazer discussões que façam a conexão do experimento com conceitos da física de partículas como por exemplo partículas elementares, pois é possível observar partículas como os elétrons e múons, que são partículas leptônicas e elementares, trazer a existência do conceito de antipartículas, já que existe a possibilidade de visualizar a interação de um pósitron, a antipartícula do elétron.

O conjunto de imagens apresentado ilustra a eficácia da câmara de nuvens de baixo custo, uma ferramenta que possibilita a análise de partículas provenientes de raios cósmicos. Este dispositivo pode ser utilizado como recurso pedagógico em ambientes escolares, permitindo a caracterização detalhada de diferentes partículas e suas respectivas peculiaridades. Sua acessibilidade, aliada à capacidade de gerar observações visuais de fenômenos cósmicos, torna-o um instrumento valioso para a compreensão de conceitos fundamentais da física moderna. A utilização da câmara de nuvens oferece aos alunos uma oportunidade única de explorar, de maneira prática e interativa, a natureza das partículas subatômicas e os processos envolvidos na interação da matéria com radiações cósmicas

Uma fonte radioativa pode ser inserida na câmara, aumentando as possibilidades de estudos das partículas elementares que podem ser usadas pelo professor em sala de aula. Neste trabalho, após a inserção do tório, primeiro analisamos a deflexão das partículas *alfa* em contato com o campo magnético do ímã, como pode ser visto nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Ao observar a possível deflexão, também é possível afirmar que as partículas provenientes da fonte radioativa possuem carga e por conta disso sofrem as deflexões devido ao campo magnético.

Figura 4.1 – A) Possíveis interações das partículas *alfa* com o campo magnético do ímã de neodímio. B) Negativo: possíveis interações das partículas *alfa* com o campo magnético do ímã de neodímio.

Fonte: Aatoria Própria.

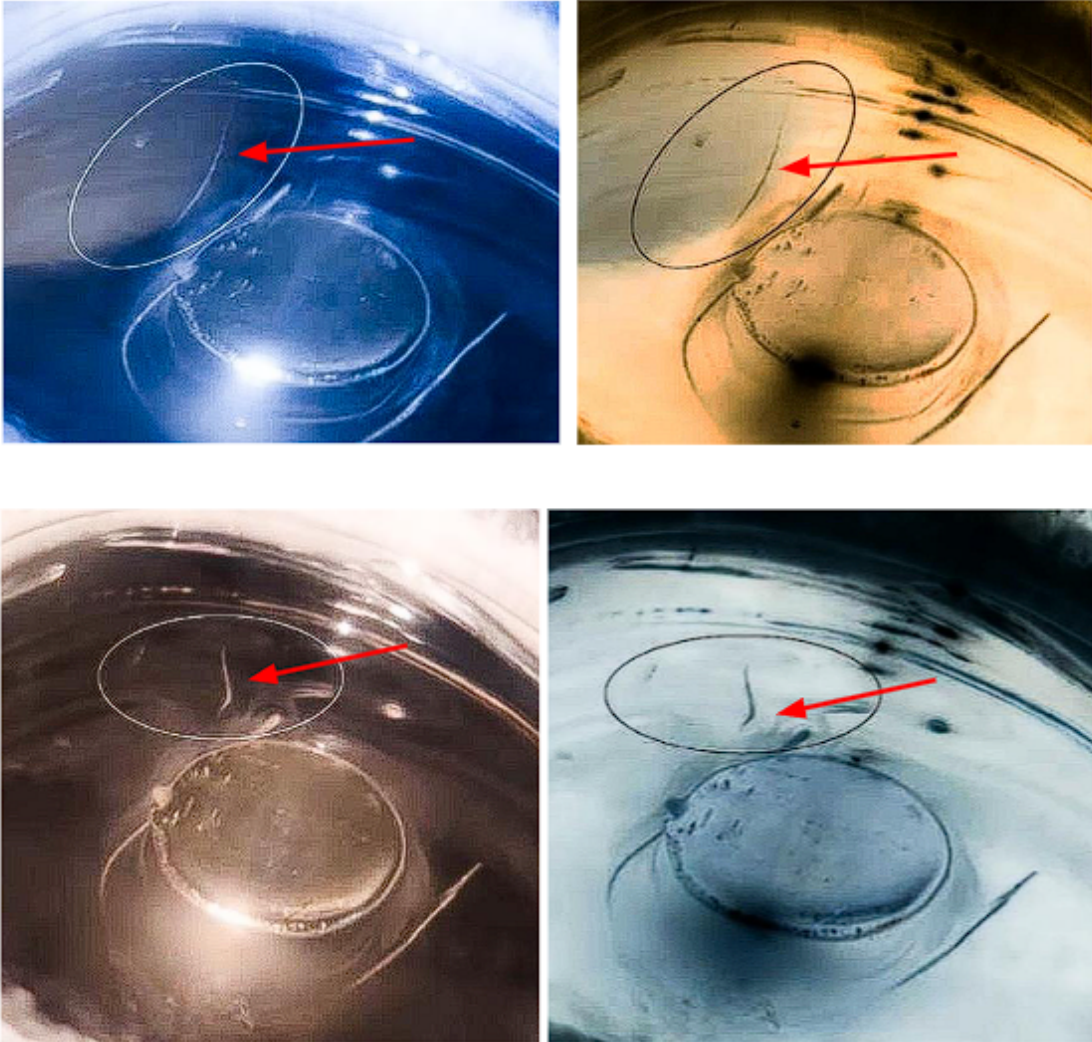


Figura 4.2 – A) Possíveis interações das partículas *alfa* com o campo magnético do ímã de neodímio. B) Negativo: possíveis interações das partículas *alfa* com o campo magnético do ímã de neodímio.

Fonte: Aatoria Própria.

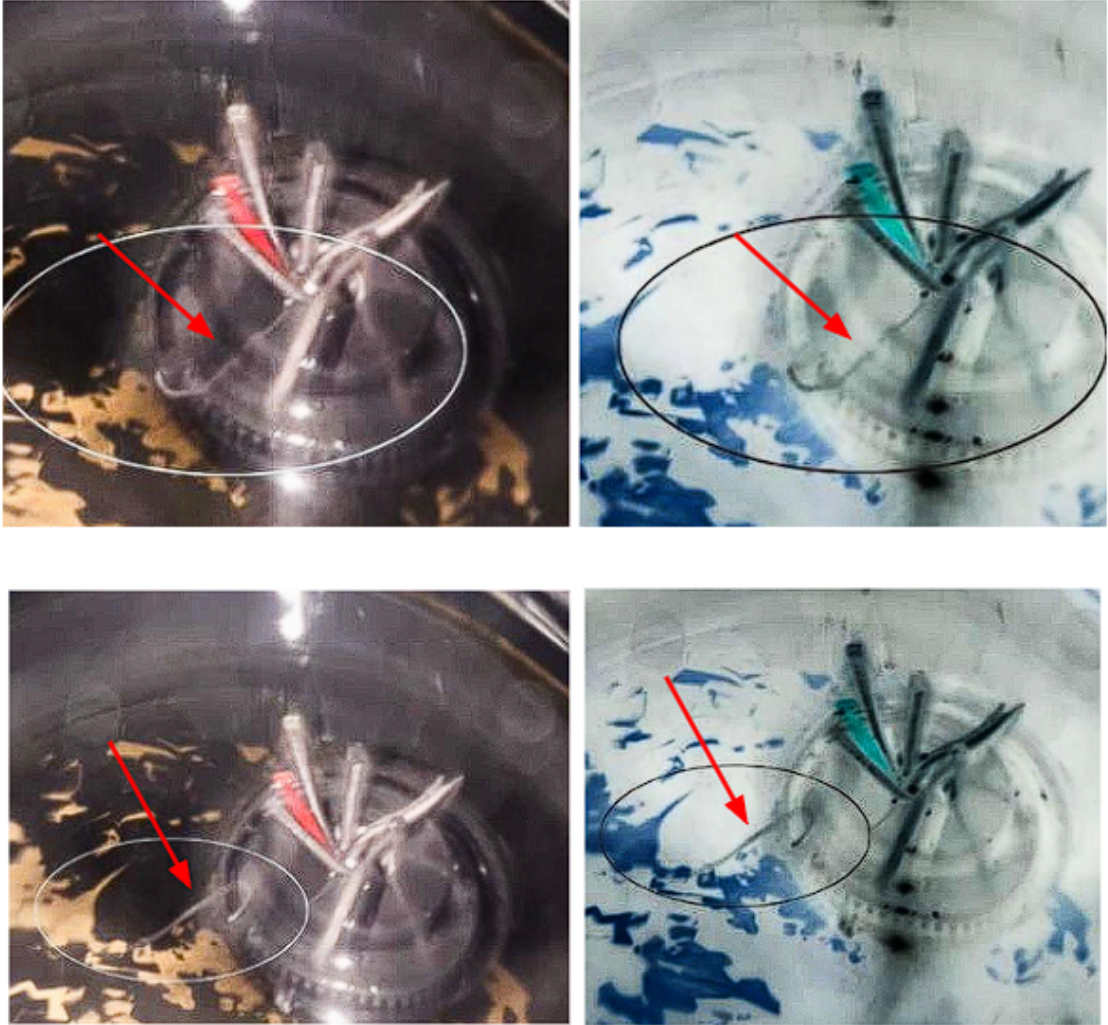
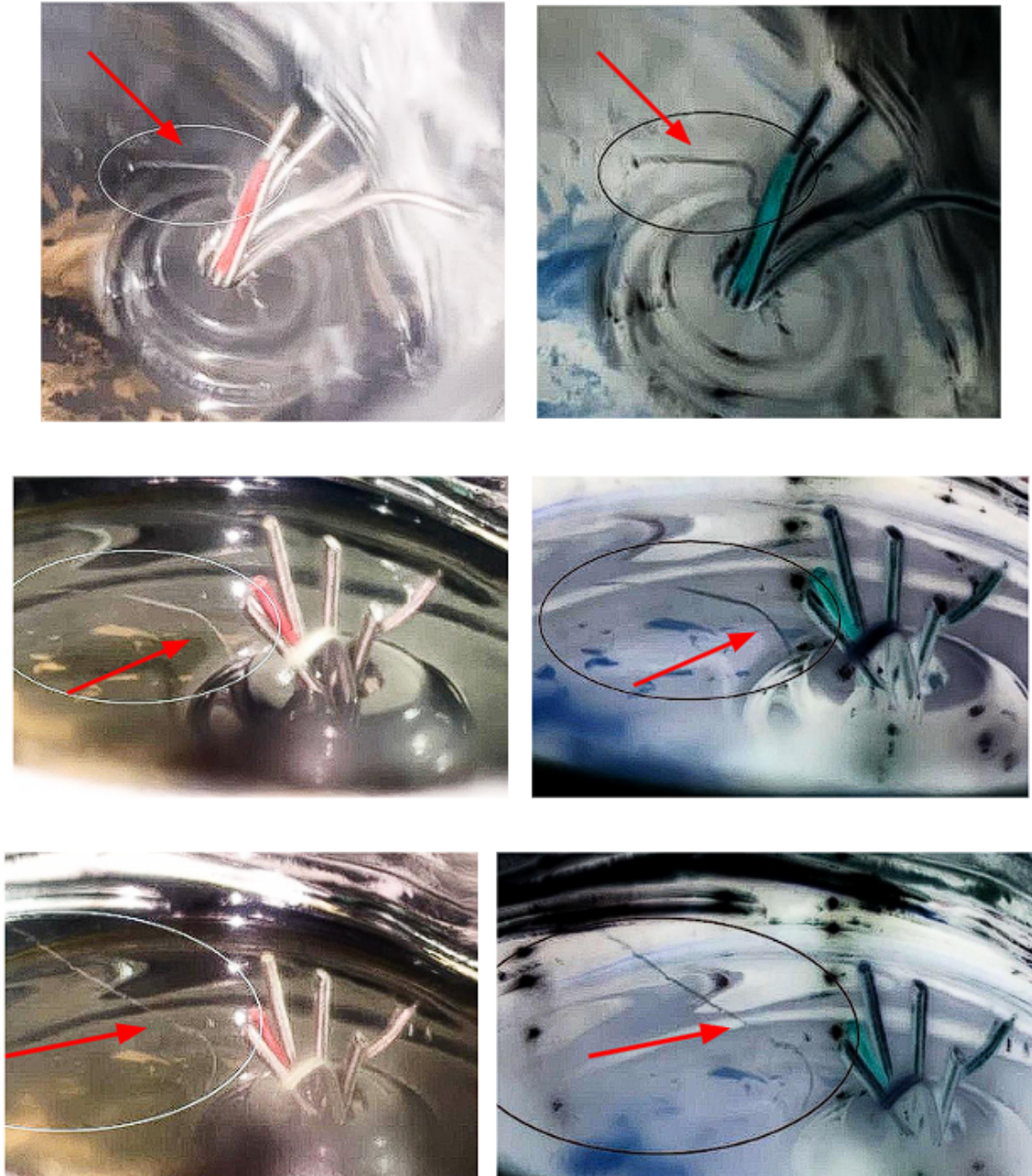


Figura 4.3 – A) Possíveis interações das partículas *alfa* com o campo magnético do ímã de neodímio. B) Negativo: possíveis interações das partículas *alfa* com o campo magnético do ímã de neodímio.

Fonte: Aatoria Própria.



4.3 Análise com auxílio do *software* Tracker®

A segunda análise, mais complexa e robusta, foi realizada com o auxílio do *software* Tracker® (Brown, 2025), uma ferramenta de análise e modelagem de movimento que permite rastrear objetos em vídeos, medir posições, velocidades e acelerações, e realizar análises físicas, com o intuito de estimar o valor de R . Assim, rearranjando os termos da Equação (2.2), o valor da energia será dado por

$$E = \left(\frac{R}{0,325} \right)^{2/3}. \quad (4.1)$$

Mesmo que nas filmagens tenham sido usados ímãs na captação da interação das partículas *alfa* com a câmara de nuvens, isso não afeta a energia da partícula, já que o campo magnético não acelera ou retarda uma partícula carregada (GRIFFITHS, 2021). Com isso, foram selecionadas as imagens com o traço o mais reto possível para a análise da energia.

A partir da Figura 4.4, foi feita a análise no *software* Tracker® para determinar a distância percorrida pela partícula *alfa*. Como método de calibragem no software, utilizou-se que o comprimento da parte vermelha do material equivale a 1 centímetro que foi medido anteriormente com auxílio de um paquímetro. O valor obtido da distância percorrida foi de 1,72 cm. Desta forma utilizando a Equação 4.1, obtemos 3,04 Mev para a energia desta partícula. Para a Figura 4.5, os valores da distância do traço maior e do menor foram respectivamente 3,24 cm e 1,12 cm. Utilizando a Equação 4.1, as respectivas energias são de 4,6 Mev e 2,28 Mev. Com a Figura 4.6 o valor obtido foi de 0,84 cm e utilizando e assim, o valor provável da energia será de 1,89 Mev, possíveis valores de erros que podem está associado seria em relação a paquimetro por conta de ser o método de calibragem. De acordo com Laganá (2011), quanto mais energética a partícula for, menos moléculas ela ioniza e quanto menos energéticas, mais moléculas serão ionizadas. Como visto na Figura 4.5 e na Figura 4.6 a partícula mais energética obteve um traço maior, porém fino, enquanto a menos energética teve um traço menor, porém mais espesso.

Figura 4.4 – A) Rastro de uma partícula *alfa*. B) Negativo do rastro da partícula *alfa*.
Fonte: Autoria Própria.



Figura 4.5 – A) Rastro de uma partícula *alfa*. B) Negativo do rastro da partícula *alfa*.
Fonte: Aatoria Própria.

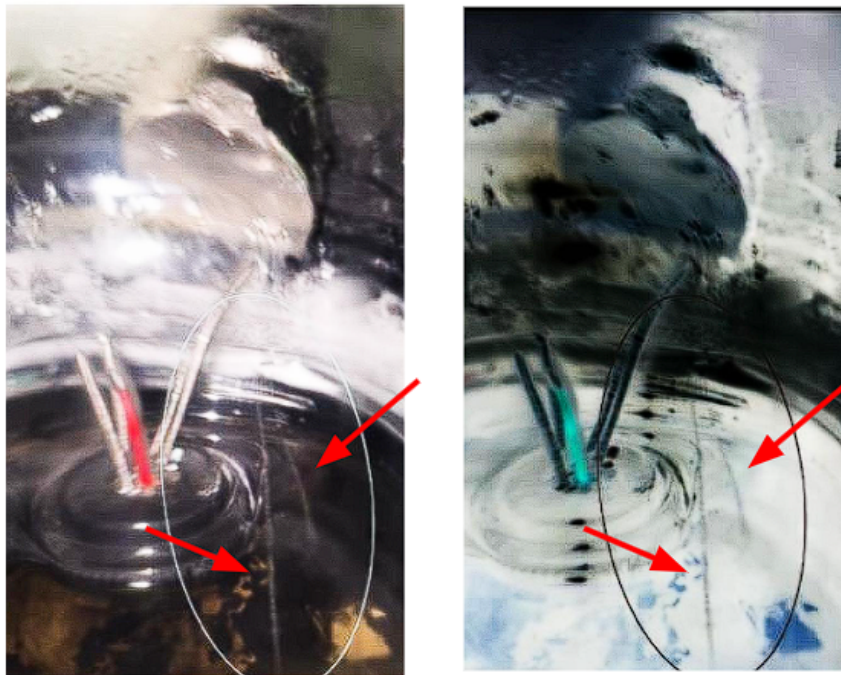
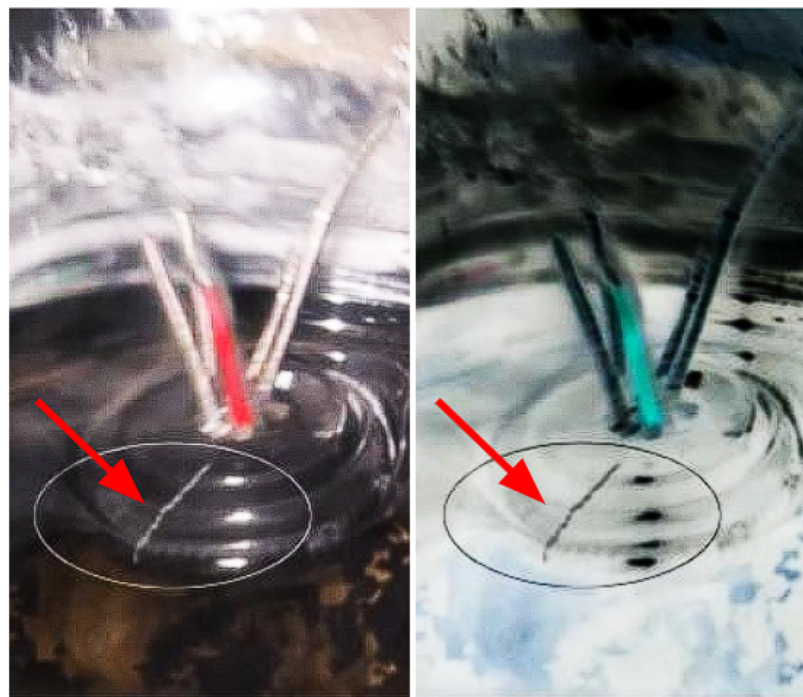


Figura 4.6 – A) Rastro de uma partícula *alfa*. B) Negativo do rastro da partícula *alfa*.
Fonte: Aatoria Própria.



Levando em consideração que a equação empírica de Sorensen e Phelps foi desenvolvida para a densidade do ar e que a energia das partículas *alfa* emitidas pelo tório varia em torno de 4 a 10 MeV, os resultados encontrados são aceitáveis. Devido à densidade do

álcool ser maior que a do ar, fazendo com que os traços ionizantes deixados pelas partículas *alfa* sejam menores, pois a energia se dissipa mais rapidamente devido às várias interações com as moléculas, em comparação com o ar em condições normais.

No presente trabalho, a faixa de energia das partículas *alfa* variou entre 1,89 e 4,6 MeV, correspondendo, respectivamente, à faixa de 4 a 10 MeV no ar. Utilizando a Equação (2.2) e substituindo E pelos valores 10 e 4 MeV para encontrar as maiores e menores distâncias, foram obtidos os seguintes valores: 5,85 cm e 1,48 cm.

Calculando a razão entre os valores da maior e menor distância para o ar e a razão entre os valores da maior e menor distância encontrados no presente trabalho, obtivemos, respectivamente, 3,952 e 3,842 sendo assim uma correspondência de aproximadamente 97%. Esses resultados sustentam a utilização da equação de Sorensen e Phelps para a câmara de nuvens e a veracidade de que as partículas analisadas são emissões *alfa*.

O mesmo raciocínio se aplica às energias. Se as energias das partículas *alfa* variam entre 4 a 10 MeV no ar em condições normais, fazendo sua razão e comparando com a razão da maior e menor energia encontradas no presente trabalho, obtivemos, respectivamente, 2,5 para o ar e 2,43 para o álcool. Novamente, uma correspondência de 97% entre os valores. Supondo que a energia das partículas se comporta de maneira linear com a densidade do meio, é possível deduzir uma constante de correção, expressa pela seguinte fórmula

$$CC \cdot 1,89 \text{ MeV} = 4 \text{ MeV}. \quad (4.2)$$

Assim, podemos deduzir que a constante C fica dada por

$$CC = \frac{4 \text{ MeV}}{1,89 \text{ MeV}} = 2,11 \quad (4.3)$$

Aplicando essa constante de correção às energias encontradas de 1,89 MeV; 2,28 MeV; 3,04 MeV e 4,6 MeV, obtemos, respectivamente, os valores corrigidos de 4 MeV; 4,8 MeV; 6,64 MeV; e 9,73 MeV. Esses valores estão na faixa de energia da emissão de partículas *alfa* prevista pela equação empírica de Sorensen e Phelps para a densidade do ar. Se comparamos o valor da constante com a densidade do vapor de álcool (CETESB,2025), os valores são semelhantes, assim, é possível dizer que CC é equivalente a densidade do meio onde esta acontecendo as interações das partículas em estudo, e como a densidade do ar é considerado como $1,225 \text{ kg/m}^3$, ao aplicar a constante de correção aos valores da energia no ar, os valores utilizados como referência no presente trabalho, continuam a representar os valores energéticos descritos na literatura. Com isso, fazer essa equivalência da constante e a densidade do meio poderia ser uma solução para os dados do presente trabalho se correlacionarem aos valores descritos na literatura.

Porém, é necessário a realização do mesmo procedimento anteriormente descrito, mas com vapores de densidades distintas. Ao analisar os dados obtidos e comparar as constantes de correção com as suas respectivas densidades descritas na literatura, caso se

demonstrem equivalentes, reforçaria a sua aplicabilidade para obter os valores energéticos das partículas subatômicas

Essa segunda etapa possibilita a discussão da utilização da câmara de nuvens para estimar a densidade do fluido presente no seu interior, porém devido a sua complexidade pode não ser ideal para determinadas situações possíveis em um ambiente escolar, seja o déficit de materiais como computadores para a análise dos dados ou tempo para realização adequada dessa parte.

Figura 4.7 – A) Rastro deixado por uma partícula de baixa energia. B) Negativo do rastro deixado por uma partícula de baixa energia.

Fonte: Autoria Própria.

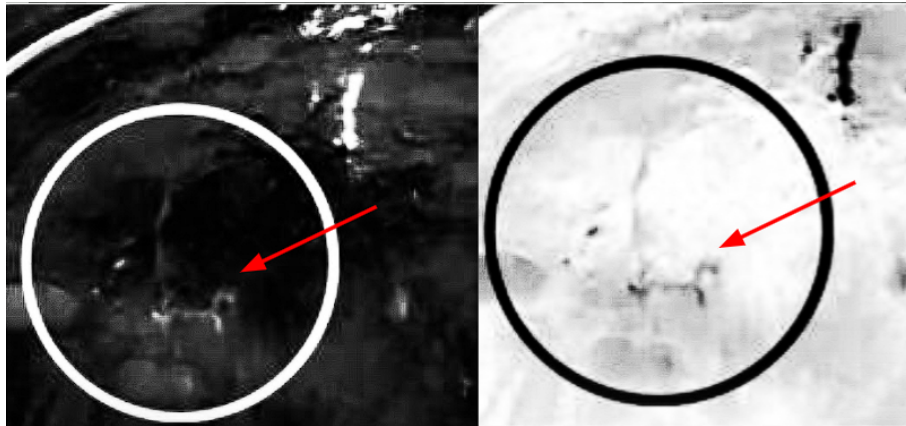


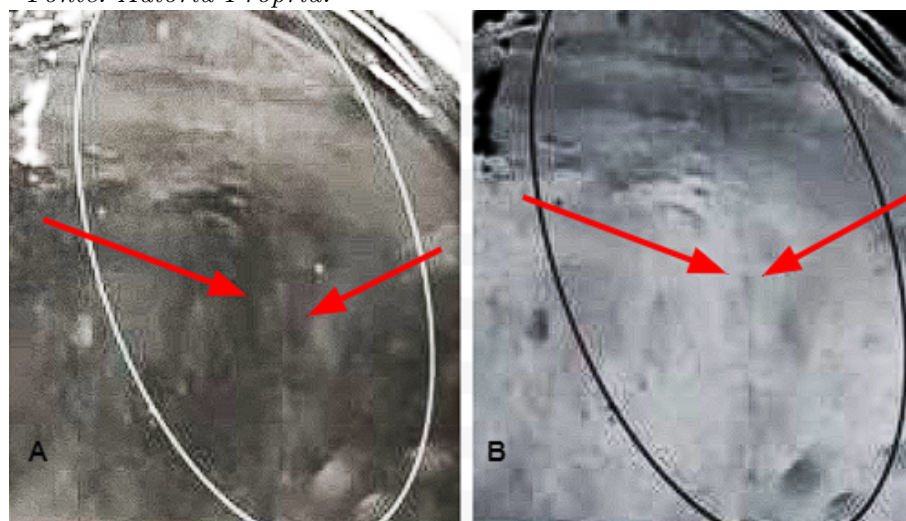
Figura 4.8 – A) Rastro deixado por uma partícula de baixa energia. B) Negativo do rastro deixado por uma partícula de baixa energia.

Fonte: Autoria Própria.



Figura 4.9 – A) Rastro deixado por uma partícula de alta energia. B) Negativo do rastro deixado por uma partícula de alta energia.

Fonte: Autoria Própria.



Tendo como objetivo do presente trabalho ser um material didático de apoio ao professor de física do ensino médio, é possível analisar vantagens, desvantagens e desafios relacionados à execução das etapas para o ensino de física de partículas. Por se tratar de um tema que não é abordado no ensino médio, por conta da não obrigatoriedade de serem contemplados diretamente na BNCC, principal incentivo na escolhas dos conteúdos de física a serem lecionados, existe uma possibilidade de implementação do presente material. Com a reforma do ensino médio surgiram as matérias eletivas, são matérias que os alunos podem escolher, além das disciplinas obrigatórias e do projeto de vida (BNCC). Por conta dessa possibilidade, é possível trazer o estudo relacionado a física de partículas, com a alegação de que ao decorrer da matéria os discentes seriam capazes de compreender o método científico, pois os estudantes farão análises do experimento e com isso relacionar os fenômenos com as teorias existentes, assim como o contato com teorias modernas, já que a física de partículas é uma área relativamente recente, possuindo diversas pesquisas de fronteiras, propondo explicações e soluções para problemas em aberto no modelo padrão atual.

Outra vantagem, por se tratar de um material que propõe a utilização de um experimento com forte apelo visual, possibilita a retenção do interesse dos alunos a respeito do tema. Por possuir a possibilidade de implementar metodologias pedagógicas ativas, pois os estudantes poderão pesquisar de maneira autônoma, permite que os alunos se tornem os protagonistas do ensino ao propor a construção e análise dos fenômenos presentes, assim criando a conexão entre os discentes e a matéria aplicada, estreitando o distanciamento entre teoria e prática em sala de aula. Porém, devido a possíveis desafios relacionados à disponibilidade de certos materiais, como gelo seco, o eletrodo tungstênio e álcool isopropílico 99%, a montagem do experimento pode ficar comprometida, pois mesmo possuindo materiais de baixo custo, eles podem não ser disponíveis, devido a realidade de

algumas instituições. Por ser uma parte essencial do material de apoio, à implementação do mesmo se torna incerta, por não atingir os principais objetivos, sendo eles a participação ativa dos alunos e a visualização do fenômeno no interior da câmara, demonstrando a prática e não se limitando somente a teoria.

Outro ponto que deve ser levado em consideração, é que no ensino médio, os estudantes possuem dificuldades na disciplina de física devido ao *déficit* na base matemática que é exigida na explicação do conteúdo, como também na resolução de problemas físicos, como pode ser visto com os resultados do PISA de 2018 (INEP, 2020). Por se tratar de um material que introduz conceitos que regem a física de partículas, não possuem demonstrações matemáticas complexas, e exigindo no máximo conceitos básicos de soma, subtração e divisão, para exemplificação das leis de conservação como conservação do número leptônico, bariônico, estranheza, entre outros. Porém, caso o docente ache necessário, é possível trazer conceitos matemáticos mais robustos, como por exemplo conceitos de relatividade restrita, na qual pode ser utilizada para explicar a meia vida de partículas subatômicas (Halliday e Resnick, 2012). Sendo assim, é possível contemplar a implementação do material seja de maneira mais simples somente com conceitos e aplicações básicas, como também é possível se aprofundar mais e trazer uma conexão com a física da relatividade restrita.

Como desafio, seria necessário implantar novas fontes de dados na etapa experimental, para obtenção de mais análises a respeito dos fenômenos. Uma possibilidade seria colocar uma fonte de um campo elétrico e observar a deflexão da partícula em estudo. Também é possível introduzir diferentes fontes de materiais radioativos de baixa periculosidade para observar diferentes partículas radioativas e compará-las entre si.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O material didático proposto para a modernização do ensino de física no nível médio, ao abordar um tema de fronteira como a física de partículas. Trata-se de uma iniciativa que busca superar a tradicional limitação do ensino de Física à preparação para vestibulares, inserindo tópicos que, além de instigantes, ampliam a visão dos estudantes sobre a ciência contemporânea. Essa abordagem dialoga com as possibilidades trazidas pelo novo ensino médio, especialmente no contexto das disciplinas eletivas, permitindo maior liberdade para explorar temas de interesse que vão além do currículo obrigatório.

Uma das principais contribuições do material é a inclusão de práticas experimentais, como o uso da câmara de nuvens, que proporciona aos alunos a possibilidade de observar, de maneira indireta, fenômenos subatômicos em tempo real. Essa prática não apenas estimula a curiosidade e o engajamento, mas também facilita a compreensão do método científico, ao permitir que os estudantes realizem análises empíricas, relacionando os dados obtidos com teorias físicas.

O material é flexível o suficiente para atender diferentes níveis de complexidade. Por um lado, pode ser utilizado com conceitos básicos, como conservação de números leptônicos e bariônicos, ou com uma abordagem mais avançada, incluindo tópicos como relatividade restrita para explorar a meia-vida de partículas. Essa flexibilidade amplia seu alcance, podendo ser adaptado à realidade de turmas com diferentes níveis de preparação, especialmente considerando as dificuldades comuns dos estudantes em física, frequentemente associadas a lacunas na formação matemática.

Entretanto, a implementação enfrenta desafios que devem ser cuidadosamente considerados. A necessidade de materiais específicos, como gelo seco, eletrodo tungstênio e álcool isopropílico podem limitar a acessibilidade em escolas com menos infraestrutura. Além disso, caso o docente queira implementar novas fontes de dados, como exemplos dados anteriormente, a inclusão de fontes radioativas de baixa periculosidade, embora enriqueça o experimento, exige cuidados adicionais para garantir segurança e acesso aos materiais radioativos.

Por fim, é importante destacar o potencial transformador do material. Ele não apenas amplia o escopo do ensino de Física no ensino médio conectando-os a temas e práticas que refletem a ciência moderna. A física de partículas, com suas teorias e desafios atuais, oferece um cenário rico para inspirar novas gerações de cientistas, engenheiros e pensadores críticos.

Referências

- ABDALLA, M. C. B. *O discreto charme das partículas elementares*. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.
- AUSUBEL, D. P. *Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva*. Lisboa: Plátano, 2003.
- BARBOSA, M. R. et al. *Teoria de representações: Grupo simétrico e grupo unitário*. 2019.
- BETTINI, A. *Introduction to Elementary Particle Physics*. [s.l.]: Cambridge University Press, 2014.
- BOFF, C. A.; BASTOS, R. O.; MELQUIADES, F. L. Práticas experimentais no ensino de física nuclear utilizando material de baixo custo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 34, n. 1, p. 236-247, 2017.
- BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular (BNCC)*. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/>. Acesso em: 07 jan. 2025.
- BROWN, D.; CHRISTIAN, W.; HANSON, R. M. Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education. [S. l.]: Open Source Physics, 2025. Disponível em: <https://opensourcephysics.github.io/tracker-website/>. Acesso em: 3 jun. 2025.
- CABRAL, R. B. S. et al. A câmara de nuvens como estratégia pedagógica para o ensino de raios cósmicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 44, 2022.
- CETESB. Emergências Químicas - Produtos. Disponível em: https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=%C3%81LCOOL%20ISOPROP%C3%8DLICO. Acesso em: 21 jan. de 2025.
- CLOUDYLABS. *Different technologies of cloud chambers*. Disponível em: <https://www.cloudylabs.fr/wp/technologies/>. Acesso em: 07 dez. 2025.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica*. Rio de Janeiro: Editora Campos, 1988.
- GALILEU. Bóson de Higgs é visto acompanhado pela primeira vez. *Revista Galileu*, 06 jun. 2018. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/06/boson-de-higgs-e-visto-acompanhado-pela-primeira-vez.html>. Acesso em: 29 jan. 2025.
- GRIEDER, P. K. F. *Cosmic Rays at Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book*. Amsterdam: Elsevier Science, 2001.
- GRIFFITHS, D. *Introduction to Elementary Particles*. John Wiley & Sons, 2020.
- GRIFFITHS, D. *Introduction to Electrodynamics Fourth Edition*. 2021.
- GUPTA, N. N. D.; GHOSH, S. K. A report on the Wilson Cloud Chamber and its applications in physics. *Reviews of Modern Physics*, v. 18, n. 2, p. 225–290, 1946. DOI: 10.1103/revmodphys.18.225.
- HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK, R. *Fundamentos de Física*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 4.

- HAWKING, S. *Uma breve história do tempo*. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2015.
- INSTITUTO DE FÍSICA, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Quarks, léptons e mediadoras. [s.d.]. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/3RadioatividadeeParticulas/2QuarksLeptonseMediadoras/Qarksleptonsemediadoras.html>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA | INEP. Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA). In: *Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA)*. Brasília-DF, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/avaliacao-e-exames-educacionais/pisa>. Acesso em: 07 jan. 2025.
- JORNAL DA USP. Maior acelerador de partículas do mundo passa por um upgrade: o que vem por aí. *Jornal da USP*. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-exatas-e-da-terra/maior-acelerador-de-particulas-do-mundo-passa-por-um-upgrade-o-que-vem-por-ai/>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- LAGANÁ, C. Estudo de raios cósmicos utilizando uma câmara de nuvens de baixo custo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, 2011.
- MOREIRA, M. A. O modelo padrão da física de partículas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, p. 1306.1-1306.11, 2009.
- MOREIRA, M. A. *Teoria de aprendizagem*. São Paulo: E.D.U., 1999.
- OSTERMANN, F. Um texto para professores do ensino médio sobre partículas elementares. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. São Paulo, v. 21, n. 3, set. 1999, p. 415-436.
- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. Um pôster para ensinar Física de Partículas na escola. *Física na escola*, São Paulo, v. 2, n. 1, maio 2001, p. 13-18.
- PERKINS, D. H. *Particle astrophysics*. 2003. Publications of the American Astronomical Society.
- PIAGET, J. *O Juízo Moral na Criança*. 1. ed. São Paulo: Summus, 1994.
- PINHEIRO, L. A. A câmara de nuvens: uma abordagem integrada entre a Física Clássica e a Física Moderna. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 32, n. 2, p. 517-528, 2015.
- TREVIZOLI, V. et al. *Estudos de Radiação Cósmica de Alta Altitude: Uma Experiência no Ensino Médio Público do Estado de São Paulo*.
- VYGOTSKY, L. S. *A formação social da mente*. São Paulo: Martins Fontes, 1984.
- WILLIAMS, T. Alpha and beta ranges. 2009. Disponível em: <http://www.alpharubicon.com/basicnbc/article16radiological71.htm>. Acesso em: 21 jan. de 2025.
- TOKITA, S; Sugiyama, T.; Noguchi, F.; Fujii, H.; Kobayashi, H. (2006). "An Attempt to Construct an Isosurface Having Symmetry Elements". *Journal of Computer Chemistry, Japan* 5 (3): 159–164. DOI:10.2477/jccj.5.159.