



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS
EXATAS



Trabalho de Conclusão de Curso
Curso de Graduação em Física

Detecção e análise física de raios cósmicos através de câmaras de nuvens

Isabella Marchi Coelho

Prof. Dr. Luiz Antônio Barreiro

Rio Claro-SP
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

Isabella Marchi Coelho

Detecção e análise física de raios cósmicos através de câmaras de nuvens

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para a obtenção do grau de
Bacharel em Física.

Rio Claro - SP

2024

C672d Coelho, Isabella Marchi
Detecção e análise física de raios cósmicos através de
câmaras de nuvens / Isabella Marchi Coelho. -- Rio Claro,
2024
47 f. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Física) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de
Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientadora: Luiz Antonio Barreiro

1. Câmara de nuvens. 2. Partículas (Física nuclear). 3.
Raios cósmicos. 4. Radiação ionizante. I. Título.

Isabella Marchi Coelho

Detecção e análise física de raios cósmicos através de câmaras de nuvens

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para a obtenção do grau de Bacharel em Física.

Comissão Examinadora

Professor Doutor Luiz Antonio Barreiro (orientador)

Professor Doutor Rafael Jesus Gonçalves Rubira

Professor Doutor Ulisses Ferreira Kaneko

Rio Claro, 13 de novembro de 2024.

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Luiz Antônio Barreiro, pela orientação ao longo do desenvolvimento do projeto. Expresso também minha gratidão à minha família e aos meus amigos Gabriel, Lucas, Leonardo e Ana, pelo suporte, apoio moral e encorajamento durante o processo e ao Pedro Nanzer pelo auxílio durante a escrita deste trabalho. Deixo aqui também minha gratidão ao professor Guillermo da geologia pelo empréstimo de material e ao Renato, meu professor de violoncelo pelo interesse e apoio.

"Not only is the Universe stranger
than we think, it is stranger than we
can think"

Werner Heisenberg

Resumo

A detecção de partículas é essencial para desvendar os mistérios do universo e compreender as interações fundamentais entre os elementos que permeiam o cosmos. Ao longo da história da física de partículas, diversos métodos foram desenvolvidos para detectar e analisar essas partículas. Desde os pioneiros modelos criados no início do século XX, como as câmaras de Wilson, até os sofisticados detectores utilizados nos dias atuais, como o Grande Colisor de Hádrons (LHC) no CERN, a busca por compreender a natureza das partículas tem sido incessante. A metodologia empregada neste estudo para a detecção de partículas como os raios cósmicos baseia-se no uso de câmaras de nuvens de Wilson e difusão. O primeiro método, desenvolvido pelo físico escocês Charles Wilson, é uma técnica clássica para visualizar as trajetórias das partículas ionizantes. A câmara consiste em um recipiente hermeticamente fechado preenchido com um gás inerte, geralmente vapor de álcool, que é supersaturado através de uma rápida descompressão. Isso cria condições ideais para que as partículas ionizantes deixem um rastro visível ao interagirem com o gás, formando pequenas nuvens de condensação ao longo de suas trajetórias. No caso específico deste estudo, o sistema é projetado para operar com álcool como meio de detecção. A descompressão rápida da câmara é realizada permitindo que o álcool atinja o estado supersaturado; este processo é fundamental para garantir que as partículas cósmicas ionizantes, ao atravessarem a câmara, interajam com o álcool e formem características trilhas visíveis. A câmara de difusão compartilha dos mesmos objetivos, no entanto, opera com o nitrogênio líquido e diferença de temperatura para que o estado supersaturado seja obtido. Para complementar a detecção, um campo magnético é aplicado perpendicularmente ao plano da câmara. O campo faz com que as trajetórias das partículas carregadas se curvem, permitindo diferenciar entre diferentes tipos de partículas com base na sua relação carga/massa. Esta técnica é especialmente útil para identificar prótons, múons e partículas alfa, que possuem diferentes razões carga/massa e, portanto, curvam de maneiras distintas sob a influência do campo magnético. Após a coleta dos dados, obtidos da gravação do experimento, pode-se analisar e registrar as trilhas deixadas pelas partículas, permitindo a identificação e caracterização das partículas detectadas. Desta forma, a metodologia adotada oferece uma abordagem robusta para a detecção e análise de partículas provenientes de raios cósmicos, contribuindo para o melhor entendimento da física de partículas.

Palavras-chave: Detecção de partículas, raios cósmicos, câmara de nuvem.

Abstract

Particle detection is essential for unravelling the mysteries of the universe and understanding the fundamental interactions among the particles that permeate the cosmos. Throughout the history of particle physics, various methods have been developed to detect and analyse these particles. From the pioneering models created in the early 20th century, such as Wilson's cloud chambers, to the sophisticated detectors used today, such as the Large Hadron Collider (LHC) at CERN, the quest to comprehend the nature of particles has been relentless. The methodology employed in this study for detecting particles such as cosmic rays is based on the use of Wilson's cloud chamber and the diffusion cloud chamber. The first method, developed by Scottish physicist Charles Wilson, is a classical technique for visualising the trajectories of ionising particles. The chamber consists of a hermetically sealed container filled with an inert gas, usually alcohol vapour supersaturated through rapid decompression. This creates ideal conditions for ionising particles to leave a visible trail as they interact with the gas, forming small condensation clouds along their trajectories. In the specific case of this study, the system is designed to operate with alcohol as the detection medium. The rapid decompression of the chamber allows the alcohol to reach a supersaturated state; this process is essential to ensure that ionising cosmic particles, upon traversing the chamber, interact with the alcohol and form characteristic visible trails. The diffusion chamber shares the same objectives; however, it operates with liquid nitrogen and temperature differences to achieve the supersaturated state. A magnetic field is applied perpendicular to the chamber's plane to complement the detection. The field causes the trajectories of charged particles to curve, allowing differentiation between different types of particles based on their charge-to-mass ratio. This technique is particularly useful for identifying protons, muons, and alpha particles, which have different charge-to-mass ratios and thus curve in distinct ways under the influence of the magnetic field. After data collection, obtained from the experiment recording, the trails left by the particles can be analysed and recorded, enabling the identification and characterization of the detected particles. Thus, the adopted methodology offers a robust approach to the detection and analysis of particles originating from cosmic rays, contributing to a better understanding of particle physics.

Keywords: Particle detection, cosmic rays, cloud chamber.

Lista de Figuras

1	Diagrama de Hillas do campo magnético <i>versus</i> o tamanho da fonte de raios cósmicos: adaptada [1]	12
2	Imagem representativa do modelo padrão. Fonte: autora	14
3	Abundância da composição relativa dos raios cósmicos comparada à dos elementos no sistema solar: adaptada [2]	15
4	Imagem representativa do tubo de Crookes. Fonte: [3]	17
5	Fotografia de raio-X tirada por Roentgen em 22 de dezembro de 1895, que mostra a mão de sua esposa. Fonte: [4]	18
6	Figura representativa de um decaimento alfa. Fonte: adaptada [5]	19
7	Imagem do fenômeno atmosférico chamado glória ou <i>brocken spectre</i> . Fonte: [6]	21
8	Imagem do aparato experimental de Wilson: a câmara de nuvens. Fonte: [7]	21
9	Fotografia da detecção de partículas alfa na câmara de nuvens [8]	22
10	Fotografia da detecção de partículas beta na câmara de nuvens [9]	23
11	Fotografia da detecção indireta da trajetória de raios-X na câmara de nuvens [9]	23
12	Nebulosa do Caranguejo, um remanescente de supernova fonte de raios cósmicos na Via Láctea [10]	25
13	Relação entre a constante solar e os raios cósmicos: adaptada [11]	26
14	Figura representativa de um AGN e seu jato de partículas aceleradas em direção à Terra. Fonte: autora.	27
15	Imagem do pulsar PSR B1509-58 e a sua nebulosa de vento MSH 15-52 a 16.000 anos-luz da Terra [12]	28
16	Radiação Cósmica de Fundo (CMB) [13]	33
17	Imagem da montagem experimental da câmara de nuvens.	37
18	Minério de urânio proveniente do Museu de Minerais e Rochas - Departamento de Geologia Unesp - Rio Claro.	38
19	Imagem final da construção da câmara de nuvens.	38
20	Imagem do cooler de computador utilizado no interior da base da câmara de difusão.	39
21	Fotografia da câmara de difusão vista de cima.	40
22	Imagem da montagem experimental da câmara de nuvens por difusão.	41
23	Fotografias com evolução temporal de 1/240 segundos entre elas. Lê-se da esquerda para a direita, de cima para baixo.	42
24	Fotografias com evolução temporal de 1/240 segundos entre elas. Lê-se da esquerda para a direita, de cima para baixo.	43

Lista de Tabelas

1	Partículas Elementares e suas cargas e energias.	14
---	--	----

Sumário

1	Introdução	11
2	Objetivos	13
3	Fundamentação teórica/ revisão bibliográfica	13
3.1	Modelo Padrão	13
3.2	Radiação e radioatividade	16
3.3	Breve contextualização	20
3.4	Câmara de Nuvens de Wilson e de Difusão	21
3.5	Origens dos raios cósmicos	24
3.6	Aceleração dos raios cósmicos	28
3.7	Relação carga/massa (q/m)	32
3.8	Mecanismos de desaceleração	32
4	Materiais e metodologia	35
4.1	Materiais	35
4.2	Metodologia	36
5	Resultados	41
6	Conclusão	44
	Referências	45

1 Introdução

O ramo da física de partículas tem suas origens desde a antiguidade clássica, quando filósofos gregos propuseram que a matéria era constituída de partículas indivisíveis chamadas átomos. Desde essa hipótese criada por Demócrito e Leucipo no século V a.C. até os dias atuais, a teoria atômica foi sendo desenvolvida e lapidada através de descobertas experimentais.

O átomo, portanto, passou por diversas formulações durante os séculos. Em 1897, J.J. Thomson, através do uso de um tubo de raios catódicos, descobre o elétron, uma partícula ainda menor que compunha o átomo, refutando a teoria de que eles seriam indivisíveis e propondo que eles seriam formados por uma massa positiva incrustada com elétrons [14]. Em 1911, Ernest Rutherford, por meio do experimento da folha de ouro, descobre a existência do núcleo atômico, que é cerca de 100 mil vezes menor que o próprio átomo inteiro e conta com os elétrons orbitando ao seu redor. Em 1914, Niels Bohr, com base na observação das linhas espectrais do espectro de emissão do Hidrogênio, propôs um modelo quântico para descrever o átomo de hidrogênio em níveis definidos de energia, dos elétrons ao redor dos núcleos. Em 1932, James Chadwick descobre o nêutron, mostrando que os núcleos são compostos de prótons e nêutrons.

Ainda em meados do século XX, Charles Rees Wilson [15], com a criação da câmara de nuvens, permitiu a visualização da trajetória de partículas subatômicas e seus comportamentos e interações, o que contribuiu para confirmar a existência destas (seção 3.3). Carl Anderson, fazendo uso do dispositivo de Wilson, notou que o movimento de algumas partículas carregadas dava-se no sentido contrário ao dos elétrons, chamando tais partículas de pósitrons. Esta descoberta foi crucial para confirmar a teoria de antipartículas formulada por Paul Dirac.

No início do século XXI, foram realizados experimentos com aceleradores de partículas, em que prótons foram acelerados contra prótons e, ao colidirem, eles eram dispersos em diversas direções, o que indicava a existência de estruturas ainda menores dentro do prótons - os quarks. Outros aceleradores, como o Fermilab e o CERN [16], realizaram experimentos que culminaram na descoberta de partículas previstas pelo Modelo Padrão como os léptons e bósons (seção 3.1). Portanto, é devido a estas descobertas que tem-se, atualmente, uma visão mais consolidada da matéria e das partículas que compõem o nosso Universo.

Todas estas partículas da qual o cosmos e nós somos compostos, têm suas origens em fenômenos astrofísicos, como, por exemplo, a fusão nuclear que ocorre no interior de estrelas como o Sol, em explosões estelares de supernovas, ou seja, tudo o que existe foi formado a partir de material que passou por um ciclo estelar e foi distribuído pelo espaço (seção 3.5).

Neste contexto, existem os chamados raios cósmicos, que, como o nome sugere, são partículas de altas energias provenientes do meio interestelar que chegam até a Terra.

Destes, fazem parte chuviros de partículas secundárias oriundas da interação com a atmosfera terrestre. Como exemplo: prótons, elétrons, múons, radiação alfa, beta e gama, entre outros.

Os melhores candidatos para fontes de raios cósmicos e partículas de alta energia (UHECRs) são núcleos ativos de galáxias (AGNs), estrelas de nêutrons (pulsares) e remanescentes de supernovas (SNRs). Eles foram pioneiramente apresentados por Hillas, que os organizou no diagrama da figura 1.

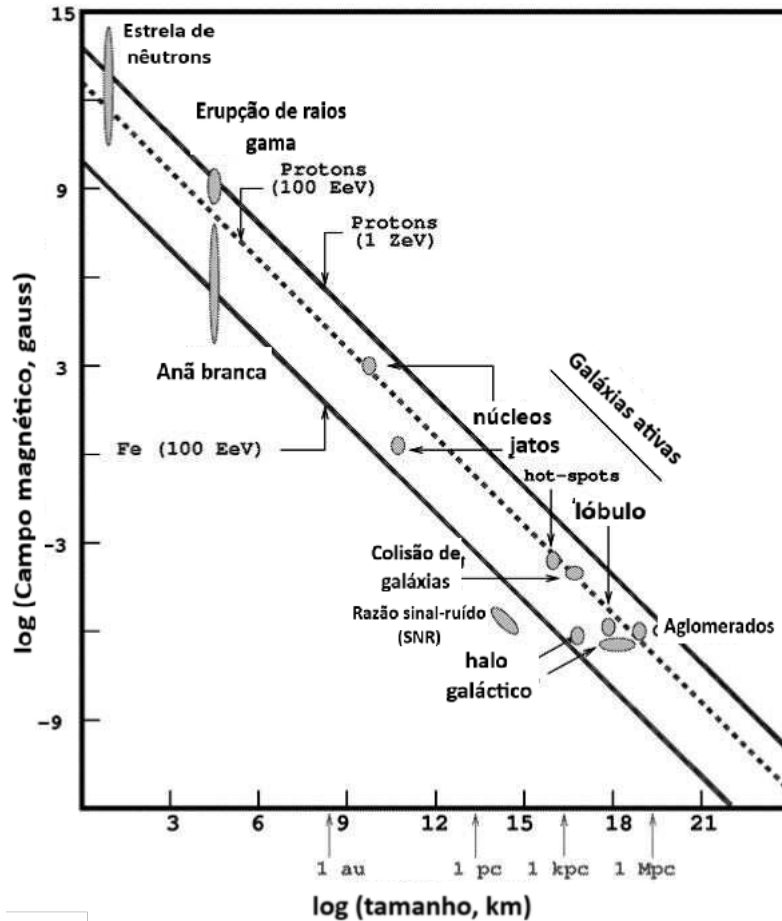


Figura 1: Diagrama de Hillas do campo magnético *versus* o tamanho da fonte de raios cósmicos: adaptada [1]

Na seção 3.6, são descritos modelos de aceleração por meio dos quais os raios cósmicos são acelerados durante o trajeto até nosso planeta. É graças ao ganho de energia destas partículas aceleradas que elas podem ser detectadas por dispositivos como a câmara de nuvens. Algumas destas partículas podem penetrar o corpo humano, como milhares de múons, que atravessam cada metro quadrado da Terra por minuto. Naturalmente, estas partículas não nos causam danos por serem pouco interagentes com a matéria.

Características das partículas podem ser investigadas com o uso de detectores visto que uma análise apurada pode ser feita em cima da trajetória delas. No caso deste estudo, são discutidas as relações carga/massa e as possíveis energias do chuviro de raios cósmicos que adentram o detector. O dispositivo utilizado para esta finalidade é a câmara de nuvens

de Wilson, similar ao realizado por L. Caio [17], baseado no princípio de visualização do trajeto da partícula ionizada em um gás supersaturado. Uma descrição detalhada do método utilizado é encontrada na seção 4

O estudo das especificidades de cada partícula que atravessa a câmara, como sua relação carga/massa possibilita que elas sejam identificadas. Por conseguinte, a aplicação de uma técnica simples como a câmara de nuvens proporciona a exploração de propriedades das partículas elementares que compõem nosso Universo, como a relação intrínseca da carga/massa e os mecanismos de energias das estrelas. Ademais, estudos desta natureza são cruciais para o desenvolvimento da física de partículas, uma vez que podem gerar desde descobertas como as exploradas anteriormente, até a construção de uma base mais palpável deste ramo da física.

2 Objetivos

I. Recriar câmaras de nuvens baseadas na de Wilson por meio de um mecanismo para a geração de um ambiente supersaturado.

II. Ser capaz de detectar raios cósmicos/radiação através da passagem destes na câmara, provocando a condensação do álcool supersaturado.

III. Inserir um campo magnético no sistema, a fim de tornar a trajetória das partículas circular e, assim, poder inferir informações como a relação carga/massa da partícula.

3 Fundamentação teórica/ revisão bibliográfica

3.1 Modelo Padrão

Desenvolvido entre 1970 e 1973, o modelo padrão classifica as partículas do universo em seus grupos e subgrupos com relação a características como carga, massa e spin. Esta teoria é fundamental para a física de partículas, visto que ela descreve as partículas elementares que constituem tudo o que conhecemos [18]. Ademais, seu desenvolvimento permitiu a previsão da existência de partículas outrora desconhecidas, como os quarks top e charm, os bósons W e Z e o bóson de Higgs, que foram descobertos posteriormente de maneira experimental.

A estrutura do modelo padrão (figura 2) baseia-se em dois grandes grupos, os férmions e os bósons. Os férmions são partículas que constituem a matéria, têm spin semi-inteiro e obedecem ao princípio de exclusão de Pauli¹; eles se dividem em dois sub-grupos: os quarks e os léptons; fazem parte das partículas fermiônicas os quarks up, down, top, bottom, strange, os elétrons, múons, tau e os neutrinos, conforme a tabela 1

¹Dois férmions não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente.

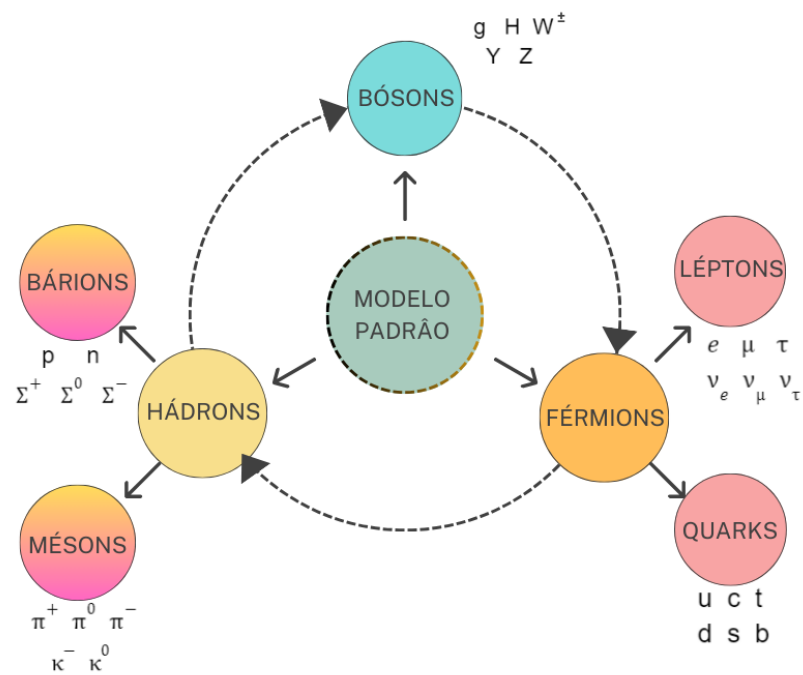


Figura 2: Imagem representativa do modelo padrão. Fonte: autora

Tabela 1: Partículas Elementares e suas cargas e energias.

Partícula	Carga	Massa (GeV)
Léptons		
Elétron (e^-)	-1	$0,511 \times 10^{-3}$
Neutrino Eletrônico (ν_e)	0	$< 10^{-9}$
Múon (μ^-)	-1	0.106
Neutrino Muônico (ν_μ)	0	$< 10^{-9}$
Tau (τ^-)	-1	1.78
Neutrino Tauônico (ν_τ)	0	$< 10^{-9}$
Quarks		
Quark Up (u)	+2/3	0,003
Quark Down (d)	-1/3	0,005
Quark Charm (c)	+2/3	1,3
Quark Strange (s)	-1/3	0,1
Quark Top (t)	+2/3	174
Quark Bottom (b)	-1/3	4,5

Quanto aos bósons, são partículas mediadoras das forças fundamentais² e, ao contrário dos férmions, podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente. Suas partículas são por exemplo: fótons, glúons, bósons W e Z e bóson de Higgs, todos de spin inteiro.

Há também o grupo dos chamados hádrons, dos quais fazem parte os prótons, os

²Força forte, força fraca e força eletromagnética.

nêutrons, as partículas sigma, píons e káons. Os prótons³ e os nêutrons⁴, por sua vez, são formados de quarks e fazem parte de um subgrupo chamado de bárions, que são aqueles formados por três quarks. Outro subgrupo dos hádrons é o dos mésons, partículas compostas por um quark e um anti-quark. O motivo dos hádrons não serem um subgrupo dos férmions é devido ao número de spin de suas partículas, que pode ser tanto inteiro quanto semi-inteiro.

O modelo padrão, portanto, fornece uma base teórica para os chamados raios cósmicos – partículas de alta energia provenientes do espaço que bombardeiam a Terra constantemente. Em sua maioria, trata-se 89% de prótons, 10% de hélio e 1% de elementos pesados como carbono e oxigênio. Estes últimos, sofrem o processo de *spallation*, que resulta na fragmentação em núcleos mais leves como o lítio e o berílio conforme ocorrem colisões de alta energia com outras partículas [19].

Portanto, esses raios cósmicos primários, quando adentram a Terra, passam por colisões inelásticas com átomos e moléculas presentes na atmosfera terrestre. Consequentemente, produzem partículas secundárias e assim por diante, criando o que chamamos de “chuveiro” de partículas, formados majoritariamente de múons quando atingem o nível do solo.

Comparativamente aos elementos do Sistema Solar, os raios cósmicos têm composições semelhantes, diferindo apenas em algumas abundâncias encontradas [2]. Por exemplo, há uma abundância efêmera de hidrogênio e hélio nos raios cósmicos quando comparados à abundância de elementos mais pesados. Isso fica evidente na figura 3.

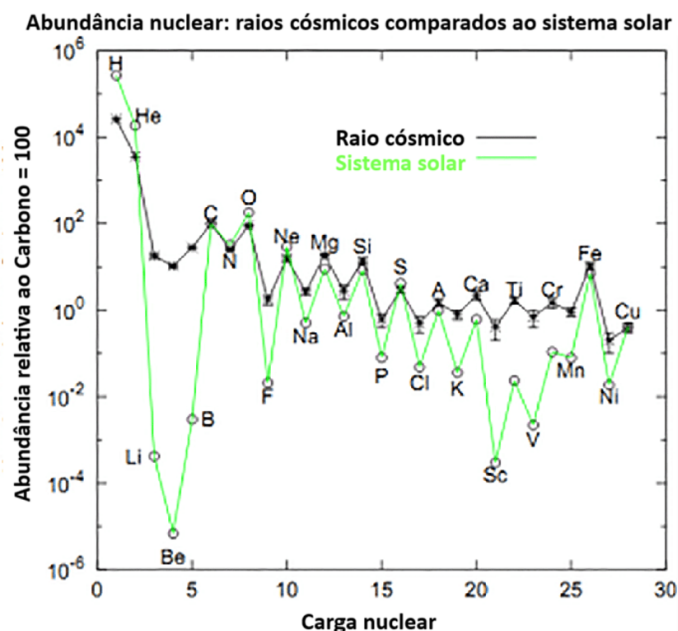


Figura 3: Abundância da composição relativa dos raios cósmicos comparada à dos elementos no sistema solar: adaptada [2]

³configuração *uud* – dois quarks up e um down

⁴configuração *udd* – um quark up e dois down

Quanto às partículas secundárias, elas têm sua composição majoritária de píons, que decaem rapidamente em múons. O múon, por sua vez, pode decair em elétrons e pósitrons. A vida-média do múon é de apenas 2,2 microssegundos, e seu principal decaimento é descrito pelas equações (1) e (2).

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad (1)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \quad (2)$$

em que, μ^- e μ^+ são, respectivamente, o múon negativo e positivo; e^- e e^+ são, respectivamente, o elétron e o pósitron; $\bar{\nu}_e$ e ν_e são: anti-neutrino do elétron e neutrino do elétron e $\bar{\nu}_\mu$ e ν_μ são: anti-neutrino do múon e neutrino do múon, respectivamente. Decaimentos como os descritos acima podem ser verificados por uma propriedade da física de partículas: a conservação do número bariônico, leptônico e de carga [20]. A regra impõe que a soma do número bariônico e leptônico antes da reação deve ser igual à soma depois da reação, analogamente as cargas. Caso contrário, a reação não funciona.

Destarte, em [1], damos ao múon, ao elétron e ao neutrino do múon o número leptônico $L=+1$, e para o antineutrino do elétron damos o número $L=-1$, assim como para todas as antipartículas. Portanto, a soma de antes ($=1$) é igual a soma de depois ($=1-1+1$, respectivamente) e a reação é possível. Quanto à conservação de carga, o múon negativo tem $Q=-1$, o elétron tem $Q=-1$ e os neutrinos têm $Q=0$.

Para o caso [2], temos o lado esquerdo do decaimento tendo $L=-1$ e o lado direito tendo $L=-1$, $L=+1$ e $L=-1$. Por conseguinte, a soma do número leptônico neste caso é conservada e a reação ocorre. Para as cargas tem-se: $Q=1$ para o μ^+ , $Q=1$ para o pósitron e^+ e $Q=0$ para o neutrino e antineutrino, logo, a soma das cargas também se conserva.

3.2 Radiação e radioatividade

Faz-se aqui uma breve discussão sobre radiação, aliada à radioatividade, visto que seus conceitos serão necessários em seções posteriores e na metodologia do experimento realizado no decorrer do trabalho.

Radiação nada mais é que um fenômeno de emissão ou transmissão de energia através do espaço/meio. Há a radiação ionizante, que é aquela cuja energia é suficiente para ionizar átomos, criando íons; e há a não ionizante, como a luz visível e ondas de rádio. A radiação que será utilizada no experimento é a ionizante, ou seja, a dos raios-X, raios gama, partículas alfa e beta. Radiação é energia, e essa energia pode ser parcial ou totalmente depositada em um meio e causar algum efeito.

Historicamente, por mais que a radiação ionizante esteja presente na natureza através dos raios cósmicos, ela só foi descoberta há 128 anos, por Henri Becquerel [21]. Em 1895, Wilhem Conrad Roentgen estava trabalhando com o tubo de Crookes, ilustrado na figura [4], que consistia em um aparato de vidro contendo gás a baixa pressão através do qual

passava uma corrente elétrica, resultando na emissão de raios catódicos⁵

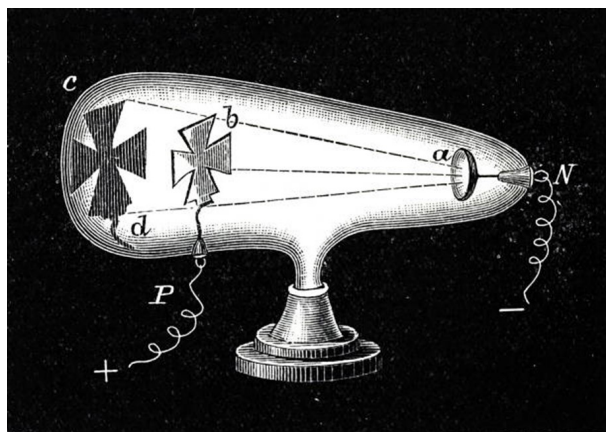


Figura 4: Imagem representativa do tubo de Crookes. Fonte: [3]

Certa noite, Roentgen percebeu uma luminescência fluorescente numa tela recoberta com platinocianeto de bário, próxima ao tubo de Crookes. A tela brilhava mesmo com o tubo coberto por um material opaco que impedia a passagem de qualquer luz. Dessa forma, o cientista percebeu que o tubo era uma fonte de radiação invisível que tinha sua existência revelada ao atingir a tela luminescente. Consequentemente, ele começou a investigar a natureza dessa radiação e constatou que ela era capaz de atravessar papel, madeira e carne humana, mas não atravessava metais e ossos. A ela deu o nome de raios-X, e tal descoberta rendeu ao cientista o prêmio Nobel de Física de 1901 [22].

Fascinado por essa nova radiação de natureza desconhecida até então, Roentgen colocou a mão de sua esposa, Anna Bertha Roentgen, entre o tubo de Crookes e uma placa fotográfica, que revelou uma imagem (figura 5) clara dos ossos de sua mão e do anel de casamento que ela usava. Tal acontecimento tornou-se o marco do nascimento da radiografia.

Em 26 de fevereiro de 1896, em uma exposição em Paris, Antoine Henri Becquerel planejava demonstrar a conexão entre radiação e minerais que brilhavam quando expostos a luz. Ele se interessava pelo fenômeno da fluorescência e após a descoberta dos raios-X em 1895, organizou um experimento para verificar se os dois fenômenos podiam estar conectados. Seu plano era expor o material fluorescente ao Sol e depois colocá-lo, junto com um objeto de metal, em cima de uma placa fotográfica. Se a placa mostrasse a imagem do objeto, estaria demonstrado que o material fluorescente emitia raios-X.

No entanto, os dias que se seguiram foram todos nublados, e Becquerel foi forçado a adiar o experimento. Ele cobriu seu composto de urânio com uma manta preta, junto com a placa fotográfica e o objeto de metal – uma cruz maltesa feita de cobre – e aguardou até um dia ensolarado. Para a surpresa de Becquerel, ao tirar o manto da gaveta em que estava guardado, notou que a imagem da cruz apareceu na placa fotográfica, mesmo não tendo sido exposta ao sol. Em conclusão, tornou-se evidente que os cristais de urânio

⁵Feixes de elétrons criados quando estabelecida uma alta diferença de potencial entre dois eletrodos.



Figura 5: Fotografia de raio-X tirada por Roentgen em 22 de dezembro de 1895, que mostra a mão de sua esposa. Fonte: [4]

emitiam radiação por si só, mesmo quando mantidos no escuro [23].

Posteriormente à descoberta de Becquerel, o casal Pierre Curie e Marie Curie começaram a estudar a radioatividade de alguns elementos e descobrem o elemento polônio e o rádio. Marie também descobriu o elemento tório, que era tão radioativo quanto o urânio, ambos de pesos atômicos grandes. Tal característica torna o núcleo instável pois as forças nucleares de curto alcance não são capazes de compensar a repulsão coulombiana entre os prótons.

O estudo da radiação e da natureza da radioatividade de alguns elementos foi elucidado por muitos cientistas que tomaram interesse pela área, dentre eles, Ernest Rutherford. O cientista investigou a absorção da radiação proveniente do urânio pelo alumínio e concluiu que havia pelo menos dois tipos de radiação diferentes: uma absorvida rapidamente, a qual nomeou de α e a outra, de caráter mais penetrante, chamada de β . Notoriamente, o que se seguiu foram experimentos para observar o comportamento dessas radiações com a presença de campo magnético.

Foi demonstrado por Rutherford, em 1902, que as partículas α podiam ser desviadas por um campo magnético muito forte e eram constituídas de carga positiva [24]. Com o passar dos anos, finalmente com a medida da relação carga/massa das partículas α , determinou-se que elas são núcleos de hélio⁶. Já as partículas β , eram facilmente desviadas na presença de um campo magnético, idêntico ao comportamento dos raios catódicos. Portanto, tratava-se de elétrons. Em 1900, o físico francês Paul Ulrich Villard, descobriu outra forma de radiação, que não apresentava carga elétrica, semelhante aos raios-X mas com poder de penetração maior, a qual deu o nome de radiação gama.

⁶Composto de dois prótons e dois nêutrons.

A emissão de radiação por meio destes materiais radioativos acontece através do decaimento nuclear exemplificado pela figura 6. Ele ocorre, pois alguns núcleos são instáveis e tendem a liberar energia na forma de radiação a fim de se tornarem estáveis. Os mecanismos de emissão de radiação são, por exemplo, por decaimento alfa, em que o núcleo instável emite uma partícula alfa, reduzindo o número atômico original em 2 e o número de massa em 4. Já o decaimento beta ocorre com a emissão de elétrons ou pósitrons e o decaimento gama é dado pela emissão de fótons (raios-gama).

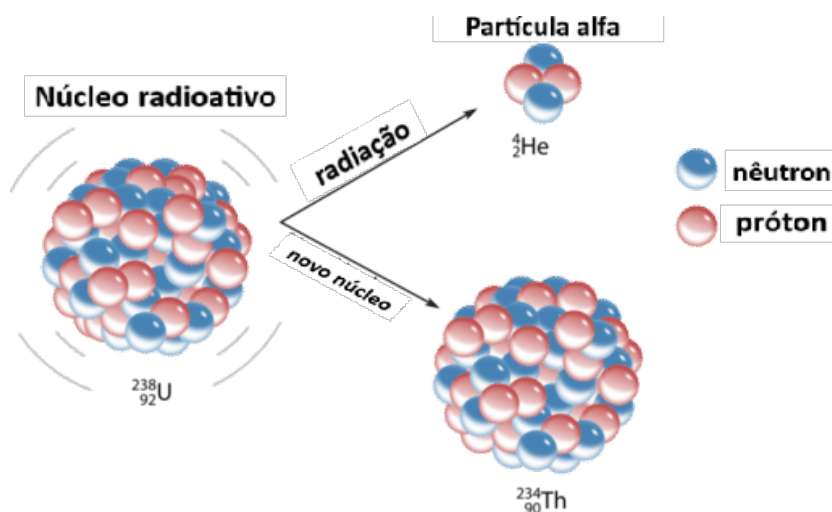


Figura 6: Figura representativa de um decaimento alfa. Fonte: adaptada [5].

Um exemplo de material radioativo é a camisa de lampião, um dispositivo usado em lampiões que intensificam a luz quando o gás é queimado. Tradicionalmente, muitas delas continham o elemento Tório, mencionado anteriormente. Tal elemento é radioativo e geralmente era utilizado na forma de dióxido de tório (ThO_2). O tório emite partículas alfa e uma pequena quantidade de radiação gama; as partículas alfa emitidas pelo tório têm um alcance curto e não penetram a pele humana, no entanto, oferece perigo à saúde se seu pó for inalado ou ingerido. O processo de decaimento do tório-232 é parte de uma série de decaimentos que levam a um isótopo estável de chumbo-208. O decaimento principal é dado a seguir, pela equação (4):



A camisa de lampião pode ser, portanto, utilizada para a observação da radiação através de aparatos experimentais como a câmara de nuvens que será descrita nas seções a seguir 3.3.

Outros materiais radioativos podem ser utilizados para este mesmo objetivo. O minério de Urânio é um deles. Conforme descrito anteriormente, materiais radioativos emitem partículas através do processo de decaimento radioativo, o que torna possível a visualização direta deste mecanismo com detectores de partículas.

O Urânio-238, o isótopo mais comum do urânio, segue uma cadeia de decaimento que

passa pelo tório, protactínio e rádio até o chumbo-206 que é estável. O decaimento do urânio e seus produtos gera radiação alfa, beta e gama. Como a meia-vida do urânio-238 é longa (cerca de 4,5 bilhões de anos), ele emite uma quantidade pequena de radiação em curtos períodos de tempo. Todavia, como há muitos átomos em uma amostra, a emissão de radiação é contínua e pode ser detectada com instrumentos adequados.

3.3 Breve contextualização

Foi no início do século XX que os cientistas observaram a presença de radiação vinda do espaço e, a partir disto, realizaram uma série de experimentos a fim de determinar suas causas. Até o século XIX, era conhecido que havia uma certa quantidade de radiação na Terra, e acreditava-se que ela era proveniente somente da crosta terrestre. Entretanto, ao medir a radiação em altitudes grandes, perceberam que ela aumentava ao invés de diminuir [25]. Isso não atendia às expectativas de que quanto mais longe da superfície terrestre, menos radiação seria medida, pois ela seria absorvida pelo ar.

Logo, perceberam que havia ali uma radiação ionizante externa, advinda de algum emissor de radiação fora de nosso planeta, a qual chamaram de radiação ultra-penetrante (por atravessar grandes quantidades de matéria). Experimentos e observações feitas sobre a radiação renderam ao físico austríaco Viktor Hess o prêmio Nobel em 1936 [26] pela descoberta da radiação cósmica e o termo “raios cósmicos” foi cunhado por Robert Millikan após confirmar os resultados de Hess. A descoberta dos raios cósmicos foi um importante marco para a compreensão do universo e da física de altas energias.

Sabe-se hoje que os raios cósmicos são partículas de alta energia que constantemente bombardeiam a Terra. Majoritariamente são constituídos de prótons e, quando adentram a atmosfera terrestre, chocam-se com as partículas nela presentes, formando um chuveiro de partículas secundárias, como os múons. A fim de detectar essas partículas, são utilizados atualmente os detectores de partículas que tiveram como sua pioneira a câmara de nuvens, criada por Charles Rees Wilson.

Em 1911, o físico escocês C. R. Wilson, pesquisador do laboratório Cavendish, interessado na maneira como o fenômeno atmosférico das “glórias” acontecia, tentou reproduzi-lo em laboratório. Durante uma viagem ao observatório de Ben Nevis na Escócia, em 1894, o físico observou o fenômeno óptico das glórias e ficou fascinado por estes anéis coloridos que se formavam ao redor da sombra de um objeto projetado sobre uma nuvem (figura 7). A fim de entender melhor a física por trás do fenômeno, ele começou a trabalhar em um dispositivo capaz de reproduzir as glórias no ambiente controlado do laboratório [27]. Posteriormente, o experimento evoluiu para um aparato capaz de detectar partículas, conhecido por câmara de nuvens – o primeiro detector de partículas da história.

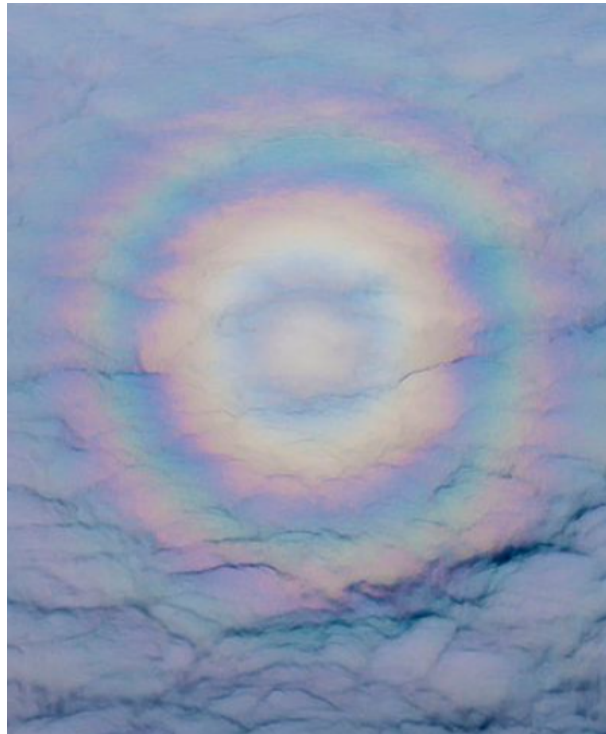


Figura 7: Imagem do fenômeno atmosférico chamado glória ou *brocken spectre*. Fonte: [6]

3.4 Câmara de Nuvens de Wilson e de Difusão

Câmara de Nuvens de Wilson

A câmara de nuvem de Wilson foi construída originalmente em 1911, e permitia a visualização do rastro de partículas subatômicas. O aparato era constituído de materiais básicos disponíveis na época, como: recipiente de vidro, pistão, água ou álcool e iluminação; dispostos da maneira representada na imagem (figura [8]).



Figura 8: Imagem do aparato experimental de Wilson: a câmara de nuvens. Fonte: [7]

O princípio de funcionamento da câmara baseia-se na obtenção de um meta-estado de

vapor de álcool, ou seja, deve-se atingir um ambiente supersaturado⁷ através da expansão rápida do vapor de álcool para que ele fique prestes a condensar dentro da câmara. Essa rápida expansão era gerada por meio de um pistão ou pela liberação de um volume de gás comprimido, que, conseqüentemente, resfriava o ambiente, gerando a supersaturação do vapor de álcool. Feito isso, quando uma partícula carregada atravessasse a câmara, ela ionizaria as moléculas do gás, fazendo com que as partículas de álcool condensassem ao longo da passagem, o que tornaria as trilhas visíveis a olho nu.

Tendo construído o aparato, resultado de um experimento para a formação de glórias, Wilson manteve como objetivo principal analisar os rastros deixados por partículas alfa, beta e raios X. Quanto às partículas alfa, ele utilizou uma fonte de rádio ($^{226}_{88}\text{Ra}$) introduzida na câmara por meio de uma ponta de arame. Devido a sua alta carga e velocidade baixa, as partículas alfa produziram traços fortes, grossos, retilíneos e de curto alcance, como sugere a fotografia obtida por Wilson (figura 9).



Figura 9: Fotografia da detecção de partículas alfa na câmara de nuvens [8].

Desta forma, foi possível detectar a trajetória das partículas alfa que são emitidas pela fonte de rádio introduzida. Isso é possível pois através de um decaimento alfa, um átomo de rádio emite uma partícula alfa e se transforma em um isótopo do elemento radônio, conforme a equação de decaimento a seguir:



As partículas beta, em comparação, produziram rastros menos espessos e com mais deflexões. Isso ocorre devido aos elétrons terem massa menor que as partículas alfa, sendo mais facilmente desviados por interações com o meio, o que causa esses traços característicos observados na fotografia de Wilson (figura 10).

⁷O estado supersaturado é obtido quando o vapor de álcool está na iminência de condensar, basta uma perturbação, como a passagem de partículas por ele, para que a condensação ocorra.



Figura 10: Fotografia da detecção de partículas beta na câmara de nuvens [9].

Para o caso dos raios X, Wilson logrou detectar suas trajetórias indiretamente, através da ionização que eles produziam no gás dentro da câmara. Os elétrons e íons resultantes desta interação funcionam como núcleos de condensação para o vapor supersaturado, formando gotículas ao longo das trilhas de ionização que são visíveis a olho nu, conforme a fotografia a seguir (figura 11).

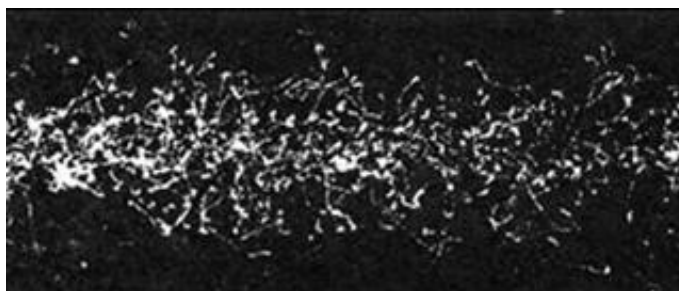


Figura 11: Fotografia da detecção indireta da trajetória de raios-X na câmara de nuvens [9].

Câmara de Difusão

A câmara de difusão foi desenvolvida pelo físico americano Alexander Langsdorf Jr. no início da década de 1930. Ele notou que a câmara de Wilson permitia a observação das trajetórias apenas durante breves períodos de tempo após a expansão do vapor. Dessa forma, interessado em aumentar o tempo de exposição das trajetórias, criou um ambiente onde o vapor supersaturado pudesse ser mantido continuamente.

Tendo o mesmo princípio da câmara de nuvens, a câmara de difusão tem como objetivo detectar o rastro partículas através de um recipiente fechado cujo interior é preenchido por um gás supersaturado. No entanto, ao contrário da câmara de nuvens de Wilson, a câmara de difusão opera utilizando outro mecanismo de resfriamento, o gelo seco [8]. O aparato conta com um recipiente cuja base é mantida a temperatura muito baixa, enquanto a parte superior é relativamente quente. O álcool é evaporado na parte superior

⁸Dióxido de carbono sólido à temperatura de aproximadamente $-78,5^{\circ}\text{C}$.

e quando desce pelo recipiente, encontra baixas temperaturas do gelo seco, criando uma camada de vapor supersaturado. Quando uma partícula ionizante atravessa a câmara, ela ioniza as moléculas de vapor e causa sua condensação ao redor dos íons, o que deixa o rastro visível [28].

3.5 Origens dos raios cósmicos

De acordo com a seção 3.3, tendo em vista que os raios cósmicos teriam origem fora da Terra, cientistas começaram a questionar quais as possíveis fontes geradoras destas partículas. Dentre elas, sabe-se hoje que o Sol, galáxias com núcleos ativos, remanescentes de supernovas e estrelas de nêutrons estão entre as principais fontes de raios cósmicos. Cada uma destas fontes acelera partículas com diferentes energias; desde 10^9 eV (raios cósmicos solares) a energias de 10^{19} eV (raios cósmicos acelerados por pulsares). Entretanto, continua sendo um mistério as possíveis fontes astrofísicas de raios cósmicos de altas energias (UHECR), cujo máximo valor de energia registrado foi de 3×10^{20} eV [29].

Nossa galáxia, a Via Láctea, é composta de aproximadamente 10^{11} estrelas, cada uma com suas peculiaridades: algumas são gigantes vermelhas, outras são anãs brancas, anãs vermelhas, anãs marrons, entre outras. Todas estão neste aglomerado de gás e poeira no qual são formadas estrelas novas e estrelas mais velhas terminam suas vidas em grandes explosões de supernovas que podem culminar na criação de estrelas de nêutrons ou buracos negros. A supernova libera enormes quantidades de energia, visto que, durante a explosão da estrela ao fim de sua vida, partículas são aceleradas, como prótons, elétrons, núcleos atômicos próximos à velocidade da luz e emitidas pelo espaço.

No decorrer desta viagem, as partículas sofrem desvios, mas eventualmente algumas delas chegam à Terra. Quando colidem com a atmosfera terrestre, produzem uma cascata de partículas secundárias, incluindo múons, píons, e outras partículas subatômicas que fazem parte deste chamado chuveiro de partículas. Apenas uma pequena parte chega à superfície e suas energias são atenuadas pela atmosfera, não causando danos à saúde humana. Existem diversos experimentos e observações de raios cósmicos que almejam o melhor entendimento de processos astrofísicos como supernovas e outros mecanismos de alta energia.

Um caso famoso é o estudo da Nebulosa do Caranguejo (figura 12), um remanescente de supernova associada a uma explosão estelar ocorrida em 1054. A nebulosa está na constelação de Touro, a aproximadamente 6500 anos-luz da Terra e foi catalogada por John Bevis em 1731; posteriormente foi nomeada de M1 em 1758 por Charles Messier. Em seu centro, ela abriga um pulsar⁹ em que emissões de raios gama e raios-X foram detectados pela primeira vez, num espectro de energia de 0,8 – 30 TeV [30].

Os remanescentes de supernovas (SNRs) como a Nebulosa do Caranguejo, são exemplos

⁹Conforme a estrela original explodiu, seu núcleo colapsou formando uma estrela de nêutrons, que é o pulsar.

de fontes de raios cósmicos. A interação do pulsar com o gás que o cerca acelera partículas a altas energias, produzindo os raios. Ademais, serve como uma fonte significativa de radiação síncrotron, que ocorre quando os elétrons são acelerados em campos magnéticos, emitindo radiação em diversas frequências.

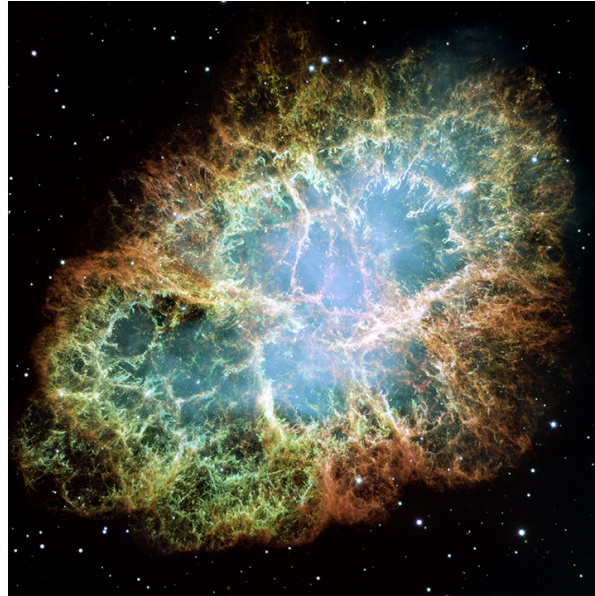


Figura 12: Nebulosa do Caranguejo, um remanescente de supernova fonte de raios cósmicos na Via Láctea [10].

Raios cósmicos solares (SCR)

O Sol também é uma fonte de raios cósmicos que são acelerados durante eventos de atividade solar como erupções solares e ejeções de massa coronal¹⁰. Nessas ocorrências, a intensidade de partículas energéticas no espaço pode aumentar por um fator de 10^2 ou até 10^6 . Através de experimentos indiretos, determinou-se que o Sol é responsável por gerar um fluxo de entrada constante de partículas na atmosfera terrestre, denominadas de raios cósmicos solares (SCR - *Solar Cosmic Rays*).

Nosso Sol é a principal fonte de energia da Terra e a variação no fluxo de energia é causada pela variação do ciclo de atividade solar. Atividade magnética gera flutuações e turbulência na superfície do Sol e um indicador destas atividades solares são as manchas que aparecem na estrela de tempos em tempos. As partículas de raios cósmicos chegam à Terra com velocidades próximas a da luz e colidem com a atmosfera terrestre formando íons secundários. Estes íons, por sua vez, servem como núcleos de condensação para o aumento da taxa de nuvens formadas em altitudes de 12-15 km. Consequentemente, essa formação de nuvens afeta a quantidade de radiação solar que chega à Terra, de maneira a contribuir para o controle climático.

¹⁰Fenômeno em que uma grande quantidade de partículas carregadas é lançada da camada externa do Sol (coroa solar) para o espaço.

O número de raios cósmicos galácticos que atingem a Terra está relacionado à constante solar, que é o fluxo total da radiação emitida pelo Sol em todos os comprimentos de onda antes chegar à atmosfera terrestre [11]; e está relacionado também ao ciclo solar, que incluem períodos de alta e baixa atividade solar que duram 11 anos. Durante períodos de alta atividade solar, o campo magnético solar se torna forte, se estendendo para fora do Sol. Como consequência, é formada a heliosfera, a qual atua como proteção contra os raios cósmicos galácticos [11], desviando-os e impedindo-os de chegar à Terra.

O aumento da constante solar indica aumento na atividade solar e do número de manchas solares, no entanto, aponta para uma redução nos raios cósmicos galácticos. Embora a atividade solar esteja em seu pico e isso signifique um aumento na produção de raios cósmicos solares, eles são de baixa energia e o efeito dominante é, portanto, a redução dos raios cósmicos galácticos de altas energias que atingem a Terra. Estudos feitos a partir de observatórios que monitoram o fluxo de raios cósmicos, mostram, conforme a figura 13 uma diminuição dos raios cósmicos galácticos durante o máximo solar e um aumento durante o mínimo solar.

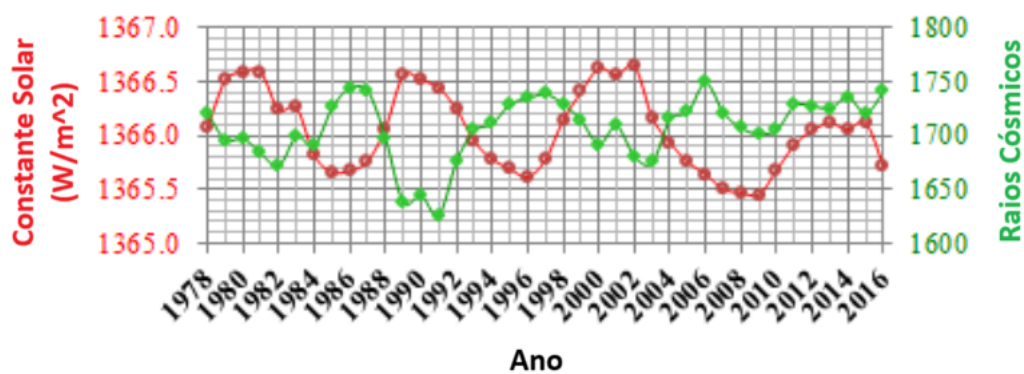


Figura 13: Relação entre a constante solar e os raios cósmicos: adaptada [11]

A energia dos SCR representa uma pequena porcentagem do espectro de energia medida nos raios cósmicos, não ultrapassando de 10^9 eV. Acima deste valor, o Sol não é mais considerado fonte destas partículas.

Raios cósmicos de galáxias de núcleos ativos (AGN)

Segundo dados observacionais, um ótimo candidato de fonte de UHECRs são os núcleos ativos de galáxias (AGNs), que são regiões compactas no centro de galáxias onde ocorre a liberação de grandes quantidades de energia. Acredita-se que a maioria dos AGNs contenha um buraco negro supermassivo, o qual, por sua vez, conta com a presença de matéria em movimento orbital ao seu redor (disco de acreção). O disco emite grandes quantidades de radiação devido ao intenso calor gerado pela fricção e partículas podem ser aceleradas por campos magnéticos que resultam em jatos de partículas aceleradas (figura 14).

¹¹Raios cósmicos que têm origem fora do Sistema Solar, mas ainda dentro da Via Láctea.

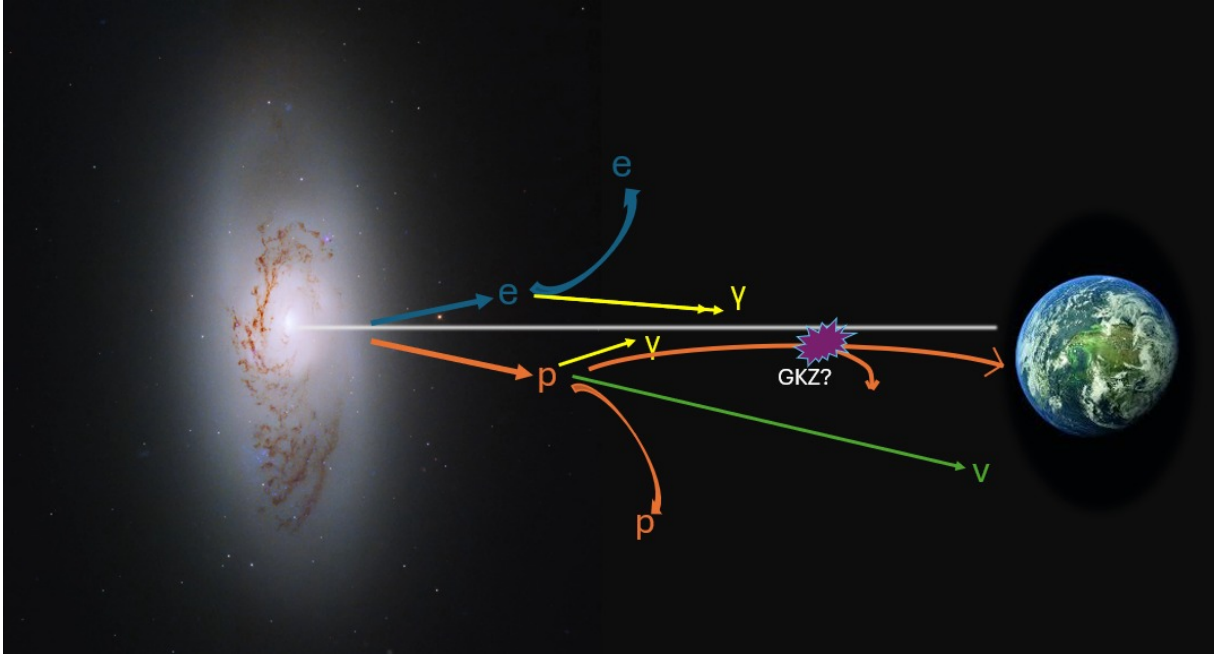


Figura 14: Figura representativa de um AGN e seu jato de partículas aceleradas em direção à Terra. Fonte: autora.

Informações coletadas por observatórios como o Observatório Pierre Auger [31], mostram que raios cósmicos de altas energias chegam à Terra de direções que correspondem a locais já conhecidos de AGNs. Apenas fontes distantes da Terra em aproximadamente 200 Mpc [12] trazem contribuições para o fluxo de raios cósmicos observados com energias acima de 10^{19} eV. Prótons e outras partículas com energia acima deste valor interagem com a radiação cósmica de fundo e têm seu fluxo atenuado, fenômeno chamado de efeito GKZ, que será discutido na seção 3.8.

Essas partículas aceleradas em AGNs podem atingir energias altas da ordem de 10^{19} eV, tornando-os algumas das fontes mais energéticas de raios cósmicos existentes no universo.

Raios cósmicos de pulsares

Pulsares são estrelas de nêutrons magnetizadas que rotacionam muito rapidamente. Elas, por sua vez, resultam do colapso de estrelas massivas após uma supernova e são compostas quase inteiramente de nêutrons, como sugere o nome, com uma densidade muito alta. Seu raio é cerca de 10 a 20 km e sua massa é aproximadamente 1,4 vezes a massa do Sol [32]. Os mecanismos de aceleração incluem: aceleração direta, ondas de choque e radiação síncrotron e curvatura, discutidas posteriormente na seção 3.6.

Os pulsares possuem campos magnéticos que podem ser bilhões de vezes mais fortes que o da Terra; esses campos magnéticos intensos são capazes de acelerar partículas carregadas a velocidades próximas à velocidade da luz. Alguns pulsares giram muito rapidamente, cerca de centenas de vezes por segundo, e esse movimento de seu campo

¹²1 megaparsec equivale a 3.260.000 anos-luz.

magnético faz com que sejam gerados campos elétricos intensos que aceleram partículas a energias extremamente altas (figura [15](#)).

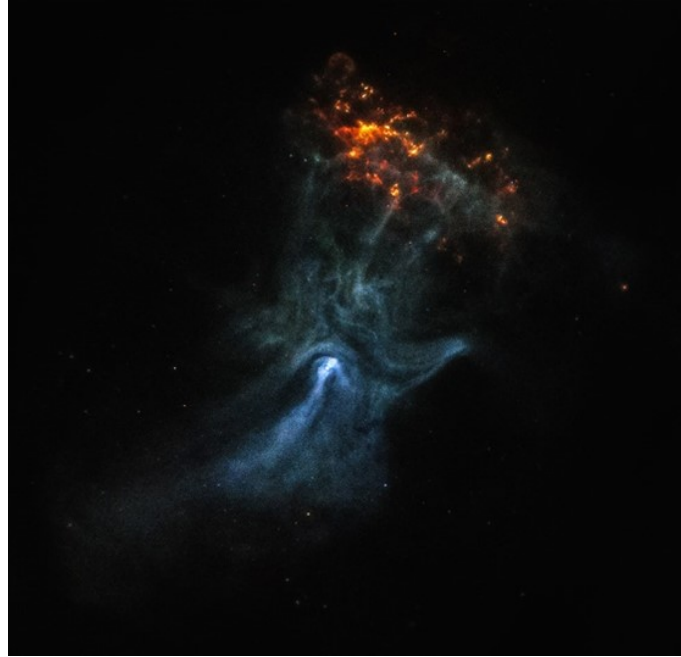


Figura 15: Imagem do pulsar PSR B1509-58 e a sua nebulosa de vento MSH 15-52 a 16.000 anos-luz da Terra [\[12\]](#).

Prótons, elétrons e núcleos pesados podem escapar dos pulsares e viajar pelo espaço. Os pulsares emitem feixes de radiação detectados como pulsos regulares, esses feixes varrem o espaço à medida que o pulsar gira. Desta forma, alguns podem chegar até a Terra, caso estiverem alinhados com ela, e formar chuvas de partículas secundárias que podem ser detectadas por equipamentos científicos. A energia dos UHECR provenientes de pulsares está em torno de 10^{15} até 10^{18} eV [\[33\]](#).

3.6 Aceleração dos raios cósmicos

Após os raios cósmicos serem ejetados pelas suas fontes, eles viajam pelo meio interestelar e nesse percurso sofrem desvios até chegar ao destino final, que pode ser a Terra. Nesta seção, serão discutidos os meios pelos quais essas partículas são aceleradas nesta longa trajetória.

Alguns dos mecanismos de aceleração ainda são desconhecidos, entretanto, modelos foram criados a fim de corresponder aos dados obtidos. Dentre eles: aceleração direta, aceleração estatística, modelo de Fermi, curvatura, frentes de choque, entre outros.

Basicamente, pode-se classificar as acelerações como sendo de dois tipos: *top-down* e *bottom-up*. Esses modelos nos indicam como as partículas adquirem as energias altas observadas. O primeiro, como o nome sugere, implica que os UHECRs se originam da decomposição de objetos massivos no universo, não dependendo de uma aceleração propriamente dita, pois resultam do decaimento de partículas altamente energéticas.

No entanto, o modelo *top-down* não é amplamente aceito como a principal explicação para a origem dos UHECRs. A maioria das evidências apontam para o modelo *bottom-up*. Este, por sua vez, sugere que as partículas são aceleradas gradualmente a partir de energias mais baixas. Dentro deste modelo, tem-se a aceleração direta e a estocástica, ambas pertencentes ao mecanismo de Fermi.

Aceleração de Fermi de Primeira Ordem

Também chamada de aceleração direta, a aceleração de Fermi de primeira ordem acontece de forma rápida e devido a campos eletromagnéticos. Geralmente é associada a ondas de choque, onde as partículas são aceleradas repetidamente através da frente de choque.

Um exemplo desse tipo de aceleração é o que acontece em supernovas e AGNs. Quando a estrela no fim de sua vida explode, ela cria uma onda de choque que se propaga pelo meio interestelar. Partículas carregadas transitam por esse meio eletromagnético turbulento e ganham energia quando atravessam uma frente de choque da supernova.

A expressão geral da aceleração de uma partícula carregada em um campo eletromagnético é dada pela equação (5), que é obtida a partir da equação de Lorentz:

$$\frac{d}{dt}(\gamma m \mathbf{v}) = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (5)$$

em que γ é o fator de Lorentz, com c sendo a velocidade da luz, m a massa, v a velocidade e q a carga da partícula. $\mathbf{B}$ e $\mathbf{E}$ são o campo magnético e elétrico, respectivamente.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6)$$

Considerando um campo magnético variante, como ocorre na maioria dos cenários astrofísicos, o campo elétrico induzido realiza trabalho, portanto, temos a expressão para o trabalho (W) descrita por (7):

$$W = \int q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l}. \quad (7)$$

No entanto, a segunda parte do lado direito da igualdade da equação acima cai no caso $\vec{A} \cdot (\vec{A} \times \vec{B}) = 0$, o que resulta em (8):

$$W = q \int (\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}). \quad (8)$$

Por sua vez, podemos utilizar a lei de Faraday na sua forma integral, em que o fluxo de campos magnéticos variantes no tempo induzem campos elétricos (9):

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (9)$$

O trabalho realizado sobre a partícula resulta em uma mudança de energia desta, visto que $W = -\Delta\epsilon_c$. Logo, o ganho de energia da partícula, ao ser deslocada pelo campo elétrico é dado pela equação (10):

$$\Delta\epsilon_c = -q \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -q \left(-\frac{d\Phi_B}{dt} \right). \quad (10)$$

Um exemplo a ser descrito é o de partículas sendo aceleradas no Sol pelas suas manchas [34]. Uma mancha solar é uma região no Sol onde a temperatura é um pouco mais baixa. São locais mais escuros devido ao fato de a energia térmica ter sido transformada em energia magnética. Estrelas como esta tem seus campos magnéticos da ordem de 1000 Gauss [13].

Considerando uma mancha solar de raio R e área $A = \pi R^2$ e uma partícula que gira ao seu redor com velocidade $\mathbf{v}$ e carga q , podemos calcular seu ganho de energia com as equações apresentadas anteriormente.

Portanto, o ganho de energia pode ser escrito por (11):

$$\Delta\epsilon_c = q \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (11)$$

Como o fluxo de campo magnético é $\Phi_B = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$, resulta em:

$$\Delta\epsilon_c = q \frac{d}{dt} \left(\int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \right), \quad (12)$$

$$\Delta\epsilon_c = q \frac{\partial}{\partial t} \left(\mathbf{B} \int_s \hat{n} \cdot d\mathbf{S} \right), \quad (13)$$

$$\Delta\epsilon_c = q \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{B}A) = q\pi R^2 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (14)$$

Aceleração de Fermi de Segunda Ordem

A aceleração de Fermi de segunda ordem, também conhecida como aceleração estocástica, consiste em um processo de ganho de energia através de diversas interações estocásticas com ondas de choque ou nuvens magnéticas [14].

As colisões acontecem aleatoriamente e as partículas podem ganhar ou perder energia com isso. No entanto, o ganho médio é positivo e proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre as partículas e as nuvens/ondas, conforme a equação (15), em que E é a energia e V a velocidade da onda,

$$\Delta E = \left(\frac{V}{c} \right)^2 E. \quad (15)$$

¹³1 Tesla equivale a 10^4 Gauss.

¹⁴Nuvens extensas de gás que são criadas por irregularidades em campos magnéticos com as quais as partículas interagem durante a propagação pelo meio interestelar.

Todavia, a equação acima refere-se apenas ao ganho de energia em uma única interação. Já a taxa média do ganho de energia por tempo é dada pela equação (16), em que β é uma constante dependente da frequência das interações e de suas eficácias,

$$\frac{dE}{dt} = \beta \left(\frac{V}{c} \right)^2 E. \quad (16)$$

Curvatura

A aceleração de curvatura ocorre quando as partículas carregadas movem-se ao longo de linhas de campo magnético curvadas, ganhando energia. Situações astrofísicas capazes de realizarem estas acelerações contam com um campo magnético bastante intenso, como é o caso dos pulsares ou estrelas de nêutrons.

Quando os pulsares são formados, durante o colapso gravitacional, o momento angular da estrela é conservado e seu tamanho é reduzido drasticamente. Consequentemente, os pulsares têm períodos de rotação extremamente curtos, conforme discutido anteriormente. Ademais, o colapso gravitacional da estrela faz com que a intensidade do campo magnético seja aumentada. Isso fica evidente quando consideramos a conservação do fluxo magnético na equação (17), em que $B_{estrela}$ é o campo magnético da estrela e B_{pulsar} é o campo magnético do pulsar; $A_{estrela}$, A_{pulsar} , $R_{estrela}$ e R_{pulsar} são as áreas e os raios da estrela e do pulsar, respectivamente.

$$\int_{estrela} B_{estrela} \cdot dS_{estrela} = \int_{pulsar} B_{pulsar} \cdot dS_{pulsar}, \quad (17)$$

$$B_{estrela} A_{estrela} = B_{pulsar} A_{pulsar}, \quad (18)$$

$$B_{pulsar} = \frac{B_{estrela} \pi R_{estrela}^2}{\pi R_{pulsar}^2}, \quad (19)$$

$$B_{pulsar} = B_{estrela} \frac{R_{estrela}^2}{R_{pulsar}^2}. \quad (20)$$

Portanto, a partir da equação (20), nota-se que o campo magnético do pulsar é inversamente proporcional a seu raio. Logo, tem seu valor aumentado devido ao tamanho reduzido do pulsar. Para estrelas de campos magnéticos de 1000 Gauss, campos de pulsares de $2,5 \times 10^{12}$ Gauss são obtidos [34].

A rotação rápida do pulsar gera uma velocidade de rotação $\mathbf{v}$ dada por (21) ao longo da superfície da estrela de nêutrons, com T sendo o período. A interação dessa velocidade com o campo magnético intenso induz um campo elétrico forte que acelera partículas carregadas à altas energias.

$$v = \frac{2\pi R_{pulsar}}{T}. \quad (21)$$

Portanto, essa rotação rápida, aliada com o campo magnético forte, cria uma força eletromagnética intensa ao longo de sua superfície, que gera um ambiente ideal para acelerar as partículas a altas energias. Por sua vez, essas partículas podem escapar para o espaço e se tornar os UHECRs que detectamos na Terra.

3.7 Relação carga/massa (q/m)

A fim de estabelecer a relação carga/massa das partículas carregadas que atravessam a câmara de nuvens, deve-se colocar um campo magnético uniforme ao redor do aparato experimental. Quando a partícula carregada entra nesse campo, atua sobre ela uma força de Lorentz que a faz se mover em uma trajetória curva.

A curvatura depende da velocidade da partícula $\mathbf{v}$, e da intensidade do campo $\mathbf{B}$. Através de capturas de imagem e vídeo da câmara, pode-se, na escala adequada, obter uma aproximação da velocidade $\mathbf{v}$ fazendo a razão de espaço percorrido pelo tempo.

A força de Lorentz é descrita pela equação (22):

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (22)$$

Considerando que $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$, temos:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + qv\mathbf{B}. \quad (23)$$

O termo $q\mathbf{E}$ é omitido pois ele é nulo ou negligenciável devido ao interesse em observar apenas a influência do campo magnético na trajetória das partículas. Igualando este resultado à força centrípeta em que R é o raio da trajetória:

$$qvB = \frac{mv^2}{R}. \quad (24)$$

Rearranjando para encontrar q/m , chega-se na equação (25):

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR}. \quad (25)$$

3.8 Mecanismos de desaceleração

Corte GKZ

A Radiação Cósmica de Fundo (CMB) foi descoberta em 1965 e trata-se de uma radiação consequente do Big Bang. Ela é uma radiação de microondas que preenche todo o Universo com uma temperatura média de 2,7 Kelvin atualmente (-270,45 graus Celsius) [13].

Logo após o Big Bang, o Universo era um grande conjunto de partículas fundamentais como os quarks e elétrons num estado de alta energia e num meio denso e quente. Conforme o Universo se expandia e se esfriava, elétrons e prótons começaram a formar

átomos de hidrogênio. Com isso, o ambiente se tornou mais "transparente" e permitiu que a radiação, antes dispersa, pudesse viajar livremente sem ser reabsorvida ou reemitida por partículas.

Desde então, a radiação tem se espalhado pelo Universo todo, conforme o a expansão vai ocorrendo, a radiação vai se esfriando e sua frequência foi esticada para o comprimento de onda de microondas. Por isso, a CMB nada mais é do que uma "imagem" do Universo primordial (figura 16).

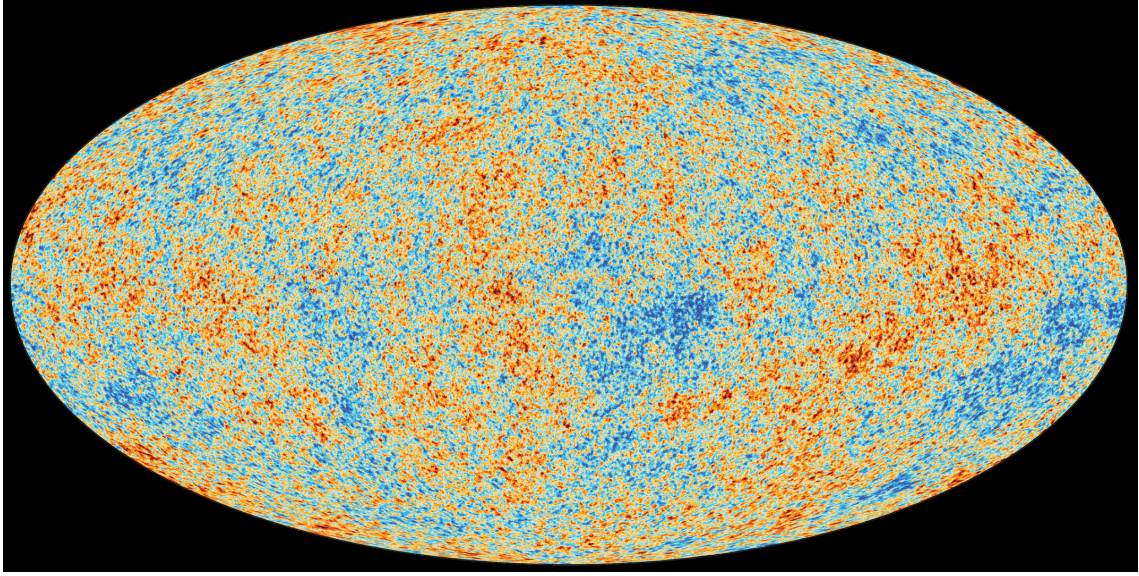


Figura 16: Radiação Cósmica de Fundo (CMB) [13].

A CMB é bastante uniforme, tendo apenas pequenas flutuações de temperatura em algumas regiões, o que fornece informações sobre a estrutura inicial do Universo e a formação de galáxias. Seu espectro segue o de um corpo negro, ou seja, sua distribuição de energia é consistente com a radiação térmica de um corpo a uma temperatura de 2,7 K.

Partículas como os raios cósmicos, que têm energias acima de $5 \times 10^{19} \text{ eV}$, perdem energia ao interagir com a CMB, o que os impede de propagar por longas distâncias. Por exemplo, quando um próton colide com um fóton da CMB, são produzidos píons, conforme a equação (26) abaixo:

$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow \Delta \rightarrow N + \pi. \quad (26)$$

Portanto, o próton (p) ao interagir com o fóton γ da CMB, gera uma partícula intermediária (Δ) [15] que, por sua vez, gera um núcleon (próton ou nêutron) e um pión. Outro processo da interação de um próton com um fóton da CMB é o da produção do par elétron pósitron. No entanto a perda de energia nesta interação da equação (27) é menor.

¹⁵Ressonância delta são partículas que são estados excitados de outras partículas e são formadas por 3 quarks. Têm vida média da ordem de 10^{-23} s .

$$p + \gamma_{CMB} \rightarrow e^+ + e^-. \quad (27)$$

Devido a estas interações, é previsto que os raios cósmicos sofram uma perda significativa de energia, de cerca de $6 \times 10^{19} eV$ [35] o que torna improvável a observação de raios cósmicos com energias acima deste valor. A isso se dá o nome de corte GKZ, em homenagem aos cientistas Greisen-Zatsepin-Kuzmin, que estabeleceram que as partículas de alta energia têm sua propagação a longas distâncias restringida por conta do CMB.

Consequentemente, o número de raios cósmicos de alta energia (UHECR) diminui drasticamente após uma certa distância. Para partículas de altas energias, acima do corte GKZ, os detectores mais comuns são os de grandes instalações como o Observatório Pierre Auger, na Argentina, que analisa eventos raros e muito energéticos.

4 Materiais e metodologia

Nesta seção, serão descritos os materiais utilizados e metodologia para a construção da câmara de nuvens de Wilson e da câmara de nuvens por difusão, cujo objetivo é detectar partículas através da visualização dos traços de suas trajetórias, e assim, inferir características como sua relação carga/massa por meio do campo magnético inserido.

4.1 Materiais

Câmara de Nuvens de Wilson

- **Câmara**
 - Dimensões: $12 \times 12 \times 8$ cm
 - Material: acrílico transparente
- **Álcool isopropílico (C_3H_8O)**
 - Concentração: 99%
 - Quantidade: 10 ml
- **Fonte de partícula ionizante**
 - Tipo: minério de Urânio
 - Atividade: $10 \mu Sv^{16}$
- **Bomba de descompressão**
- **Cola quente**
- **Botijão de extintor de automóvel**
- **Adaptador T de PVC 1/2"**
- **Registro 1/2"**
- **Niple PVC**
 - Tamanho: 1/2"
 - Quantidade: 4
- **Válvula de ar**
- **Tampão de rosca 1/2"**
- **Fonte de luz LED**
 - Intensidade: 500 lumens
- **Vedação**
 - Fita veda rosca
- **Bobinas de Helmholtz**
 - Intensidade: 10 mT
- **Câmera Sony V1000x**
 - fps: 240

¹⁶1 Sievert (Sv) equivale à dose de radiação que causa o mesmo nível de efeito biológico que 1 J de radiação ionizante absorvido por 1 kg de tecido humano.

Câmara de Nuvens de Difusão

- **Interior da câmara**
 - Lata de milho cortada ao meio (diâmetro: 7cm)
 - Bucha de louça
 - Tinta preta
- **Base fria da câmara**
 - Tubo de PVC 16 cm de diâmetro
 - Cooler de Computador (trocador de calor)
 - Isopor
- **Nitrogênio líquido**
 - Temperatura: -195°C
 - Quantidade: 400 ml
- **Álcool isopropílico ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$)**
 - Concentração: 99%
 - Massa molecular: 60,1 g/mol
- **Fonte de partícula ionizante**
 - Tipo: minério de Urânio
 - Atividade: $10\ \mu\text{Sv}$
- **Câmera Sony V1000x**
 - fps: 240

4.2 Metodologia

Câmara de Nuvens de Wilson

Uma imagem esquemática é mostrada na figura [17](#), ilustrando a disposição experimental.

1. Preparação da câmara

O recipiente deve estar vedado, a fim de garantir que seu ambiente seja mantido estável e bem controlado. Em seu interior, borrija-se o álcool isopropílico. Observação: a câmara deve ser capaz de suportar mudanças na pressão.

2. Expansão Rápida

Utilizando a bomba e a válvula, reduz-se a pressão do interior da câmara, resultando na rápida queda de temperatura, o que leva à condensação do vapor de álcool e a obtenção de um ambiente supersaturado decorrente da expansão adiabática.

3. Iluminação

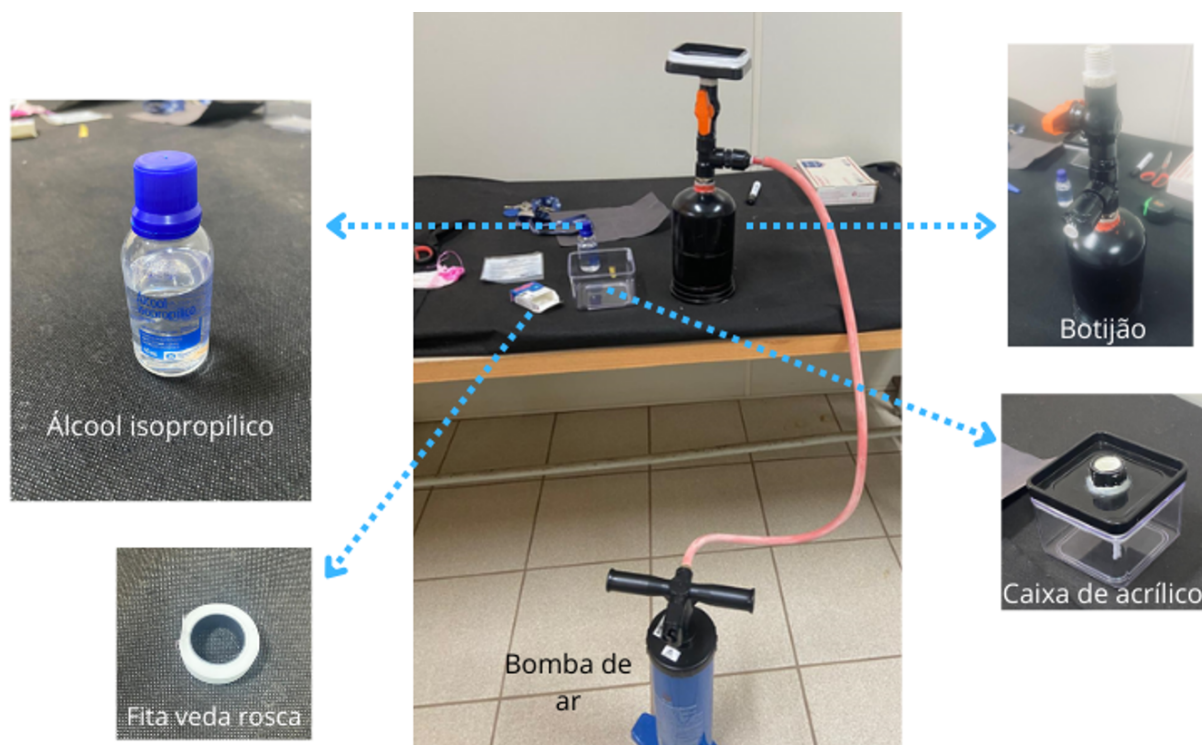


Figura 17: Imagem da montagem experimental da câmara de nuvens.

A fim de observar a trilha das partículas que passam pela câmara, é essencial o uso de fontes de iluminação. Portanto, insere-se uma fita de LED de forma que ela ilumine o interior do recipiente, de preferência nas laterais.

4. Campo Magnético

Inserem-se as bobinas de Helmholtz no exterior da câmara de nuvens, de maneira a criar um campo magnético homogêneo que será capaz de curvar a trajetória da partícula que adentra o recipiente.

5. Material radioativo

Coloca-se o minério de Urânio (figura 18) no interior da câmara de acrílico antes de bombear o ar. Esta etapa auxilia na obtenção de traços mais consistentes, visto que se trata de um material que está, invariavelmente, emitindo radiação. Isto serve de teste para inferir se o estado supersaturado está sendo produzido de fato e se o experimento capta os traços desejados.

6. Observação

Após realizada a montagem da câmara, conforme a figura 19, coloca-se um tripé com a câmera de filmagem em um ângulo que contenha todo o recipiente em vídeo, visto de cima, a fim de capturar a imagem das trilhas de eventuais partículas que passem por ali. Constantemente faz-se a rápida descompressão pela bomba para que não se perca a supersaturação. Por fim, a trajetória curva da partícula é visualizada e gravada pela máquina fotográfica. Posteriormente, a gravação pode ser analisada



Figura 18: Minério de urânio proveniente do Museu de Minerais e Rochas - Departamento de Geologia Unesp - Rio Claro.

em aplicativos de edição de vídeo como o *ShotCut*, a fim de observar o experimento em mais detalhes em câmera lenta.



Figura 19: Imagem final da construção da câmara de nuvens.

Câmara de Nuvens de Difusão

Assim como descrito na seção 3.4, a câmara de nuvens de difusão é baseada na criação de um ambiente supersaturado através da manutenção de uma diferença de temperatura na câmara. Originalmente, esta diferença de temperatura dava-se pela utilização do gelo seco, entretanto, neste trabalho, utilizou-se o nitrogênio líquido como fonte de esfriamento. Independentemente da utilização do gelo seco ou nitrogênio líquido, o objetivo permanece o mesmo: estabelecer uma diferença de temperatura de pelo menos 50°C no interior da câmara, a fim de criar um ambiente que ficará supersaturado com o álcool isopropílico.

1. Preparação da base da câmara

A base da câmara deve estar a uma temperatura muito mais baixa em comparação à parte da câmara onde será colocado o álcool. A base consiste em um recipiente feito com cano PVC de aproximadamente 16 cm de diâmetro fechado em cima e embaixo, na forma de cilindro. No interior deste cilindro, toda sua lateral interna foi revestida com isopor e colocou-se em seu interior um trocador de calor, ou cooler de computador, conforme a figura 20. Estas medidas foram tomadas para manter o recipiente gelado e evitar muita troca de calor com o ambiente externo.



Figura 20: Imagem do cooler de computador utilizado no interior da base da câmara de difusão.

Após a montagem da base, o interior do cilindro é preenchido com nitrogênio líquido até que o recipiente esteja completamente gelado. Mantém-se o recipiente fechado para evitar a troca de calor. Em cima desta base, será colocada a câmara em si, onde será feita a visualização dos traços.

2. Preparação da câmara

Uma lata de milho cortada na metade e pintada de preto foi utilizada como câmara. A pintura da lata auxilia na posterior visualização dos resultados. Em seu interior,

na lateral, foi adicionado um pedaço de bucha de louça embebida em álcool isopropílico e a fonte de radiação (figura 21). Caso houvesse necessidade, a câmara poderia ser fechada com alguma tampa transparente, no entanto, não houve necessidade. Mesmo com a câmara aberta, estabeleceu-se uma alta diferença de temperatura entre a câmara e a base, de forma a se obter o ambiente supersaturado de álcool.

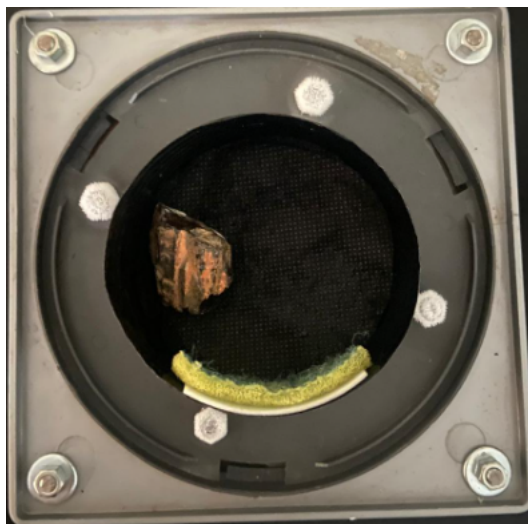


Figura 21: Fotografia da câmara de difusão vista de cima.

3. Iluminação e visualização

Assim como na montagem da câmara de nuvens de Wilson, as imagens e gravações foram feitas com a câmera de 240 fps. E é importante salientar que o uso de uma lanterna ou fita de LED é fundamental para uma boa visualização dos traços formados na câmara além do contraste com o fundo preto. A figura 22 mostra a fotografia da montagem final do experimento.



Figura 22: Imagem da montagem experimental da câmara de nuvens por difusão.

5 Resultados

A fim de visualizar a curvatura de partículas de alta energia, é necessário um campo magnético de muitos tesla. Por exemplo, se considerarmos um elétron de energia $E = 1 \text{ GeV}$ (energia de repouso: $m_e = 0,51 \text{ MeV}$), em um campo magnético $B = 2 \text{ T}$, o raio de curvatura resultante é de 1,7 m. Segue a equação (28) que comprova este resultado:

$$E = \sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2} \approx pc. \quad (28)$$

Logo, $E \approx pc$ para o caso relativístico $m \ll p$. Na equação acima, E é a energia total do elétron, m_e é a massa dele, c , a velocidade da luz, e p o momentum angular. Desta forma, fazendo uso da equação a seguir, chega-se na equação do raio (R) de curvatura (32).

$$R = \frac{mv}{eB} = \frac{p}{eB}, \quad (29)$$

$$ReB = p. \quad (30)$$

Multiplicando ambos os lados pela velocidade da luz (c), temos:

$$pc = eRBe. \quad (31)$$

Como $E = pc$, segue:

$$R = \frac{E}{eBc}. \quad (32)$$

Portanto, a fim de visualizar o raio de curvatura a olho nu, seria de interesse que R tivesse um valor pequeno, o que exigiria um campo magnético de muitos teslas ($B \gg 2T$). Devido a indisponibilidade de um equipamento que gerasse um campo magnético dessa ordem de magnitude (as bobinas de Helmholtz do laboratório geram campos da ordem de mili teslas), a curvatura não foi formada. Os traços visualizados mostraram-se retilíneos devido ao raio ser muito grande.

Câmara de Nuvens de Wilson

A seguir são exibidas imagens dos resultados experimentais da câmara de Wilson. Cada fotografia equivale a aproximadamente 4 milisegundos entre um frame e outro, obtidos das gravações que foram posteriormente colocadas em câmera lenta no aplicativo de edição de vídeo *ShotCut*.

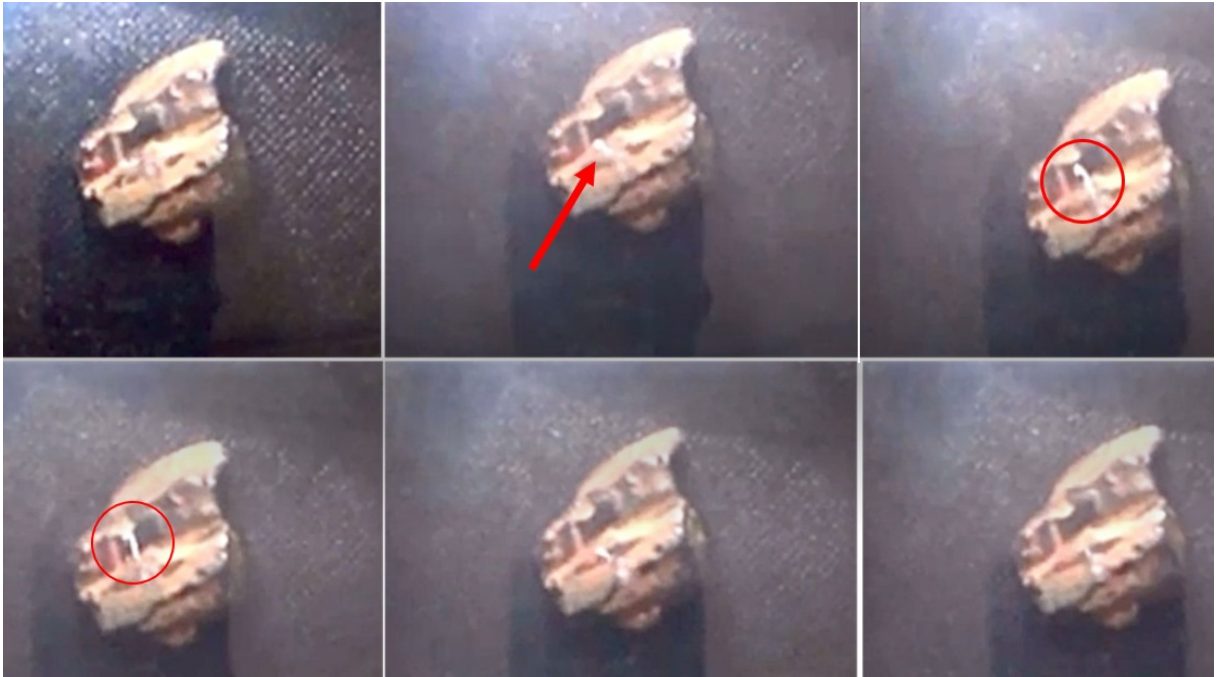


Figura 23: Fotografias com evolução temporal de 1/240 segundos entre elas. Lê-se da esquerda para a direita, de cima para baixo.

A partir da figura 23 percebe-se um ou dois traços retos, curtos e densos. Tais características indicam se tratar de partículas alfa, pois elas possuem uma carga elevada (+2) e maior massa, logo, perdem energia rapidamente ao interagir com o álcool, produzindo trilhas curtas e bem definidas.

Tais resultados são condizentes com o processo de decaimento radioativo do urânio: o urânio-238 emite partícula alfa para formar o Th-234 e seu isótopo menos abundante - o urânio-235 - também sofre decaimento alfa para formar Th-231. O processo de decaimento continua até um elemento estável, no caso, o chumbo.

A visualização de outros tipos de traços, como os provenientes da presença de raios cósmicos, não foi possível. Conforme discutido anteriormente na seção 3.8, a não visualização de traços que não fossem provenientes de material radioativo, pode ser devido ao corte GKZ e processos de desaceleração/ perda de energia das partículas cósmicas. Ademais, o evento mostrou-se bastante efêmero e rápido a ponto de não ser visível a olho nu, apenas com o uso de filmagens em câmera lenta e iluminação adequada.

Câmara de Nuvens de Difusão

Os resultados obtidos com a câmara de difusão (figura 24) foram análogos aos obtidos com a câmara de Wilson comum. Ambas detectaram apenas trajetórias características de partículas alfa saindo do minério de Urânio, ou seja, pequenos traços retilíneos. Todavia, ao contrário da câmara de Wilson, a câmara de difusão apresentou melhoria quanto à visualização de resultados uma vez que o estado supersaturado apresentou uma maior duração e, devido a isso, a observação dos traços pode ser vista mesmo a olho nu e em uma quantia muito superior.

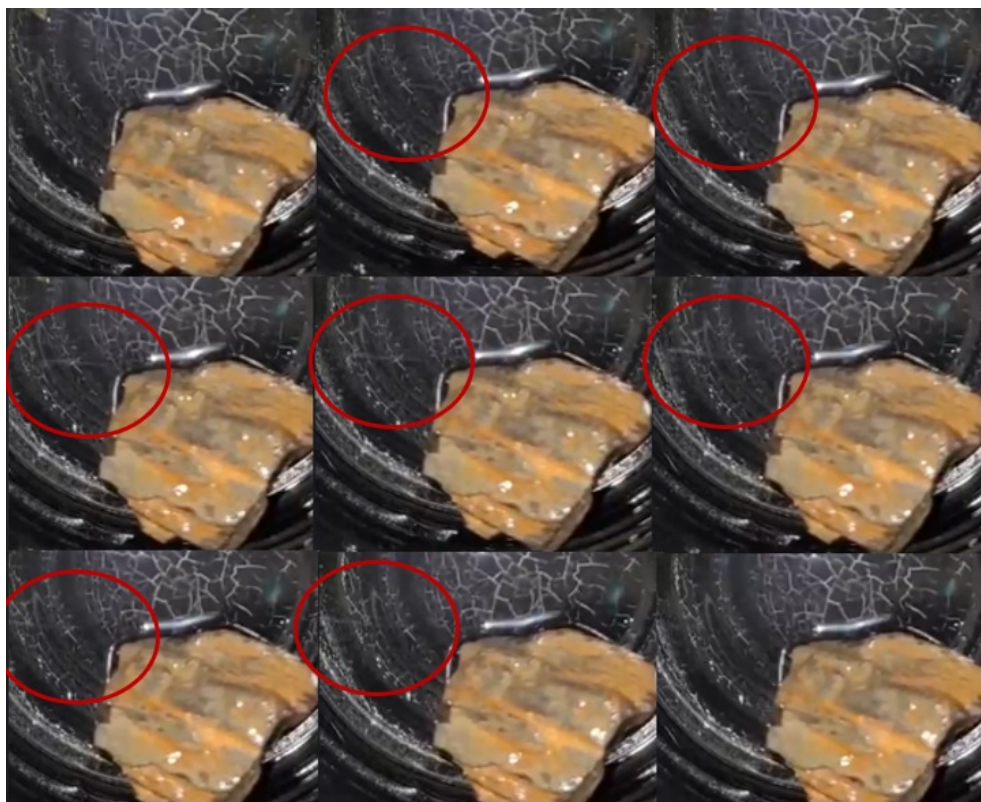


Figura 24: Fotografias com evolução temporal de 1/240 segundos entre elas. Lê-se da esquerda para a direita, de cima para baixo.

6 Conclusão

As partículas ionizantes como raios cósmicos e partículas radioativas possuem energia suficiente para arrancar elétrons do átomos do vapor álcool no interior da câmara, criando íons ao longo de suas trajetórias. Quando a partícula ionizante passa pelo vapor, ela deixa um rastro de íons livres, que agem como núcleos de condensação, ao redor dos quais o álcool supersaturado começa a condensar, formando gotículas visíveis. Alguns traços foram visualizados, no entanto, não foi possível a análise física como a determinação carga/massa devido a necessidade de um campo magnético de alta intensidade. O campo magnético criado pelas bobinas de Helmholtz não foi suficiente para curvar a trajetória dos traços. Ademais, a câmara de nuvens criada não detectou trajetórias de raios cósmicos, o que pode ser justificado pela efemeridade do evento e pela rapidez com que o estado supersaturado se desfez após o bombeamento do ar aliado a processos de desaceleração de raios cósmicos como o corte GKZ. Consequentemente, apenas os traços referentes a partículas radioativas provenientes do minério de urânio foram detectados em ambas as câmaras. Tais traços evidenciam o funcionamento das câmaras de nuvens assim como a obtenção do ambiente supersaturado. Como trata-se de um material radioativo, a emissão de partículas ocorre constantemente, o que facilitou a observação. Os traços encontrados são característicos de partículas alfa: são retos, curtos e densos. As partículas alfa possuem uma carga elevada (+2) e maior massa, em comparação à massa, por exemplo, das partículas beta logo, perdem energia rapidamente ao interagir com o álcool, o que se traduz nestas trilhas curtas e bem definidas.

Referências

- [1] Graciela B Gelmini. High energy cosmic rays. *Journal of Physics: Conference Series*, 171:012012, June 2009.
- [2] Thomas K. Gaisser, Ralph Engel, and Elisa Resconi. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 2 edition, 2016.
- [3] Museum of Victorian Science. Museum of victorian science, 2024. Acesso em: 3 setembro 2024.
- [4] Bianca Azulay Martins Gondim. Interação da radiação ionizante com a matéria e seus efeitos no corpo humano. 2016.
- [5] Professor Sam. How do you determine alpha decay? + example — socratic.org. <https://socratic.org/questions/how-do-you-determine-alpha-decay>, 2017. Accessed 03 September 2024.
- [6] Globo Channel. Spettro di brocken: uno incredibile fenomeno ottico naturale. <https://www.globochannel.com/2023/11/12/spettro-di-brocken-uno-incredibile-fenomeno-ottico-naturale-foto-e-video/>, 2024. [Accessed 17-11-2024].
- [7] Anne Marcovich and Terry Shinn. How scientific research instruments change: A century of nobel prize physics instrumentation. *Social Science Information*, 56, 05 2017.
- [8] C. T. R. Wilson. On an expansion apparatus for making visible the tracks of ionising particles in gases and some results obtained by its use. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 87(595):277–292, 1912.
- [9] Farcher (<https://physics.stackexchange.com/users/104696/farcher>). Photons detection using a cloud chamber. Physics Stack Exchange. URL:<https://physics.stackexchange.com/q/323758> (version: 2017-04-05).
- [10] NASA, ESA, J. Hester, and A. Loll (ASU). The crab nebula - nasa science — science.nasa.gov. <https://science.nasa.gov/missions/hubble/the-crab-nebula/>, 2023. Accessed 03 September 2024.
- [11] H Svensmark and EF Cristensen. *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*, 59(11):1225–32, 1997.
- [12] NASA. Pulsar PSR B1509-58 Shows its Hand - NASA Science — science.nasa.gov. <https://science.nasa.gov/resource/pulsar-psr-b1509-58-shows-its-hand/>, 2009. [Accessed 03-09-2024].

- [13] ESA. Cosmic Microwave Background (CMB) radiation — esa.int. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cosmic_Microwave_Background_CMB_radiation, 2018. [Accessed 31-08-2024].
- [14] M.C.B. Abdalla. *O discreto charme das partículas elementares*. Editora UNESP, 2006.
- [15] C. T. R. Wilson. On a method of making visible the paths of ionising particles through a gas. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 85:285–288, 1911.
- [16] Armin Hermann, John Krige, Ulrike Mersits, and Dominique Pestre. *History of CERN*, volume 1. North-Holland Amsterdam, 1987.
- [17] Caio Laganá. Estudo de raios cósmicos utilizando uma câmara de nuvens de baixo custo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33(3):3302, Jul 2011.
- [18] Mark Thomson. *Modern Particle Physics*. Cambridge University Press, September 2013.
- [19] Stepan G. Mashnik. On solar system and cosmic rays nucleosynthesis and spallation processes, 2000.
- [20] D. Griffiths. *Introduction to Elementary Particles*. John Wiley Sons, New York, USA, 1987.
- [21] David Halliday, Robert Resnick, and Jearl Walker. *Fundamentos de Física - Volume 1*. LTC, Rio de Janeiro, 9 edition, 2011.
- [22] F. N. Flakus. Detection and measuring ionizing radiation - a short history. *International Atomic Energy Agency*, 23:4, Dec 1981.
- [23] Pierre Radvanyi and Jacques Villain. The discovery of radioactivity. *Comptes Rendus. Physique*, 18(9-10):544–550, 2017.
- [24] Raymond A. Serway and John W. Jewett. *Física para Cientistas e Engenheiros*. Cengage Learning, São Paulo, 8 edition, 2013.
- [25] Malcolm S. Longair. *The Cosmic Century: A History of Astrophysics and Cosmology*. Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
- [26] Thomas K. Gaisser, Ralph Engel, and Elisa Resconi. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 2 edition, 2016.
- [27] Peter L. Galison. C. t. r. wilson and the cloud chamber. *Physics Today*, 50(8):44–49, 1997.

-
- [28] S’Cool LAB. *S’Cool LAB Cloud Chamber DIY manual*. CERN, 2024. Accessed: 2024-08-25.
- [29] A.V. Olinto. Ultra high energy cosmic rays: the theoretical challenge. *Physics Reports*, 333-334:329–348, 2000.
- [30] V. G. Sinitsyna and V. Yu. Sinitsyna. Supernova remnants: The crab nebula, cassiopeia a, and tycho as sources of cosmic rays in our galaxy. *Astronomy Letters*, 37(9), 2011.
- [31] Jiju Abraham, P Abreu, Marco Aglietta, Carlos Aguirre-Bastos, D Allard, I. Altekotte, J Allen, P Allison, Chikezie Alvarez, J Alvarez-Muñiz, M. Ambrosio, L Anchordoqui, S Andringa, Anna Anzalone, C. Aramo, S Argirò, Katsushi Arisaka, E Armengaud, F Arneodo, and Balázs Kégl. Correlation of the highest-energy cosmic rays with nearby extragalactic objects. *Science (New York, N.Y.)*, 318:938–43, 12 2007.
- [32] P. Haensel, A. Y. Potekhin, and D. G. Yakovlev. *Neutron stars 1: Equation of state and structure*, volume 326. Springer, New York, USA, 2007.
- [33] Malcolm S. Longair. *High Energy Astrophysics*. Cambridge University Press, 3 edition, 2011.
- [34] C. Grupen. *Astroparticle Physics*. Springer, 2005.
- [35] C. E. Navia, C. R. A. Augusto, and K. H. Tsui. On the ultra high energy cosmic rays and the origin of the cosmic microwave background radiation, 2007.