

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
CAMPUS BENTO GONÇALVES**

**Uma aproximação para o estudo da radioatividade na disciplina
de Física no Ensino Médio**

Tiago Schipp

Bento Gonçalves, Dezembro de 2018

Tiago Schipp

**Uma aproximação para o estudo da radioatividade na disciplina
de Física no Ensino Médio**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado junto ao curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, *Campus* Bento Gonçalves, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Almeida Andrade Neto

Coorientador: Me. Tiago Belmonte Nascimento

Bento Gonçalves, Dezembro de 2018

TIAGO SCHIPP

**Uma aproximação para o estudo da radioatividade na disciplina
de Física no Ensino Médio**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado junto ao curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, *Campus* Bento Gonçalves, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Almeida Andrade Neto

Coorientador: Me. Tiago Belmonte Nascimento

Aprovado em 05 de Dezembro de 2018.

Prof. Dr. Manuel Almeida Andrade Neto – Orientador

Prof. Me. Tiago Belmonte Nascimento (TAE) - Coorientador

Prof. Dr. Daniel Martins Ayub – IFRS Campus Bento Gonçalves

Prof. Dr. Ângelo Mozart Medeiros De Oliveira - IFRS Campus Bento Gonçalves

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, que principalmente doaram toda a sua vida e tempo para que nunca me faltasse estudo e amor em nossa família.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais pela paciência e sinceridade quando passei madrugadas acordado, quando passei finais de semana longe de tudo e de todos.

A minha namorada Daniela, que me incentivou a buscar meus objetivos, a estar paciente nas horas boas e difíceis na vida, e a qual eu agradeço de coração por me incentivar a entrar no curso de Licenciatura em Física, a qual sempre me acompanhou e me elogiou, mesmo nos dias de tristeza estava do meu lado para me erguer.

Aos meus professores, parceiros e mestres nesta jornada que me incentivaram para o caminho certo e me guiaram para o desenvolvimento pessoal como futuro professor.

Aos meus orientadores Prof. Manuel Almeida Andrade Neto e Tiago Belmonte Nascimento que sempre me trataram com máximo respeito e dignidade, acolhendo com sabedoria e companheirismo nas horas mais difíceis.

Aos meus colegas de aula que sempre dedicaram o seu tempo para dar opiniões, risadas e muitas horas de estudo ao meu lado, Maurício José Testa, Dionatan Nadal e todos que passaram pelo meu caminho no Instituto Federal.

RESUMO

A câmara de nuvens é um equipamento, inventado por Charles Wilson em 1911, que proporciona a observação de partículas subatômicas provenientes de radiação cósmica do universo. O presente trabalho tem por finalidade o estudo da radiação cósmica e as partículas presentes no ambiente do Planeta- a partir da explicação sobre a Radiação cósmica, chuviros atmosféricos extensos, doses de radiação, decaimentos radioativos e história da origem e desenvolvimento da Câmara de Nuvens– visualização das mesmas a partir da fabricação e utilização de uma câmara similar à inventada por Wilson. Foram utilizados materiais simples e de baixo custo, para ser aplicado futuramente nas escolas. Os eventos foram gravados em vídeo e as imagens analisadas para a classificação das partículas. A montagem do aparato consiste em um recipiente de vidro do tipo aquário, apoiado à uma chapa de aço inox, lacrado com fita isolante, a qual foi sobreposta no fundo da caixa térmica com gelo seco. Adicionando então álcool isopropílico sobre o feltro na parte superior do aquário, evaporando e, decorrente ao resfriamento da chapa por condução (entre a haste e o nitrogênio), condensará formando uma camada supersaturada. Pode-se ver então o rastro que raios cósmicos deixam ao ionizar as moléculas de álcool (elétrons, prótons, Múons e Píons provindos de explosões estelares). Nesse trabalho foi possível visualizar uma grande quantidade de chuviros atmosféricos extensos, e com os resultados obtidos, classificou-se as Partículas de baixa energia, Elétrons de ionização, Prótons e Partículas de altas energias. No fim desse trabalho encontra-se um roteiro experimental para a utilização em sala de aula, seja no ensino fundamental, médio e superior.

Palavras-chave: Ensino de Física, Radioatividade, Ensino Médio, Energia Nuclear, Câmara de Wilson.

ABSTRACT

The Cloud Chamber is an equipment, invented by Charles Wilson in 1911, which provides the observation of subatomic particles from the cosmic radiation of the universe. The present work aims at the study of cosmic radiation and particles present in the environment of the Planet - from the explanation of Cosmic Radiation, extensive atmospheric showers, radiation doses, radioactive decays and history of the origin and development of the Cloud- visualization of the same from the manufacture and use of a chamber similar to the one invented by Wilson. Simple and low-cost materials were used to be applied in schools in the future. The events were videotaped and the images analyzed for particle classification. The apparatus assembly consists of an aquarium-type glass vessel, supported on a stainless steel plate, sealed with insulation tape, which was superimposed on the bottom of the thermal box with dry ice. Then adding isopropyl alcohol on the felt at the top of the aquarium, evaporating and, due to the cooling of the plate by conduction (between the rod and the nitrogen), will condense forming a supersaturated layer. One can then see the trace that cosmic rays leave when ionizing the molecules of alcohol (electrons, protons, Múons and Pons coming from stellar explosions). In this work it was possible to visualize a large number of extensive atmospheric showers, and with the results obtained, the low energy particles, ionization electrons, protons and high energy particles were classified. At the end of this work is an experimental script for use in the classroom, whether in primary, secondary and higher education.

Keywords: Teaching Physics, Radioactivity, High School, Nuclear Energy, Wilson's Chamber.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 Radioatividade Natural e Produzida Pelos Seres Humanos	10
2.2 Radioatividade: um processo natural.....	10
2.3 Radioatividade produzida pelos seres humanos	14
2.4 O espectro de radiação e suas características	15
2.5 A importância da descoberta da Radioatividade	16
2.6 Decaimento Alfa e Decaimento Beta	17
2.7 O Decaimento Alfa.....	19
2.8 O Decaimento Beta.....	20
2.9 O Decaimento Gama	21
2.10 A Radioatividade dos Ambientes	22
2.11 Unidades de Radioatividade, Dose Absorvida, Exposição à Radiação e Dose Recebida	22
2.12 Unidades de Radioatividade	23
2.13 Dose Absorvida	23
2.14 Exposição à Radiação	24
2.15 Doses e Efeitos da Radiação nos Seres Humanos	27
2.16 A Câmara de Wilson como Detector de Partículas: a formação do rastro na Câmara de Wilson.....	29
2.17 Objetivos do presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)	30
3. REFERENCIAL TEÓRICO	31
3.1. Porque trabalhar Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio?	31
3.2 O ensino de física moderna e experimental no âmbito escolar	32
3.3 O desenvolvimento histórico e conceitual da câmara de nuvens	34
4. METODOLOGIA	36
4.1 Produção do material de baixo custo.....	36
5. FUNCIONAMENTO E MONTAGEM DA CÂMARA DE NUVENS.....	39
6. DISCUSSÕES	42
6.1 Prótons.....	43
7. RESULTADOS	43
7.1 Partículas de baixa energia	43
7.2 Elétrons de ionização.....	44
7.3 Prótons.....	45
7.4 Partículas de alta energia	45
8 CONCLUSÃO	46
9 REFERÊNCIAS.....	47
10 APÊNDICE	50

1. INTRODUÇÃO

Quando se fala em radiação normalmente se associa a Usinas Nucleares ou Armas Nucleares, entretanto, no próprio ambiente que nos cerca há uma série de decaimentos que ocorrem naturalmente, sem causar danos e doenças por radiação, uma vez que os seres vivos do planeta – incluindo-se os seres humanos – estão adaptados a esse “bombardeamento” natural radioativo.

As rochas e as próprias construções feitas pelo homem também contribuem com a radiação do planeta, elas possuem quantidades infinitesimais de elementos radioativos, liberando decaimentos alfa, beta e gama, porém, em quantidades extremamente pequenas. Este trabalho fez uma abordagem teórica das radiações no ambiente com enfoque voltado ao Ensino Médio e desenvolveu um material de baixo custo, o experimento da Câmara de Wilson.

O elemento motivador do presente estudo foi a construção de uma câmara de Wilson, também chamada de Câmara de Nuvens, que permite visualizar alguns processos relacionados à Física de Partículas (radioatividade, geração de chuviros e suas partículas residuais associadas). Nestes processos, partículas ionizadas como prótons, píons, múons e elétrons podem deixar um rastro de ionização visível no experimento.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem por objetivo mostrar a radioatividade que ocorre nos ambientes naturais e nos construídos pelos seres humanos para fins de estudo e como material de aula no âmbito do Ensino Médio.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Radioatividade Natural e Produzida Pelos Seres Humanos

O termo radioatividade é definido em termos gerais em dicionários como “Propriedade de alguns elementos cujos átomos se desintegram espontaneamente: *A radioatividade de certos materiais libera partículas que podem ser usadas para destruir micro-organismos.*” (RAMOS, 2009, p.675).

2.2 Radioatividade: um processo natural

A radioatividade ocorre no universo desde sua origem. No planeta Terra desde a sua formação, o estudo dos elementos químicos nos mostra que não existem núcleos estáveis com $Z > 83$ (Bismuto, Bi). Estes núcleos se desintegram emitindo partículas e/ou radiação. Todos os elementos químicos naturais encontrados na tabela periódica, isto é, não sintetizados em laboratórios, são formados no interior das estrelas e nos estágios finais de sua vida. O conteúdo nuclear – quantidade material dentro do núcleo, número de prótons e números de nêutrons – torna uma parcela desses elementos instáveis, sendo que estes apresentam decaimento nuclear que é um dos processos que gera a radioatividade natural (BAUER; WESTFALL; DIAS, 2013).

Quando um raio cósmico de alta energia colide com núcleos de moléculas na alta atmosfera terrestre, ele dá origem a uma sequência de interações nucleares (radionuclídeos cosmogênicos) e eletromagnéticas, produzindo uma cascata de partículas que se deslocam com velocidades próximas à velocidade da luz (Fauth *et al*, 2007) – Figuras 1 e 2.

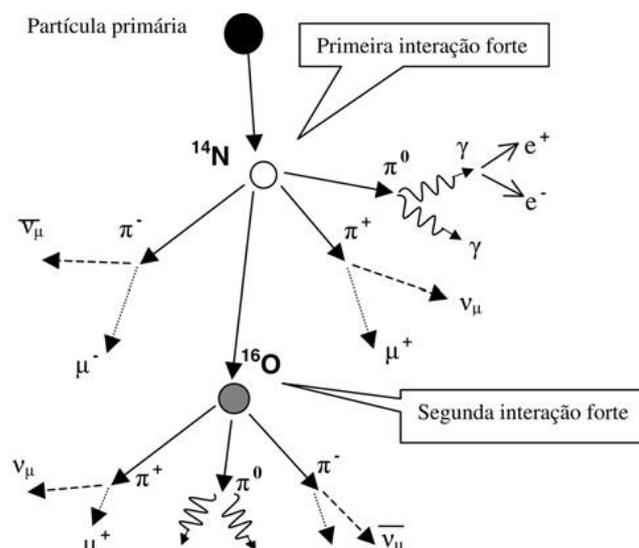


Figura 1 – Esquema de desenvolvimento de um chuva atmosférico extenso (CAE) na atmosfera terrestre (Fauth *et al*, 2007).

Segundo Peixoto *apud* Auger, Rossi, Skobeltzy (2008), no fim da década de 30, Pierre Auger e colaboradores observam coincidência em dois detectores distantes um do outro e assim descobre os chamados Chuveiros Atmosféricos Extensos (C.A.E), ou *Extensive Air Showers* (E.A.S). Bruno Rossi (1947 - Estados Unidos), e Georgi Zatsepin (1948 - Rússia) constroem os primeiros experimentos especificamente projetados para detectar e analisar os “chuveiros de Auger”. Em fins da década de 40 e começo da década de 50, eles concluem que esta cascata ou chuva de partículas ionizadas é produzido pela colisão de um raio cósmico de alta energia (primário) com moléculas de ar, principalmente nitrogênio N_2 .

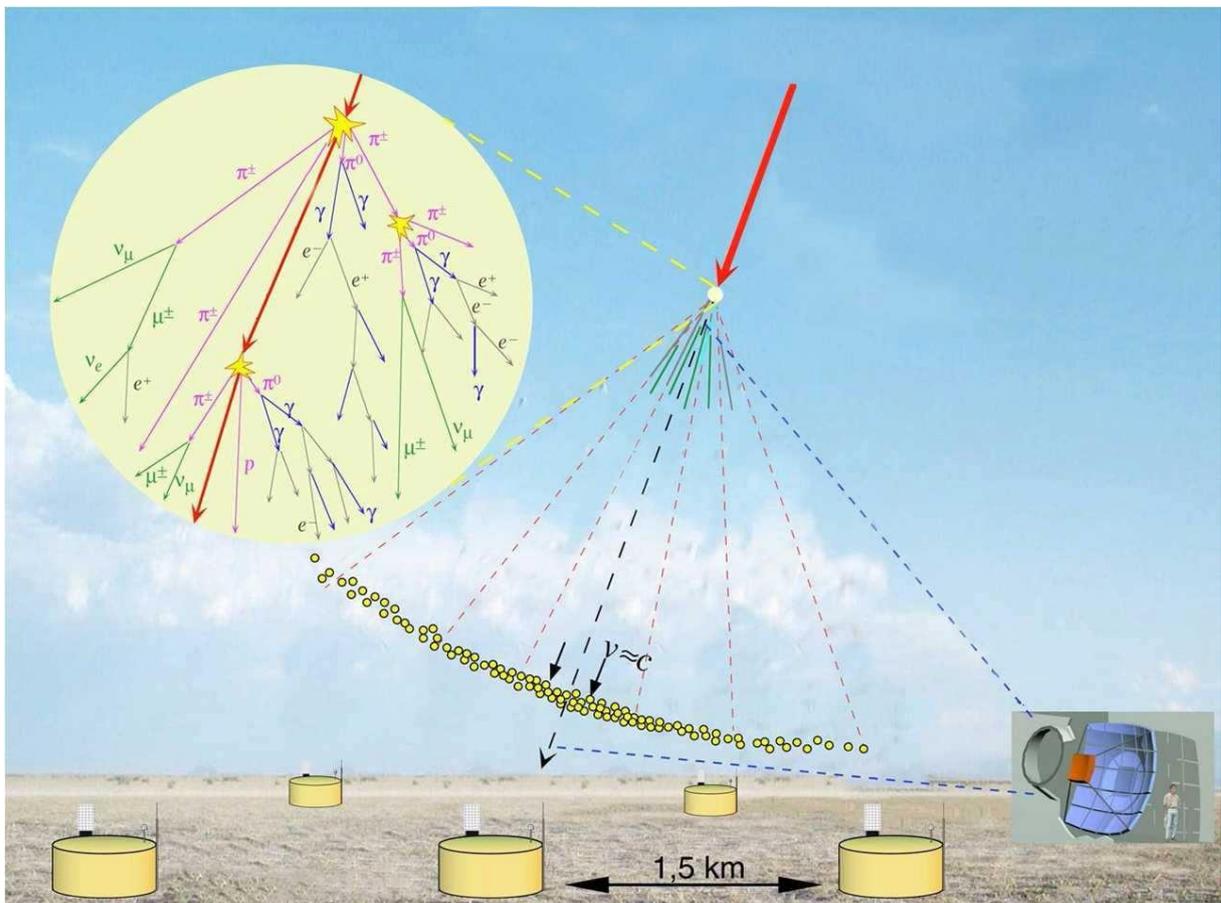


Figura 2 – Ilustração do desenvolvimento e detecção de um CAE. Figura extraída do artigo de Peixoto (2008), <Fonte: <http://apcauger.in2p3.fr/Public/Presentation/Images/principe.png>>

Os Chuveiros Atmosféricos Extensos (CAE)¹ podem ser detectados com aparatos experimentais que cobrem uma grande área de até milhares de quilômetros quadrados, localizados em observatórios como o do Projeto Pierre Auger², que adotou duas técnicas simultaneamente: tanques Cherenkov e telescópios de fluorescência. Esses detectores são

¹ Chuveiros Atmosféricos Extensos (CAE): Este conceito foi introduzido por Heitler (1944) e considera a cascata de partículas constituída puramente por radiação eletromagnética (PEIXOTO, 2008).

² Site do Laboratório de observação de chuveiros atmosféricos extensos <<http://www.auger.org/observatory/gallery2005.html>>

compostos de uma rede com pouco mais de 1600 tanques preenchidos com água purificada, dispondo de três fotomultiplicadoras no seu topo voltadas para o interior do tanque. As fotomultiplicadoras e a eletrônica são alimentadas por duas baterias em série, as quais são carregadas por dois painéis solares. As informações coletadas são registradas por um módulo de eletrônica e transmitidas por antenas de micro-ondas a uma estação central (PEIXOTO, 2008).

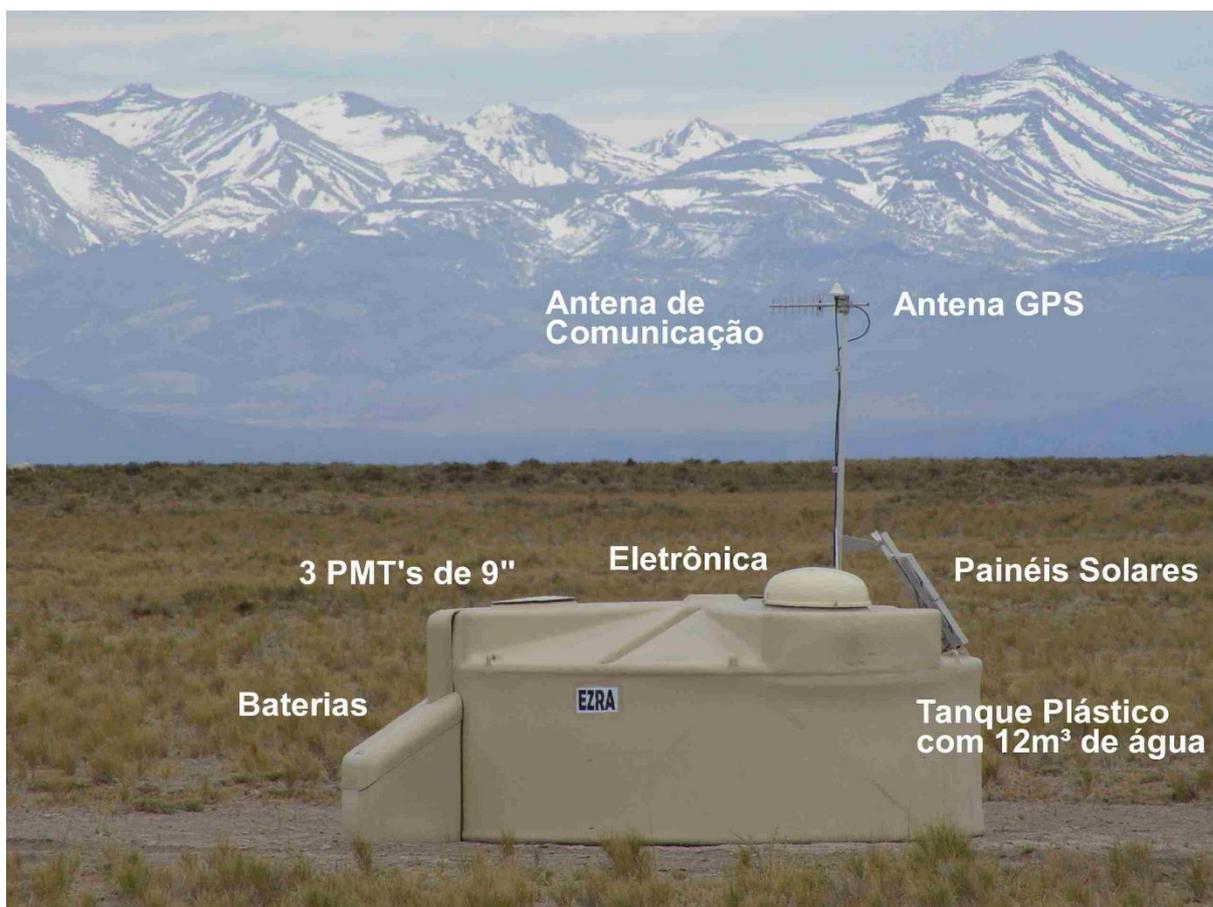


Figura 3 – Imagem mostrando um tanque instalado e instrumentado pronto para receber e enviar sinais de radiação cósmica. <<http://www.auger.org/observatory/gallery2005.html>>

Os Chuveiros Atmosféricos Extensos (CAE) têm uma composição de aproximadamente 90% de elétrons, pósitrons e fótons, 9% de múons e apenas 1% de partículas hadrônicas (prótons energéticos e píons carregados) –Figura 1 (Fauth *et al*, 2007).

Segundo Fauth (2007, p. 585-591) “Como consequência da primeira interação são predominantemente produzidos mésons- π neutros e carregados e em menor quantidade partículas K-méson, prótons, nêutrons e suas antipartículas”.

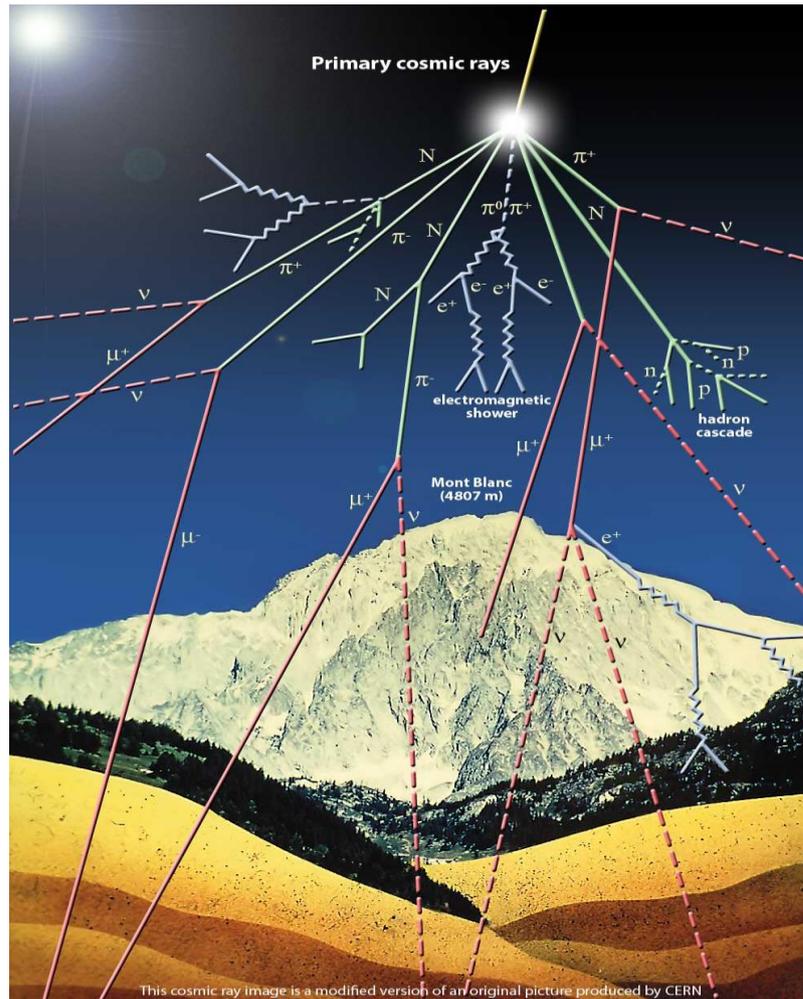


Figura 4 – Esquema de desenvolvimento de um chuveiro atmosférico extenso (CAE) na atmosfera terrestre mostrando a penetração dos neutrinos.

Fonte: <http://psc.in2p3.fr/TPsubat/m2/cosmic-rays.jpg>

Segundo Pinheiro (2015, p. 517-528), compreende que grande parte dessa radiação cósmica se origina na Via Láctea, e esses raios cósmicos recebidos em nossa atmosfera, apesar de chamados de raios, são partículas carregadas e muito energéticas que bombardeiam constantemente a Terra. Atualmente são detectados e analisados prótons, elétrons, fótons, nêutrons, múons e mésons, mas também podem ser núcleos de maiores dimensões, como os de ferro. A composição dos raios cósmicos depende da variância com a sua altitude, que ao nível do mar, as partículas predominantes são os múons e elétrons. Quando essas partículas provenientes dos raios cósmicos atingem a atmosfera terrestre, elas criam uma chuva de partículas secundárias de energia mais baixas, e estas podem atingir o solo até o nível do mar. A produção da radiação secundária ocorre devido à interação entre os núcleos primários e os átomos da atmosfera terrestre.

Segundo Okuno (2013) “Uma série de radionuclídeos naturais como o Potássio (K-40) e outros que descendem da desintegração que se inicia com Urânio-238 e Tório-232, com meia-vida de mais de bilhões de anos, existem no ambiente terrestre desde que nosso planeta se originou. Há também na natureza radionuclídeos que são produzidos quando partículas da radiação cósmica interagem com átomos da atmosfera tais como Carbono-14 e Trítio (^3H).

A radiação cósmica foi descoberta em 1912 pelo físico austríaco Victor Hess. Sua origem é extraterrestre e há fortes indícios de que ela provém de supernovas, atravessa o espaço sideral, e de 85% a 90% do que atinge a atmosfera terrestre são prótons, de 9% a 12% são partículas alfa, e 1%, núcleos de elementos pesados, todos extremamente energéticos. Essas partículas interagem com átomos da atmosfera e criam várias outras partículas, que constituem a radiação cósmica secundária, incluindo mésons pi, elétrons, nêutrons e fótons. Ao nível do mar, cerca de 75% da radiação cósmica é constituída de múons que resultam do decaimento de mésons pi, e o restante são essencialmente fótons e elétrons. A intensidade da radiação cósmica secundária varia com a altitude, e a máxima, chamada máximo de Pfotzer, ocorre entre 15 e 26 km. Varia também com a latitude, sendo menor na região do equador e maior nos polos, devido ao campo geomagnético (OKUNO, 2013, p. 185-200).

2.3 Radioatividade produzida pelos seres humanos

Segundo MARTINS (1990), Um histórico acurado e interessante da descoberta da radioatividade mostra que a descoberta da radioatividade por Becquerel não foi acidental³, e como todas as obras da ciência, envolveu um árduo trabalho minucioso. A partir daí surgiram aplicações dessa radioatividade produzida em laboratório que logo seriam usados na medicina, na engenharia, nas ciências (Física, Química e Biologia), e hoje em dia até na indústria alimentícia a radiação é utilizada.

Todos nós estamos expostos à radiação natural e à radiação artificial, principalmente em exames radiológicos médicos e odontológicos. A intensidade da radiação que recebemos é medida em unidade chamada sievert (Sv) que corresponde à dose absorvida medida em Gray, multiplicada por um fator que leva em conta o tipo de radiação. Além disso, há vários outros radionuclídeos artificialmente produzidos que estão presentes no ambiente, resultantes de testes nucleares ou de acidentes, estes últimos muito raros. (OKUNO, 2013).

Segundo OKUNO (2013, p. 77) “entende-se que os radionuclídeos estão presentes nas paredes das casas, na comida que ingerimos, no ar que respiramos entre outros”.

O leite contém naturalmente Potássio (K-40), a água em seu estado natural também inclui o Rádio-226, Radônio-222 e Radônio-220, mas não dizemos que eles estão contaminados radioativamente. Por sua vez, costumamos dizer que há contaminação radioativa quando radionuclídeos artificiais estão presentes no ambiente terrestre, como no solo, na vegetação, no mar, nos alimentos e no nosso corpo interna e externamente. (Okuno *apud* Yoshimura, 2010; Okuno, 1988).

³ <http://ansnuclearcafe.org/2011/12/13/henri-becquerels-discovery-of-radioactivity/#sthwash.9shQn589.dpbs>.

2.4 O espectro de radiação e suas características

A Figura 3 abaixo mostra o espectro das ondas eletromagnéticas existentes na natureza. Nesta figura percebemos que há um aumento da energia conforme diminui o comprimento de onda, dado pela relação de Planck,

$$E = hf,$$

onde E é a energia da radiação, h é a constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s) e f é a frequência da radiação emitida. A velocidade de uma onda, v , está relacionada ao comprimento de onda e à frequência por

$$v = \lambda f,$$

com λ sendo o comprimento de onda. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo é a mesma (uma das constantes da natureza), independente da frequência, chamada de c , cujo valor é $c = 2,998 \times 10^8$ m/s, então podemos escrever

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}.$$

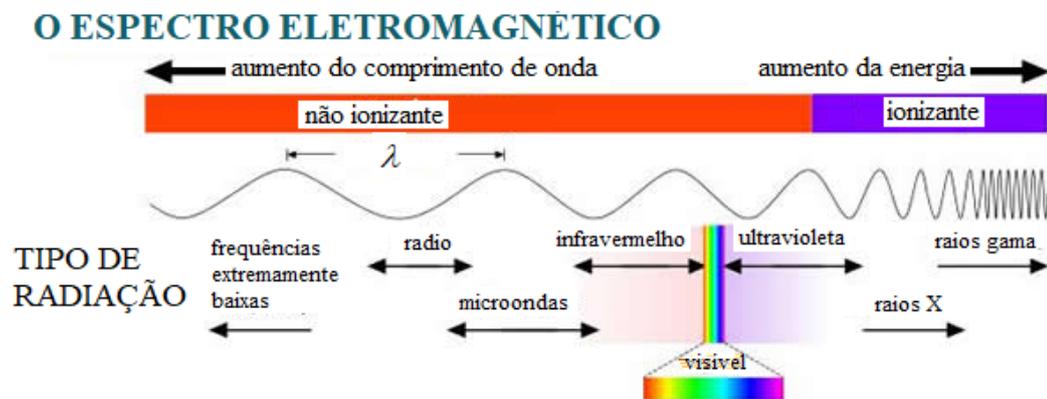


Figura 5 – Espectro da Radiação Eletromagnética. Adaptado de <http://www.physics.org/article-questions.asp?id=84>.

Esta última relação mostra claramente o porquê da diminuição da energia conforme aumentamos o comprimento de onda e vice-versa. (BAUER; WESTFALL; DIAS, 2013)

Em meados de 1800 o espectro da radiação eletromagnética não era conhecido, isto é, achava-se que cada cor do espectro possuía características muito distintas. Os raios X, descobertos por Roentgen (Wilhelm Konrad Roentgen, 1845 – 1923 físico Alemão) receberam esse nome por que seu descobridor, trabalhando com os raios catódicos, pensava se tratar de uma radiação nova, desconhecida. Após os trabalhos de Maxwell (James Clerk Maxwell, 1831 – 1879, Físico-matemático Escocês) unificando a Teoria Eletromagnética Clássica em 1864, os

físicos da época perceberam que o espectro de radiação eletromagnética é uma “coisa só”, e é vasto. O que chamamos de luz é somente uma pequena parcela desse espectro que sensibiliza os olhos (TIPLER, 1981).

Hoje em dia os físicos chamam “grosseiramente” de luz qualquer porção do espectro eletromagnético, estando ou não na frequência do visível. Na Figura 5 acima podemos ver a faixa de variação desse espectro, varrendo desde frequências baixas e grandes comprimentos de onda, passando pela faixa das ondas de rádio utilizadas em telecomunicações, pelas micro-ondas, infravermelho, visível, ultravioleta, raios-X até frequências altíssimas para radiação de alta energia dos raios gama. Na figura acima há uma pequena ampliação da parte do espectro de radiação eletromagnética na faixa do visível. Observa-se que a faixa visível é minúscula comparada com todo o espectro.

Nesta mesma Figura 5, a parte de interesse do espectro da radiação neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é a referente às radiações ionizantes – raios X e aquelas que interagem com o núcleo – raios gama – situada mais à direita acima, onde a seta indica aumento de energia.

2.5 A importância da descoberta da Radioatividade

Sabe-se, atualmente, que os raios X, identificados em 1895, foram uma descoberta impactante para toda a comunidade científica. Naquela época, os estudos sobre ionização de gases eram bastante comuns entre os físicos, e uma descoberta com a capacidade de gerar imagens em chapas fotográficas com o negativo do esqueleto humano, somada ao aparato experimental desenvolvido por Roentgen, significava que novos esforços deveriam ser voltados para explicação do fenômeno cuja natureza, como salientado pelos autores, permanecia desconhecida (WATSON, 1945, p. 281-291).

Em 1896, Becquerel percebeu que cristais de urânio emitiam “raios”. Essa descoberta desencadeou uma série de pesquisas (MARTINS, 1990). Na França, Marie Curie e Pierre Curie se juntaram a Becquerel e concentraram esforços para isolar o elemento ou os elementos responsáveis por essa radiação. Durante a pesquisa, o casal Curie descobriu o elemento rádio (KNIGHT, 2009).

Na Inglaterra, J.J Thomson e seu aluno Ernest Rutherford trabalharam na identificação desses raios, até então desconhecidos. Usando combinações de campos elétricos e magnéticos,

de modo muito semelhante àquele usado por Thomson em suas pesquisas sobre os raios catódicos, eles identificaram três tipos de radiação – tabela a seguir:

Tabela 1. Radiação × carga × blindagem

Radiação	Identificação	Carga	Blindada por
Alfa, α	Núcleo de hélio (${}^4\text{He}$)	$+2e$	Folha de papel
Beta, β	Elétron	$-e$	Folha de alumínio ($\sim\text{mm}$)
Gama, γ	Fóton de alta energia	0	placas de chumbo ($\sim\text{cm}$)

Estas importantes descobertas iniciaram uma nova era na Física: A Física Nuclear e logo em seguida a Física de Partículas. Rutherford, usando Polônio-209 como elemento gerador de partículas alfa descobriu o núcleo atômico logo em seguida. Por sua descoberta, Rutherford é considerado o pai da Física Nuclear.

2.6 Decaimento Alfa e Decaimento Beta

Historicamente, apesar de serem chamados de radiação alfa (símbolo α), radiação beta (símbolo β) e radiação gama (símbolo γ), de fato, apenas os raios gama são radiações. Alfa e beta são partículas vindas de decaimento nuclear. Este tipo de associação imprecisa, mas de cunho histórico que também permanece até hoje são os chamados “Raios Cósmicos”. Na verdade, os Raios Cósmicos são um chuveiro de partículas que incidem sobre a Terra, oriundos em sua maioria do Sol.

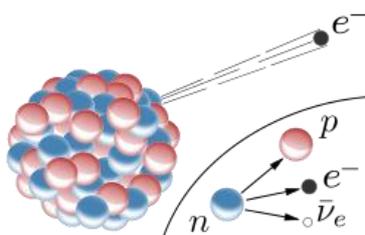


Figura 6. Decaimento β^- . Adaptado de https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay.

Uma partícula alfa é um núcleo de hélio (${}^4\text{He}$), isto é, um sistema fortemente ligado de dois prótons e dois nêutrons que forma o átomo de hélio duplamente ionizado (sem seus elétrons). Já a partícula beta é um elétron altamente energético ejetado do núcleo: um nêutron ligado ao núcleo decai em um próton (que permanece no núcleo), um elétron com grande energia cinética e mais o antineutrino do elétron – Figura 4. Inicialmente, o decaimento beta foi associado à emissão de um elétron e^- , a partícula beta. Mais tarde descobriu-se que alguns núcleos podem sofrer decaimento beta ao emitirem um pósitron e^+ , a antipartícula do elétron,

embora este modo de desintegração não seja tão comum. Um pósitron é idêntico a um elétron, exceto pela sua carga, que é positiva. Para sermos precisos, chamaremos a emissão de elétron de decaimento beta-menos (β^-), e a emissão de um pósitron, de decaimento beta-mais (β^+) (KNIGHT, 2009).

Os núcleos atômicos são formados por dois tipos de partículas: prótons e nêutrons – chamados de núcleons. Esses núcleons são mantidos coesos através da chamada interação forte.⁴ Entretanto, nem todas as combinações de prótons com nêutrons são possíveis devido às limitações impostas pela interação forte, pela interação Coulombiana e pela mecânica quântica. O número de prótons no interior de um núcleo, chamado de Z , é o número de carga, também chamado de número atômico.

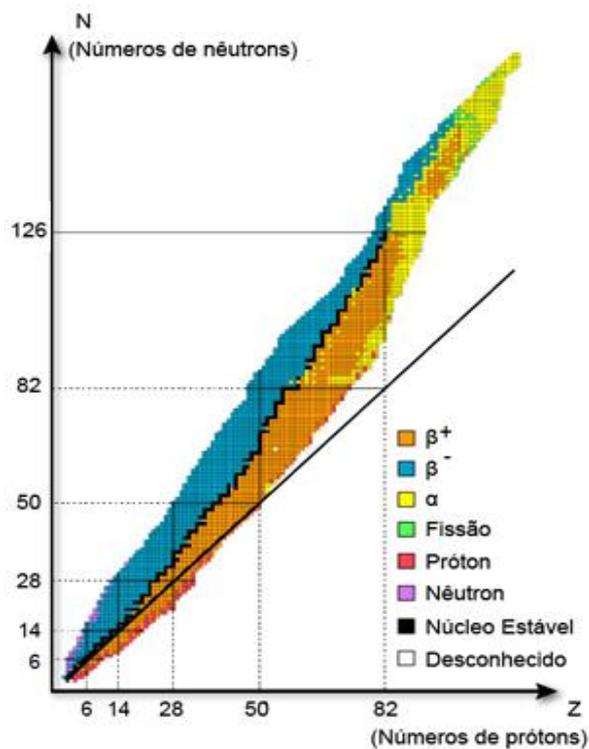


Figura 7 – Estabilidade nuclear.

Adaptado de: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/3RadioatividadeeParticulas/1AlfaBetaGama/Alfabetagama.html>.

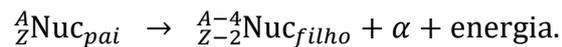
Núcleos do mesmo elemento químico com número de nêutrons, N , diferentes são chamados de isótopos. Ao contrário do senso comum sobre estabilidade nuclear, a maioria dos isótopos é instável, ilustrado na Figura 5. Até o momento sabe-se que existem cerca de 2400 isótopos instáveis além dos 251 estáveis. Previsões teóricas para o número de isótopos que

⁴ A interação forte é uma força mais forte que a força elétrica, capaz de manter prótons coesos no núcleo.

podem existir alcançam o número aproximado de até 6.000 (seis mil), de modo que existe um número igual deles a ser descoberto (BAUER; WESTFALL; DIAS, 2013).

2.7 O Decaimento Alfa

Um núcleo instável que emite uma partícula alfa perderá dois prótons e dois nêutrons. Portanto, a reação que fornece o decaimento alfa é escrita como:



Na sistemática nuclear, A é o número de massa, Z é o número de prótons e N é o número de nêutrons que não aparece de forma explícita na reação acima. A energia restante é composta pela energia cinética de recuo do núcleo filho e pela energia cinética da partícula alfa (α) considerando o núcleo pai como o sistema de referência (em repouso), ou referencial do centro de massa. A partícula alfa é um núcleo do átomo de hélio duplamente ionizado:

$$\alpha = {}^4_2\text{He}^{++}.$$

Para um dado núcleo, vale a relação:

$$A = Z + N.$$

Esse é o processo de decaimento alfa, o núcleo Nuc_{pai} original é chamado de núcleo-pai, origina o núcleo Nuc_{filho} , chamado de núcleo-filho, uma partícula alfa e energia. A energia é energia cinética de recuo do núcleo filho e energia cinética da partícula alfa. Essa reação pode ocorrer somente quando a massa do núcleo-pai for maior do que a do núcleo-filho mais a massa da partícula alfa:

$$m({}^A_Z\text{Nuc}_{pai}) > m_\alpha + m({}^{A-4}_{Z-2}\text{Nuc}_{filho}).$$

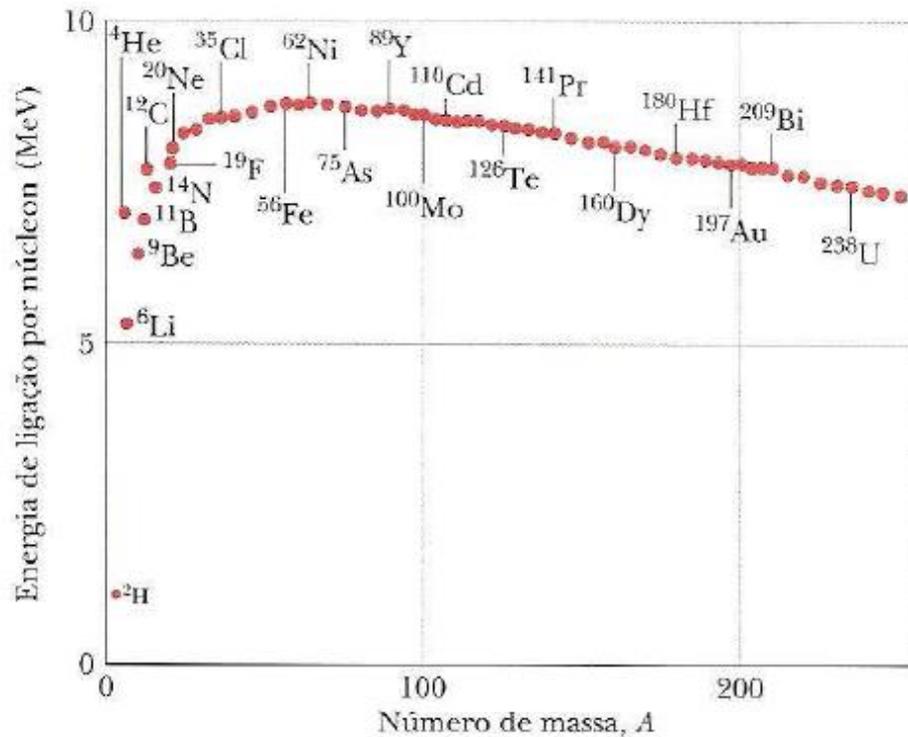


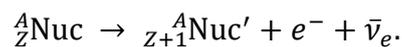
Figura 8 – Energia de ligação por núcleo versus número de massa.

Fonte: HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009 vol 4.

Essa condição é satisfeita para núcleos pesados com altos valores de Z , situados bem acima do máximo da curva de energia de ligação da Figura 6 acima. Para valores de $A (= Z + N) > 150$ é possível o decaimento alfa para quase todos os isótopos instáveis (KNIGHT, 2009).

2.8 O Decaimento Beta

Em um decaimento beta (decaimento β), o núcleo pode emitir um elétron e^- (Figura 4) ou um pósitron e^+ ou pode capturar um de seus próprios elétrons atômicos. A equação geral de um decaimento β^- nuclear pode ser escrita como:



Isso quer dizer que, no decaimento β^- nuclear, o número de massa do núcleo mantém-se inalterado, mas o número atômico aumenta de uma unidade. A partícula $\bar{\nu}_e$ é o antineutrino do elétron (BAUER, WESTFALL, DIAS 2013).

Também é possível que o decaimento beta ocorra em sentido inverso dentro do núcleo. Nesse decaimento β^+ , um próton é convertido em um nêutron através da emissão de um

pósitron e de um neutrino do elétron, $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$. No caso de um próton livre esse processo é energeticamente impossível de ocorrer, pois o nêutron possui uma massa maior que a do próton. Entretanto, no interior de um núcleo, a reação



pode ocorrer quando as massas dos isótopos iniciais e finais da reação seja energeticamente possível. Em suma, o decaimento beta só pode acontecer se for permitido pela conservação da energia, isto é, se a soma das massas dos reagentes for igual à soma das massas dos produtos mais certa quantidade de energia (KNIGHT, 2009).

2.9 O Decaimento Gama

O decaimento gama (decaimento γ) é a emissão de um fóton por um núcleo, e sempre é a consequência de uma deexcitação a partir de um estado nuclear excitado. Decaimentos gama são qualitativamente diferentes dos decaimentos alfa e beta por ser o único modo de decaimento que não causa transmutação (mudança do elemento químico ou do isótopo).

Os núcleos podem ir para estados excitados de maneiras análogas àquelas pelas quais os átomos podem ir para estados excitados, por meio de colisões com outros objetos. A energia cinética desses processos pode ser convertida em energia de excitação, elevando os núcleons para camadas mais altas (estados energéticos mais altos), ou causando vibrações ou rotações coletivas do núcleo como um todo.

O processo de decaimento gama em núcleos é semelhante ao de emissão de fótons durante a deexcitação de átomos. Todavia, as energias características de decaimento dos elétrons em um átomo são da ordem de eV (elétron-volt), enquanto que as energias características dos estados nucleares excitados são da ordem de MeV (mega elétron-volt). Portanto, os fótons emitidos em um decaimento gama são tipicamente um milhão de vezes mais energético do que aqueles emitidos em decaimentos atômicos (KNIGHT, 2009).⁵

⁵ Elétron-volt é uma unidade de medida de energia. Equivale a $1,602\,177\,33\,(49) \times 10^{-19}$ joules. Seu símbolo é eV e seu plural, elétrons-volt ou eletrões-volt. Por definição, um elétron-volt é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo.

< Fonte: BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. Física para Universitários – Óptica e Física Moderna, 2013 >

2.10 A Radioatividade dos Ambientes

A radiação natural compreende a radiação cósmica e a radiação resultante do decaimento de radionuclídeos naturais – presentes nas rochas, na água, nas construções humanas, em materiais cerâmicos e nos alimentos. Os radionuclídeos naturais incluem os elementos radioativos primordiais na crosta terrestre, seus produtos de decaimento radioativo e radionuclídeos produzidos por interações de radiação cósmica com a atmosfera terrestre (Radionuclídeos cosmogênicos). Os radionuclídeos primordiais têm meias-vidas comparáveis com a idade da Terra. Radionuclídeos cosmogênicos são produzidos continuamente por bombardeamento de núcleos estáveis por raios cósmicos, principalmente na atmosfera (BAUER; WESTFALL; DIAS, 2013).

Os seres humanos estão expostos à radiação natural de fontes externas, que incluem radionuclídeos na Terra e radiação cósmica, e por radiação interna de radionuclídeos incorporados ao corpo. As principais rotas de ingestão de radionuclídeos são em alimentos, água e inalação. Uma categoria particular de exposição à radiação interna, na qual o epitélio brônquico é irradiado por partículas alfa da progênie de vida curta do radônio, constitui uma fração importante da exposição de fontes naturais (IPEN, 2016).

Na maioria dos lugares da Terra, a radiação natural de fontes externas varia dentro de um fator de quatro; mas em algumas localidades, a variação é maior por causa de concentrações anormalmente altas ou baixas de minerais radioativos no solo. Apenas a radiação cósmica varia cerca de um fator de dois na faixa de elevação que abrange a maior parte da população mundial (0–2.000 m) e em um grau muito menor com a latitude por causa da variação no campo magnético da Terra. Particularmente altas concentrações de minerais radioativos no solo foram relatadas no Brasil, Índia e China. Variações das concentrações de radônio nos edifícios são responsáveis pelas maiores variações nas doses recebidas pelo público de fontes internas naturais (IPEN, 2016).

2.11 Unidades de Radioatividade, Dose Absorvida, Exposição à Radiação e Dose Recebida

Dado que temos um radionuclídeo, como podemos medir a radioatividade dessa amostra? Existem duas grandezas principais de interesse:

1. A intensidade de produtos emitidos em um particular decaimento nuclear, isto é, decaimentos/segundo.
2. O efeito que um dado tipo de radiação tem sobre o corpo humano (BAUER; WESTFALL; DIAS 2013).

2.12 Unidades de Radioatividade

A unidade SI para radioatividade é o **becquerel** (Bq) em homenagem ao físico francês Henry Becquerel (1852-1908), codescobridor da radioatividade.

$$1,0 \text{ Bq} = 1,0 \text{ decaimento nuclear/segundo.}$$

O becquerel é uma unidade de radioatividade muito pequena. Outra unidade de radioatividade que não pertence ao SI é o **curie** (Ci). Foi definido como a atividade de 1,0 gramas do isótopo radiativo do Rádio ($^{226}_{88}\text{Ra}$), que decai via emissão alfa.

$$1,0 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

$$1,0 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci.}$$

O tópico sobre a incidência de radiação em seres humanos e seus efeitos nocivos é vasto e gerou uma grande variedade de unidades, algumas relacionadas somente a emissão e outras a dose efetiva absorvida pelos tecidos humanos.

Alguns autores apresentam também a unidade **rutherford** (Rd):

$$1,0 \text{ Rd} = 1,0 \text{ MBq.}$$

$$1,0 \text{ Bq} = 1,0 \mu\text{Rd.}$$

O Rutherford não é uma unidade SI de decaimento radioativo. Ele é definido como a quantidade de material radioativo na qual um milhão de núcleos decaem por segundo. Portanto, conforme descrito acima, ele é equivalente a um megabequerel e um becquerel é equivalente a um microrutherford.

2.13 Dose Absorvida

O número de decaimentos sozinho não é suficiente para medir os efeitos da radioatividade. Nesse sentido, bem mais importante é a dose de radiação absorvida. A unidade SI para a dose absorvida é o **gray** (Gy), definido em termos de outras unidades do SI como a absorção de 1 joule por quilograma de material absorvente:

$$1,0 \text{ Gy} = 1,0 \text{ J/kg.}$$

Outra unidade de dose absorvida não pertencente ao SI mas que é comumente usada é o **rad** (rad). Sua conversão para gray é simplesmente:

$$1,0 \text{ rd} = 0,01 \text{ Gy.}$$

$$1,0 \text{ Gy} = 100 \text{ rad.}$$

2.14 Exposição à Radiação

Para raios X e raios gama também é importante medir a quantidade de ionização (separação de elétrons de seus átomos previamente neutros). Essa grandeza é denominada exposição e é medida em coulomb/quilograma. A unidade comum usada como unidade de exposição, que não pertence ao SI, é o **roentgen** (ou röntgen) (R), que é definida, quando o material se encontra no ar, como:

$$1,0 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C}/(\text{kg}_{\text{ (de ar)}}).$$

Observe que é coulomb/quilograma de ar.

A exposição e a dose recebida são intimamente relacionadas, e, no caso de tecidos biológicos, encontramos que:

$$1,0 \text{ R} \cong 1,0 \text{ rad}.$$

Os danos aos tecidos biológicos dependem não apenas da energia depositada (a dose absorvida), mas também do tipo de partículas emitidas no decaimento nuclear. Tipos diferentes de radiação interagem de maneiras diferentes com a matéria, em particular com tecidos biológicos, e penetram a profundidades diferentes depositando sua energia.

Quando fótons penetram a matéria eles perdem energia exponencialmente em função da profundidade atingida dentro do material. Partículas alfa e núcleos pesados, por outro lado, perdem uma pequena fração de sua energia no ponto de entrada e depositam quase toda sua energia na sua máxima profundidade de alcance, o que é uma função da energia inicial. Dessa forma as partículas α com uma determinada energia inicial penetram todas até aproximadamente a mesma profundidade em tecidos biológicos e, então, depositam uma fração muito significativa de suas energias àquela profundidade. A Figura 7 mostra o perfil de deposição de energia em função da profundidade de penetração, d , para partículas alfa, elétrons, pósitrons e radiação gama.

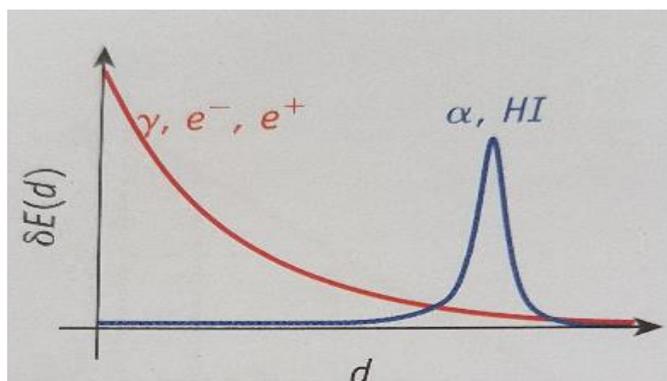


Figura 9 – Deposição de energia em função da profundidade de penetração para partículas alfa (e íons pesados) – curva azul. Elétrons, pósitrons e radiação gama (fótons e léptons) – curva vermelha. (BAUER, WESTFALL, DIAS 2013).

Em virtude da diferente deposição de energia em função da profundidade de penetração, uma partícula α é muito mais danosa à membrana das células de um determinado ser vivo do que um fóton de mesma energia.

Isto leva a introdução do **fator de peso**, w_t para a radiação. Ele vale 1,0 para todos os fótons, independentemente de sua energia:

$$w_{t_{\text{fótons}}} = 1,0.$$

Para prótons com energias superiores a 2,0 MeV:

$$w(E \geq 2,0 \text{ MeV})_{t_{\text{prótons}}} = 5.$$

Para nêutrons:

$$w(E \geq 2,0 \text{ MeV})_{t_{\text{nêutrons}}} = 5.$$

$$w(E \leq 20 \text{ MeV})_{t_{\text{nêutrons}}} = 5.$$

$$2,0 \text{ MeV} \leq w_{t_{\text{nêutrons}}} \leq 20 \text{ MeV} = 10.$$

Os nêutrons produzem mais danos no intervalo de energias entre 100 keV e 2 MeV (colisões elásticas), sendo o fator de peso neste caso:

$$100 \text{ keV} \leq w_{t_{\text{nêutrons}}} \leq 2,0 \text{ MeV} = 20.$$

O mesmo valor de fator de peso também é atribuído a partículas α e a núcleos pesados. Com tal fator de peso pode-se, então, medir a **dose equivalente**, que é o produto da dose absorvida pelo fator de peso.

$$\text{dose equivalente} = \frac{\text{dose absorvida}}{\text{fator de peso}}.$$

A unidade SI para a dose equivalente é o **sievert** (Sv), definida como:

$$1,0 \text{ Sv} = w_t(1,0 \text{ Gy}).$$

Novamente, uma unidade não pertencente ao SI é comumente usada, o **rem** (roentgen equivalent man, ou roentgen equivalente homem). Ele é definido como:

$$1,0 \text{ rem} = w_t(1,0 \text{ rad}).$$

Comparando as equações anteriores, podemos escrever que:

$$1,0 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}.$$

A Tabela 2 mostra de forma resumida o que foi descrito acima. Na quarta coluna estão expostos valores encontrados em trabalhos de medicina e biologia, manuais técnicos e artigos relacionados. Na quinta coluna estão os valores do Sistema Internacional (SI) encontrados nos

livros texto de cursos de graduação em Física e Engenharias e também em bibliografia da área técnica de radiologia e órgãos governamentais como o IPEN (IPEN, 2016).

Tabela 2. Unidades de Radioatividade (BAUER; WESTFALL; DIAS, 2013).

Quantidade	Unidade	Símbolo	Valor	Equivalente no SI
Atividade (A)	curie	Ci	$3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$	$3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
	becquerel	Bq	$1,0 \text{ s}^{-1}$	SI
	rutherford	Rd	10^6 s^{-1}	1,000,000 Bq
Exposição (X)	röntgen	R	$\text{esu}^*/0.001293 \text{ g de ar}$	$2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg de ar}$
Fluência (Φ)	(área recíproca)		m^{-2}	SI
Dose Absorvida (D)	erg**		$\text{erg} \cdot \text{g}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-4} \text{ Gy}$
	rad	rad	$100 \text{ erg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.010 Gy
	gray	Gy	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	SI
Dose equivalente (H)	röntgen equivalent man	rem	$100 \text{ erg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.010 Sv
	sievert	Sv	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \times w_t$	SI

*esu: unidade eletrostática de carga elétrica (electrostatic system of units).

**erg: unidade de energia.

Como citado anteriormente, esse tópico é vasto e a bibliografia específica sobre efeitos da radiação nos seres humanos e proteção radiológica ainda descreve outros tipos de interação da radiação. Os riscos associados aos efeitos estocásticos somáticos foram determinados a partir de dados experimentais com animais e aqueles obtidos em estudos de grandes grupos populacionais como os sobreviventes das explosões atômicas em Hiroshima e Nagasaki que receberam doses de radiação superiores a 0,1 Gy (10 rad), sendo linearmente extrapolados para doses mais baixas. Nesse contexto, o risco aceito mundialmente de morte de adultos por câncer induzido pela radiação é de 0,05/Sv. O valor do limite de dose anual estabelecido para um indivíduo adulto é de 20 mSv (2000 mrem)(IPEN, 2016)(Norma CNEN – NN – 3.01 de 13/03/2014):

Limite de dose de radiação para seres humanos adultos: 20 mSv/ano.

2.15 Doses e Efeitos da Radiação nos Seres Humanos

Normalmente, os efeitos da radiação dos livros textos e manuais técnicos estão em termos da dose absorvida (A), cuja unidade é o grey, $Gy = J/kg$. Para comparar doses absorvidas resultantes de diferentes tipos de radiação, estas precisam ser ponderadas por seu potencial de causar certos tipos de danos biológicos. Essa dose ponderada é denominada dose equivalente, a qual é avaliada na unidade sievert (Sv),

Tabela 3. Efeitos da Radio Exposição de Corpo Inteiro em Adultos

Dose Absorvida (A)	Sintomatologia
$A \lesssim 1,0 Gy$	Ausência de sintomas na maioria dos adultos.
$1,0 Gy \lesssim A < 2,0 Gy$	Astenia ⁶ , náuseas, vômitos.
$2,0 Gy \lesssim A < 4,0 Gy$	Função medular atingida: linfopenia, leucopenia, trombopenia, anemia. Recuperação: cerca de 6 meses.
$4,0 Gy \lesssim A < 6,0 Gy$	Função medular gravemente atingida.
$6,0 Gy \lesssim A < 7,0 Gy$	Diarreia, vômitos. Morte em 5 a 6 dias.
$7,0 Gy \lesssim A < 10,0 Gy$	Insuficiência respiratória, coma. Morte entre 14 a 36 horas.
$A > 10,0 Gy$	Colapso do sistema nervoso central. Morte em poucas horas

Fonte: PRINCÍPIOS BÁSICOS DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO RADIOLÓGICA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

Mas qual é a dose de radiação que um indivíduo recebe, em média, por ano na atmosfera terrestre? Aqui temos que considerar vários efeitos somados: radiação cosmogênica, do ambiente, tipo de trabalho efetuado e altitude (os radionuclídeos formados pela radiação cosmogênica interagem com a atmosfera, portanto, quanto maior a altitude, menor a camada atmosférica de proteção).

A Figura 7 a seguir ilustra a quantidade de radiação recebida/altitude medida para cidades nos Estados Unidos (BAUER, WESTFALL, DIAS 2013).

⁶ Astenia: Perda ou diminuição da força física

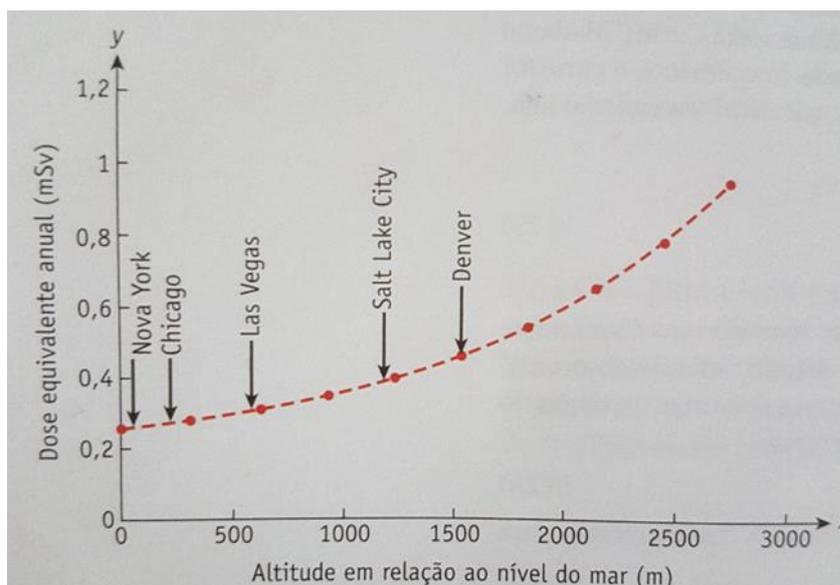


Figura 10 – Relação da radiação recebida com a altitude. (BAUER, WESTFALL, DIAS 2013).

Devido a condições climáticas e inclinação do globo terrestre e a outros fatores atmosféricos, no Brasil, nessas mesmas altitudes esses fatores devem ser próximos, mas não exatamente iguais. Em locais muito altos (por exemplo, em albergues nas montanhas) as doses anuais podem chegar a 1 mSv⁷.

Fontes de Radiação Naturais:

- Radônio (gás) – parte do ar que respiramos. Deposita essa radiação dentro dos pulmões. Esta radiação contribui com 2 mSv/ano para a dose equivalente.
- Ingestão de isótopos radioativos, principalmente o Carbono-14 ($^{14}_6\text{C}$) e o Potássio-40 ($^{40}_{19}\text{K}$) junto com os alimentos, outros 0,40 mSv/ano.
- A Terra em si (o planeta), com seus vários elementos pesados integrados às rochas contribui com 0,16 mSv/ano (litoral) e cerca de 0,30 mSv no continente.
- Locais onde há deposição de minérios mais pesados chegam a 0,63 mSv/ano.
- Raios X médicos: mais 0,50 mSv/ano.
- Raios X dentista: de 0,01 a 2,5 mSv/ano.
- Exames sofisticados do trato intestinal: 2,5 mSv/ano.
- Viagens áreas: 0,005 mSv/hora em média.

⁷ O sievert (Sv) é a unidade usada para dar uma avaliação do impacto da radiação ionizante sobre os seres humanos.

<Fonte: BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. Física para Universitários – Óptica e Física Moderna, 2013>

Outras fontes diminutas de radiação

TV, Computador, lâmpada a gás de acampamento, detectores de fumaça.: 0,1 mSv/ano.

Dose equivalente total/ano

A dose equivalente total, nos EUA, é de 3,6 mSv/ano.

Essa é diferente no Brasil: 2,4 mSv/ano (CNEN, 2013).

Atividades em ambientes normais ou propício à radiação

As pessoas que trabalham com fontes de radiação como médicos e técnicos radiologistas, engenheiros, físicos e técnicos de usinas nucleares e dentistas são monitoradas para que sua dose anual não exceda os 50 mSv/ano. Isto é cerca de 15 vezes maior do que a dose de fontes ambientais, para os padrões Norte Americanos. Em um exame de raio X de tórax (maior incidência de raios X em exames desse tipo), o paciente recebe cerca de 60 μ Sv (CNEN, 2013). Comparando com a dose anual média dos Estados Unidos e do Brasil:

$$\begin{array}{l} \text{Estados Unidos:} \\ \text{Brasil} \end{array} \quad : \quad \begin{array}{l} \frac{3,6 \text{ mSv/ano}}{60 \mu\text{Sv}} = \frac{60}{\text{ano}} \\ \frac{2,4 \text{ mSv/ano}}{60 \mu\text{Sv}} = \frac{40}{\text{ano}} \end{array}$$

Isto é, a dose anual de radiação natural é cerca de 40 vezes maior do que uma incidência de raio X de tórax para os padrões brasileiros e cerca de 60 vezes maior para os padrões Norte Americanos. Ou, em outras palavras, são necessários 40 exames (Brasil) e 60 exames (Estados Unidos) de raio X do tórax para ter uma dose equivalente ao que absorvemos, em média, do ambiente no período de um ano.

2.16 A Câmara de Wilson como Detector de Partículas: a formação do rastro na Câmara de Wilson

São vários os detectores de partículas existentes atualmente. Nesse TCC utilizamos um detector de partículas chamado de Câmara de Wilson.

A Câmara de Wilson, também chamada de Câmara de Nuvens é um detector de partículas usado para visualizar a passagem de radiação ionizante. O dispositivo consiste de um ambiente contendo vapor supersaturado de água ou álcool. Quando uma partícula eletrizada (por exemplo, partículas alfa, beta, prótons, múons, ...) interage com a mistura gasosa, desprende elétrons das moléculas do gás via forças eletrostáticas durante as colisões e o resultado é uma trilha deixada pelas partículas do gás ionizadas por onde a partícula passou.

Os íons resultantes agem como centros de condensação em torno dos quais uma trilha de pequenas gotículas se formam se a mistura gasosa estiver no ponto de condensação. Estas gotículas são, então, visíveis e por onde a partícula passou se forma uma trilha dessa “nuvem” de gotículas que persiste por vários segundos enquanto elas caem através do vapor. Estas trilhas têm formatos característicos. Por exemplo, o traçado ou trilha de uma partícula alfa é espesso e reto enquanto que a trilha de um elétron é fraca e mostra mais evidência de deflexões devido a colisões.

2.17 Objetivos do presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)

Assuntos sobre radioatividade, exposição à radiação, física nuclear e decaimento nuclear sempre atraíram a atenção do público em geral desde a Segunda Guerra Mundial, quando as cidades de Hiroshima e Nagasaki foram atingidas por bombas nucleares (uma bomba em cada cidade).

Entretanto, também se observa que o público leitor deste assunto ainda faz confusão com as relações: energia nuclear \times armas nucleares, radiação \times ionização, radiação ambiente \times radiação acidental \times efeitos da radiação.

Nesse trabalho de conclusão de curso, abordasse somente uma pesquisa qualitativa sobre o experimento da Câmara de Nuvens, com o objetivo de explorar o material produzido e analisar os fenômenos físicos presentes, para que, futuramente alunos tenham um contato com o ensino de física de partículas, podendo abranger o ensino fundamental até o nível médio, pois o que importa nesse aspecto é o primeiro contato com os experimentos de física, gerando preconcepções sobre o tema e que possam levar esse assunto no seu âmbito social.

Dessa forma, esclarecer o que é radiação, de que formas ela aparece e como pode ser usada em benefício da humanidade. O elemento motivador para esse trabalho foi a construção de um aparato de baixo custo para o estudo demonstrativo da Física de partículas, pois o mesmo permite visualizar algumas das partículas presentes no ambiente e nas construções humanas. Essas partículas são observadas em uma Câmara de Wilson, construída para essa finalidade. A Câmara de Wilson que foi o primeiro dispositivo que permitiu ver as partículas de uma desintegração nuclear WATSON (1945).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Porque trabalhar Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio?

Segundo Moreira (2016, p. 23-48), desenvolver e despertar a curiosidade dos estudantes sobre assuntos pertinentes da Física moderna e Contemporânea, facilitar a reconhecer a Física como um desenvolvimento humano e social é algo que demanda uma grande compreensão do assunto por parte do professor, esperando dedicação e horas de desenvolvimento para planejar os conteúdos, que na maioria das situações,

Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata; mas, resultados de pesquisa em ensino de Física têm mostrado que, além da Física Clássica ser também abstrata, os estudantes apresentam sérias dificuldades conceituais para compreender. Moreira (2016, p. 23-48)

Conforme Moreira *apud* Stannard (1990) justifica a atualização curricular ao relatar um levantamento feito com estudantes universitários que mostrou que é a Física Moderna - relatividade restrita, partículas Investigações em Ensino de Ciências elementares, teoria quântica, astrofísica - que mais os influencia na decisão de escolher a Física como carreira.

Em outro estudo, com o objetivo de preparar um livro introdutório sobre relatividade geral, o autor entrevistou 250 crianças de cerca de 12 anos para saber o que elas conheciam sobre tópicos relevantes ao assunto (gravidade, aceleração). Surpreendentemente, encontrou que um terço já havia ouvido falar em buracos negros e tinha uma vaga ideia do que se tratava. Um número razoável relacionava Big Bang com origem do universo. Elas mostraram-se intrigadas por estes tópicos e desejavam saber mais a respeito. O que sabiam, haviam aprendido pela televisão e através de filmes de ficção científica (e não sabiam que tais ideias interessantes vêm “sob o rótulo” de Física) Moreira (2016, p. 23-48).

Moreira (p. 23-48, 2016), cita também a defasagem nos currículos de ensino de física, deparando-se com uma metodologia que rege o estudo da física somente o da época de 1900, fazendo analogia que ao parecer nada foi estudado ou desenvolvido depois desse tempo, dando ênfase somente ao estudo da Física clássica no ensino médio.

Segundo Moreira *apud* Stannard (2016), uma análise nos currículos secundários de Física foi realizada, e critica-os por darem a impressão de terem sido escritos há cem anos (como se nada tivesse ocorrido na Física deste século). O autor sugere que sejam escritos livros e textos com abordagens inovadoras de FMC como forma de encorajar a revisão curricular.

Para Moreira *apud* Terrazan (2016, p. 23-48), “a tendência de atualizar-se o currículo de Física justifica-se pela influência crescente dos conteúdos contemporâneos para o

entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a necessidade de formar um cidadão consciente e participativo que atue nesse mesmo mundo”.

A Física moderna contemporânea (FMC) é relevante nos dias atuais, fazendo parte do cotidiano da sociedade contemporânea, principalmente no ensino médio como um desenvolvedor de ideias e buscas pelo conhecimento, relacionando com o mundo que o cerca, e o indivíduo ao ter contato com assuntos que envolvam a Física Moderna e Contemporânea (FMC), desenvolve uma capacidade cognitiva de potencializar um senso crítico sobre esses assuntos, também ressalta que a introdução da FMC⁸ no currículo das escolas pode proporcionar a superação de certas barreiras epistemológicas fundamentais para o conhecimento do indivíduo sobre a natureza. Moreira (2016, p. 23-48).

3.2 O ensino de física moderna e experimental no âmbito escolar

O Ensino Médio, conforme a Lei de Diretrizes e Bases Nº 9.394 (1996) compreende a etapa final da educação básica, e sua finalidade é a consolidação e aprofundamento dos conhecimentos adquiridos no ensino fundamental, possibilitando o prosseguimento dos estudos. A preparação básica para o mercado de trabalho também busca desenvolver a cidadania, para que o indivíduo possa se adaptar com flexibilidade a novas condições de ocupação ou aperfeiçoamento posteriores.

O ensino de física está em um processo de melhoramento, e a ideia de inserção da Física Moderna nos livros didáticos e nos currículos do ensino médio é uma boa proposta, mas entende-se que a carga horária das disciplinas de física no ensino médio é muito escassa para introduzir todo esse conteúdo, pois há uma diminuição da carga horária nas disciplinas de Física, o que é uma grande frustração para os professores, pois pelo fato de ter muito conteúdo para trabalhar no ano letivo e pouca carga horária oferecida.

Segundo o Plano Nacional de Educação Lei Nº 13.005, que prediz das partes estratégicas que o professor deve utilizar em sala de aula é,

Institucionalizar programa nacional de renovação do ensino médio, a fim de incentivar práticas pedagógicas com abordagens interdisciplinares estruturadas pela relação entre teoria e prática, por meio de currículos escolares que organizem, de maneira flexível e diversificada, conteúdos obrigatórios e eletivos articulados em dimensões como ciência, trabalho, linguagens, tecnologia, cultura e esporte, garantindo-se a aquisição de equipamentos e laboratórios, a produção de material didático específico, a formação continuada de professores e a articulação com instituições acadêmicas, esportivas e culturais.

⁸ FMC= Física Moderna e Contemporânea, segundo a Wikipédia é a denominação dada ao conjunto de teorias surgidas no começo do século XX, principiando com a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade e as alterações no entendimento científico daí decorrentes, bem como todas as teorias posteriores.

<Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/F%C3%ADsica_moderna>

Para Barcellos e Guerra (2015, p. 331) a introdução de temas e conteúdos que propiciam o conhecimento de tópicos de física moderna, é de interesse na educação básica e está presente nos documentos oficiais como por exemplo, currículos, diretrizes e parâmetros, e também na inclusão dos manuais didáticos, pois como consta no Programa Nacional do Livro Didático (PNLD).

Há décadas a comunidade de pesquisa em Ensino de Física aponta a necessidade de inovações, transformações e melhorias no ensino praticado na grande maioria das escolas brasileiras. Embora as compreensões não sejam homogêneas, assim como os indicativos e o entendimento sobre o que constituem “melhorias” e sobre o que deveria ser o Ensino de Física, há uma tendência que se consolidou bastante, principalmente nas últimas décadas: a inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (EM) (Barcellos e Guerra, 2015, p. 331).

Segundo Machado e Nardi (2006, p. 474), entende-se que o nível do ensino médio tem se propagado para o foco do estudo física clássica construída no século XVI e XVII, com base na mecânica newtoniana, na termodinâmica e no eletromagnetismo, e apesar das profundas constantes modificações na área do ensino da física, os conteúdos de Física Moderna é pouco trabalhado pelos professores no ensino médio, pois se constrói a ideia de que os alunos não têm a capacidade de entender esse conteúdo.

Analisando a atual situação desta fase de ensino, observa-se que a introdução destes tópicos de física, ocorre em um processo lento no ensino médio, onde o indivíduo não apresenta um grande interesse no que diz respeito ao conteúdo da área da ciência, mas entende-se que, em virtude do PCN, torna-se fundamental que o aluno conheça os tópicos de física moderna para os processos seletivos (Enem, vestibulares) e para o ingresso em cursos superiores (ROCHA, C. R, 2015).

Machado e Nardi ressalta dizendo que,

Embora os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino médio proponham o enriquecimento dos currículos com a incorporação de noções sobre a física moderna e a maneira peculiar como se constroem conhecimentos no campo da Ciência, seu efeito tem sido fracamente sentido na maior parte dos estabelecimentos de ensino (Machado e Nardi, 2006, p. 475).

Para Machado e Nardi (2006, p. 473-485), um desencadeamento de fatores contribuiu significativamente para a descoberta de novas concepções sobre espaço, tempo, massa e energia, o entendimento da estrutura do átomo e a própria compreensão da evolução e origem do universo.

A inserção da ciência na sociedade é de fato um tópico importante, pois além de trazer desenvolvimento, contribui para o avanço de novas tecnologias. Mas sabe-se que em todo avanço tecnológico ocorre impactos sociais e ambientais trazidos por esse progresso. Os

aspectos positivos são inúmeros nesse contexto de desenvolvimento científico e tecnológico, como por exemplo, na área da saúde e medicina, áreas de transportes e telecomunicações, energia nuclear entre outros benefícios. Toda essa contribuição gera também efeitos negativos na sociedade, incluindo a poluição dessas tecnologias, guerras, armas de destruição em massa, entre outros fatores (Machado e Nardi, 2006).

3.3 O desenvolvimento histórico e conceitual da câmara de nuvens

D´Andrea (D´ANDREA, 2014) desenvolve uma câmara de Wilson eletrônica para utilização em sala de aula no Ensino Médio. Para ele, a introdução do tópico de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no currículo do Ensino Médio evidenciou a necessidade de adequar as atividades didático-pedagógicas em sala de aula, com o intuito de reposicionar a atitude cognitiva e interpretativa do aluno. Segundo D´andrea, quando o fenômeno físico pode ser interiorizado, através dos sentidos dos alunos, isto irá substanciar as considerações teóricas envolvidas no assunto. Para isso, ele elaborou uma câmara de Wilson Eletrônica, sem a necessidade do gelo seco (dióxido de carbono sólido) e do álcool isopropílico. Seu dispositivo contorna esse problema o efeito de resfriamento por estado sólido com módulos termoeletrônicos (chamado de Efeito Peltier), o que facilita seu transporte e uso em sala de aula.

As descobertas do nêutron e da radioatividade artificial, no início da década de 1930, possibilitou aos físicos e químicos da época novas possibilidades de investigação dos núcleos, tanto em nível teórico quanto experimental. No começo do século XX, as pesquisas em radioatividade evidenciaram que certos elementos, chamados radioativos, transformavam-se em outros, emitindo partículas alfa (átomos de hélio duplamente ionizados), partículas beta (elétrons) e raios gama (processo radioativo natural e espontâneo (Machado e Nardi, 2006).

Segundo Xavier et al (p. 83-91, 2007), pela teoria prevista por P. A. M. Dirac em 1928, foi comprovada a existência do “elétron positivo” por C. D. Anderson em 1932, em estudos das interações dos raios cósmicos em uma câmara de nuvens (“cloud chamber”), que também sugeriu o nome “pósitron” para esta nova entidade. O pósitron, similar às partículas α e β , é encontrado nas desintegrações de radionuclídeos artificiais.

Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959), Físico Escocês, foi idealizador e construtor de um dispositivo capaz de observar partículas ionizadas conhecido como Câmara de Wilson. Wilson era descendente de uma linhagem de fazendeiros próximos a Edimburgo, capital da Escócia. Ele dividiu igualmente o Prêmio Nobel de Física de 1927 com o colega Arthur Holly Compton. Compton, pela descoberta do efeito que levaria seu nome e Wilson pelo método de estudo do traçado de partículas carregadas tornadas visíveis pela condensação de vapor⁹.

⁹ C.T.R. Wilson – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2018. Tue. 30 Oct 2018. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/wilson/biographical/>>

As contribuições de C. T. R. Wilson no campo da eletricidade atmosférica são abundantes e diversas.

Williams (2010) fez um extenso estudo e revisão das publicações, notas pessoais e correspondência de C. T. R. Wilson para entender suas concepções em torno da ideia da trajetória dos elétrons e outras partículas carregadas nas nuvens de tempestades. Segundo este mesmo autor, a câmara de nuvem de expansão, desenvolvida e refinada sobre um período de quase cinquenta anos foi de importância fundamental. Os hábitos de pesquisa de Wilson se caracterizavam por um padrão que se alternava entre o trabalho no laboratório, desenvolvendo a câmara e as observações de campo.

Segundo Pinheiro (p. 517-528, 2015), o autor apresenta de forma sucinta e sem detalhes a construção e utilização de uma câmara de nuvens como forma de introduzir e motivar temas para a discussão na sala de aula de Física no âmbito do Ensino Médio. Segundo o mesmo, a contextualização histórica vem do fato de a câmara de nuvens ser o primeiro detector com capacidade de mostrar traços produzidos por partículas subatômicas, não visíveis a olho nu.

Atualmente, mesmo com os grandes detectores de partículas como o CMS (*Compact Muon Solenoid*) e o ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*), entre outros experimentos, que fazem parte do CERN (*Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear*), os dispositivos tipo câmara de Wilson (câmaras de nuvens) ainda são utilizados para mostrar uma visualização da interação da radiação com a matéria, isto é, para mostrar como uma partícula ionizada interage com as demais em seus caminhos. Há dispositivos de Câmara de Nuvens para fins demonstrativos em alguns museus, na observação dos raios cósmicos – chuveiros de partículas que penetram na atmosfera terrestre vindas do cosmo. PINHEIRO (p. 517-528, 2015)

4. METODOLOGIA

4.1 Produção do material de baixo custo

Para a construção da câmara de Nuvens ou câmara de Wilson, utilizou-se referências bibliográficas, buscando materiais de baixo custo e de fácil acesso ou montagem. Também foi de grande importância o acesso a websites como o *youtube*, que possibilitou um esclarecimento na montagem e na visualização do fenômeno físico em si. Utilizamos duas fontes confiáveis (CERN e BBC), que proporcionaram conceitos esclarecedores sobre o assunto. O material encontrado em ambas as pesquisas fez diferença para a estruturação do experimento, como qual tipo de câmara ou caixa para compra, características dos materiais, a vedação da câmara, a utilização de um orifício para a colocação do gelo seco e o tipo de álcool que foi utilizado.

No primeiro momento, a ideia era construir a caixa de acrílico manualmente, mas demandaria um grande tempo e a montagem poderia ficar irregular ou romper as laterais da caixa, o que tornaria por fim o custo do projeto inviável. Então optou-se pela compra de um aquário, adquirido em lojas de agropecuária.



Figura 11 – Aquário de vidro comprada em agropet.

O segundo passo foi a construção da estrutura para o depósito do gelo seco que fica abaixo da placa metálica da câmara. Para isso utilizou-se de blocos de isopor, pois é um ótimo isolante térmico e de fácil acesso e custo para compra e manuseio. O isopor foi adquirido em lojas de ferramentas para escritório e papelaria. O objetivo dessa estrutura é para que o gelo seco dure tempo suficiente, mesmo em condições extremas de calor, como, por exemplo no verão e em lugares de grande altitude, como montanhas ou serras, pois a quantidade de radiação atmosféricas nesses lugares está com altíssimo índice para a observação do fenômeno físico.

Os materiais utilizados para a elaboração da fenda foram,

- Blocos de isopor
- Estilete
- Régua milimétrica
- Caneta marca texto
- Pincel
- Tinta isolante na cor fosca.



Figura 12a, 12b –Estilete no lado esquerdo (A) e tinta isolante na cor preto fosco do lado direito (B).

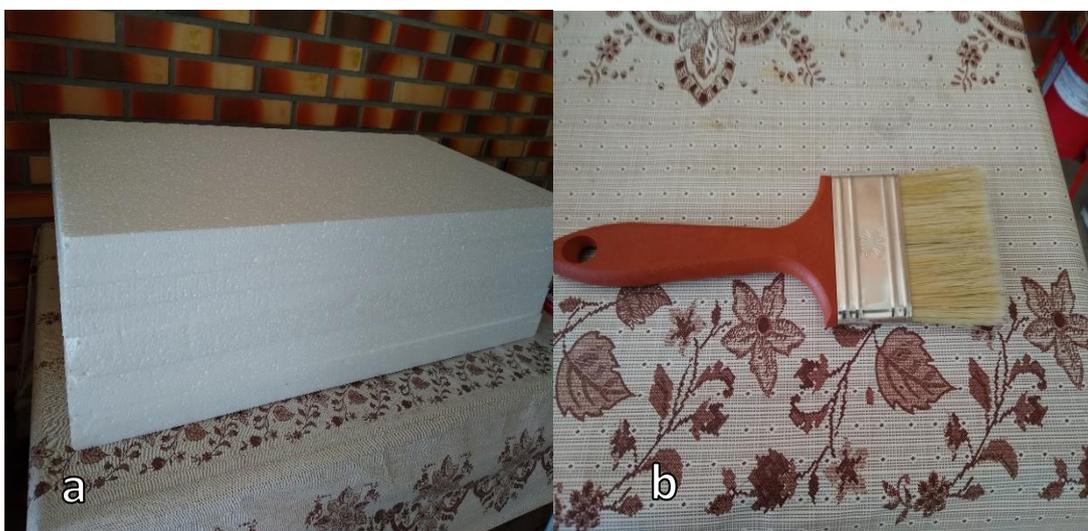


Figura 13a, 13b –Blocos de isopor do lado esquerdo (C) e pincel na parte direita da figura (D).

O objetivo da tinta na cor fosca serve para que o rastro das partículas fique bem claro na filmagem, pois o álcool condensa a partícula, gerando um vestígio branco, então todo material deverá ter uma composição escura, evitando reflexos.

No próximo passo foi elaborar a fenda para o depósito do gelo seco, o qual foi cortado na proporção do vidro de aquário, para que se encaixasse perfeitamente e não transcorresse o

vazamento do gás do gelo seco, tendo o objetivo de prolongar a duração do experimento. Utilizou-se quatro blocos de isopor, na qual dois dos quatro blocos foram cortados e os outros dois restantes serviram como chão de depósito do gelo seco. Para colar os blocos de isopor, utilizou-se da mesma tinta que foi pintada toda a estrutura do bloco.

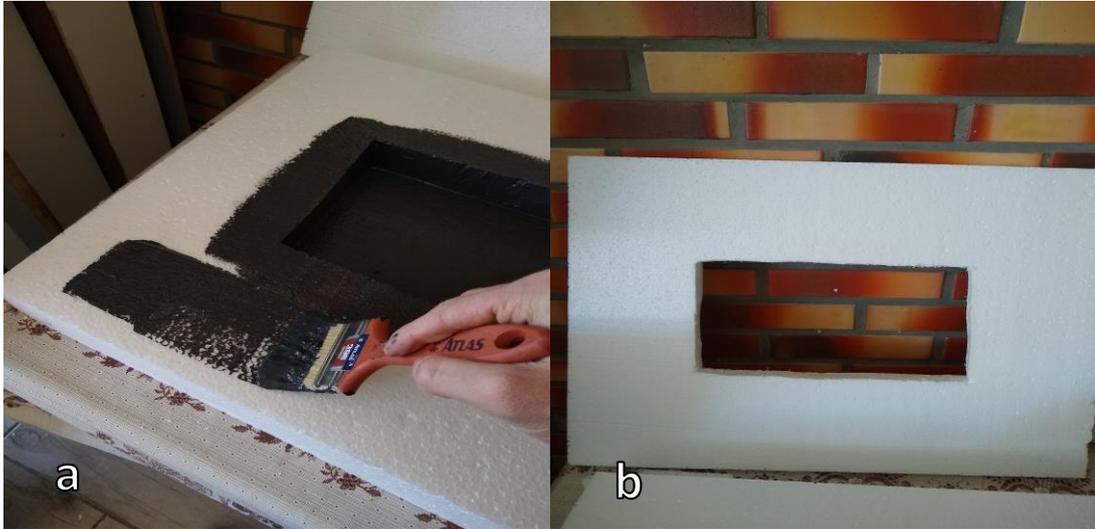


Figura 14a, 14b –Elaboração da pintura sobre o isopor 11a e na figura 11b efetuou o corte no isopor.

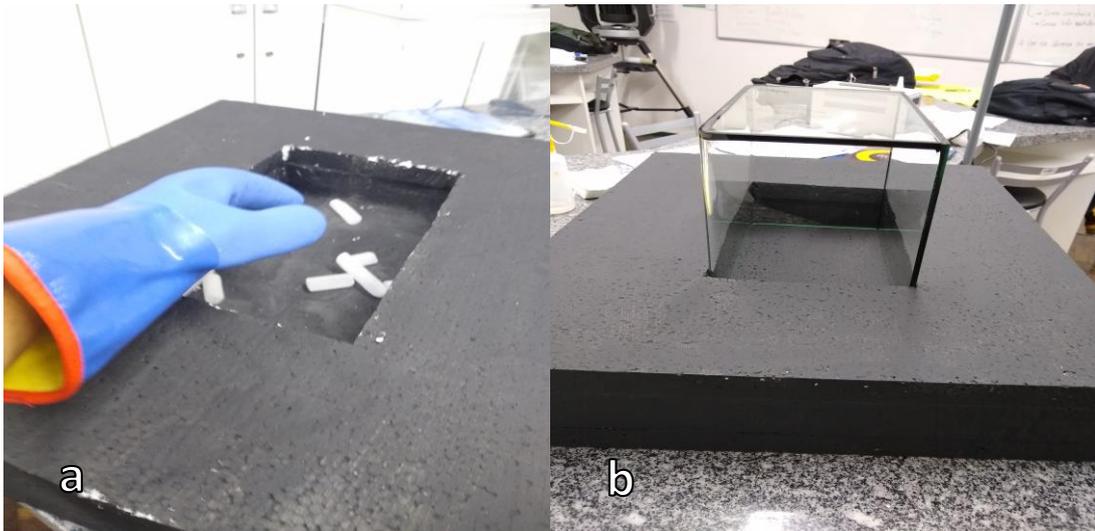


Figura 15a, 15b –demonstração final da fenda com gelo seco no lado esquerdo 12(c) e do lado direito a caixa de acrílico sobre a fenda 12(d).

Por último, o material que demandou tempo para a elaboração foi a chapa de metal que lacra o recipiente de vidro, pois é o componente mais importante para o funcionamento correto da Câmara de Wilson. No primeiro teste, utilizou uma tampa de gabinete de computador, a qual foi talhada manualmente com uma serra de corte de metais. O resultado não foi o esperado e o equipamento saiu com muitas falhas e brechas para encaixar no recipiente de vidro.



Figura 16–tampa de gabinete de computador entalhada manualmente, processo de falha no experimento.

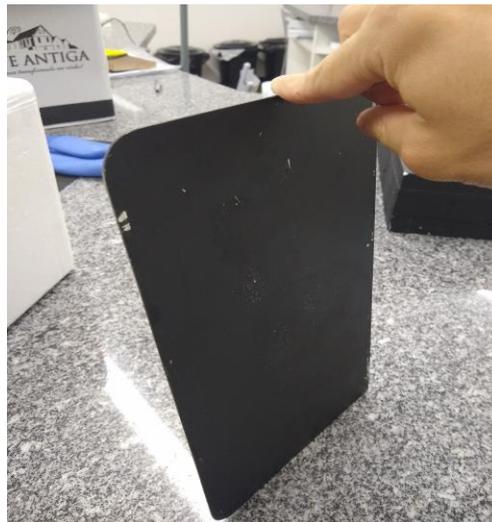


Figura 17–Chapa de aço inox fabricada e manuseada em uma metalúrgica da região.

A solução foi optar por uma indústria metalúrgica que cortou o metal, encaixando perfeitamente sobre o aquário. O custo da chapa de aço inox foi o total de 16 reais.

5. FUNCIONAMENTO E MONTAGEM DA CÂMARA DE NUVENS

Na primeira montagem da câmara de nuvens, utilizou a chapa de gabinete de computador e gelo seco extraído de um extintor de CO₂, e na maioria dos artigos científicos nenhum explica que a câmara de nuvens deve ser lacrada perfeitamente para que o mesmo funcione. Então na primeira tentativa ocorreu a falha e nenhum fenômeno físico aconteceu. Na segunda instância optou-se por utilizar o CO₂ pressurizado (gelo seco) e de alta qualidade, o

qual foi adquirido em uma fábrica da região de Porto Alegre. Colocou-se na fenda o CO₂ e depois prendemos na parte superior do recipiente de vidro o TNT, que seria semelhante a um pano, para que o álcool fique sobre a camada da superfície por mais tempo. Preenchemos com álcool isopropílico a uma quantia razoável de 100 mL sobre a camada de tnt.



Figura 18a, 18b–Fenda preenchida com gelo seco no lado direito e no lado direito a colocação de álcool isopropílico sobre o feltro na câmara de acrílico.

A última etapa do experimento é a vedação da câmara. Colocou-se sobre o recipiente de vidro a chapa de aço inox e aplicou-se a fita isolante. Depois dessa montagem, colocamos o recipiente de vidro sobre a fenda que continha o CO₂ pressurizado e esperou em média 10 minutos para que a pressão da câmara baixasse e a temperatura na chapa de inox alcançasse - 50° celsius na parte inferior da câmara e 20° celsius na parte superior, para que o álcool isopropílico se condensasse dentro da câmara.

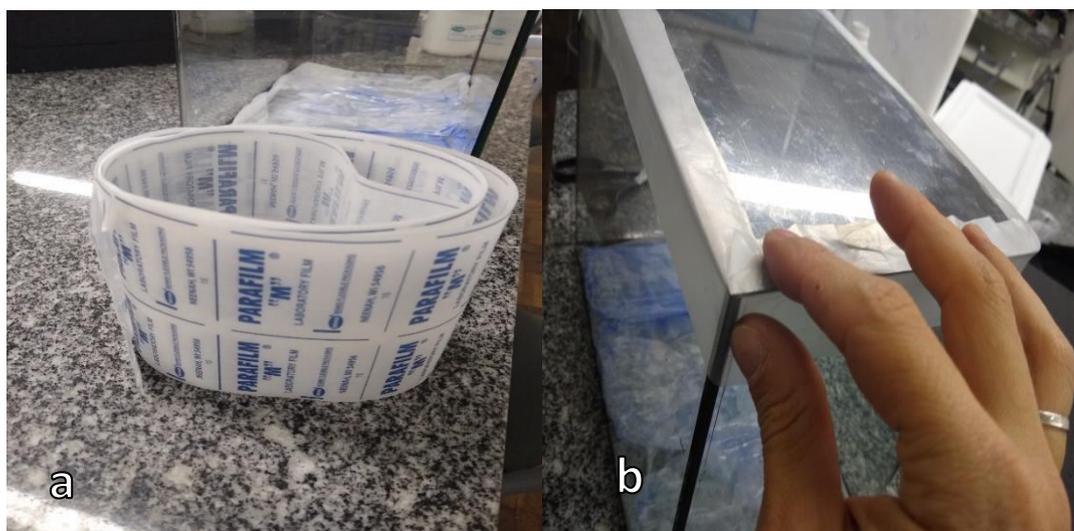


Figura 19a, 19b–Fita parafilme do lado esquerdo da imagem 16(a) e do lado direito 16(b) a vedação da câmara utilizando a fita parafilme.

Depois do processo de vedação da câmara, colocou-se o recipiente de vidro sobre a fenda que continha o gelo seco pressurizado (CO₂). Depois de 10 minutos, o processo de pressurização da câmara estava completo e o álcool isopropílico começou com o ciclo de condensação.



Figura 20– Nessa imagem a câmara de nuvens estava finalizada e pronta para o uso do experimento.

Abaixo encontra-se uma tabela ordenando os valores e os materiais utilizados,

Tabela 4. Valores dos materiais trabalhados na câmara de nuvens

Material	Quantidade	Valor unitário	Valor Total
Aquário curvo	1	R\$ 90	R\$ 90
Blocos de isopor	4	R\$ 4	RS 16
Chapa de aço inox	1	R\$ 20	R\$ 20
Fita parafilme	1	R\$ 99	R\$ 99
Gelo seco	1 kg	R\$ 8/kg	R\$ 8
Álcool Isopropílico	100 mL	R\$ 16	RS16
Pincel	1	R\$ 7,50	R\$ 7,50

Estilete	1	R\$ 8,50	R\$ 8,50
Tinta Maxxi Rubber 900 mL	1	R\$ 19,50	R\$ 19,50
VALOR TOTAL			R\$ 284,50

6. DISCUSSÕES

A câmara de nuvens obteve resultados positivos e foi possível registrar traços de partículas carregadas, sendo que existem duas principais fontes de emissão de radiação que podem ser observadas: material radioativo e raios cósmicos. Entende-se a preocupação em não utilizar uma fonte radioativa pelos motivos de segurança e manuseamento do mesmo. Optou-se nesse trabalho em realizar as atividades com raios cósmicos.

Na tabela abaixo está esquematizado as características das partículas mais comuns que podem ser observadas na Câmara de Wilson,

Tabela 5. Descrição das partículas que comumente atravessam a câmara de nuvens (LAGANA, 2011).

Nome	Símbolo	Massa (MeV/c ²)	Vida Média
Elétron	e	0.51	∞
Múon ¹⁰	μ	105	2.2×10^{-6} s
Próton	p	938	$> 2.1 \times 10^{29}$ anos ¹¹
Pion	π	138	2.6×10^{-8} s

Na figura abaixo está esquematizado uma partícula carregada arrancando elétrons das gotículas de álcool, uma imagem fictícia, utilizando uma fonte radioativa.

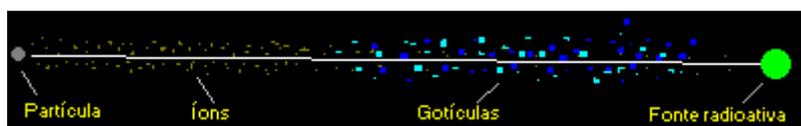


Figura 21 – partícula carregada atravessa as gotículas de álcool, formando o rastro.
Fonte: <http://www.seara.ufc.br/sugestoes/fisica/espec3.htm>

¹⁰ Múons foram descobertos por Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer no Caltech, em 1936, ao estudar a radiação cósmica. Carl Anderson tinha notado partículas que se curvavam de um jeito diferente dos elétrons, chamados de múons.

<<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.52.1003>>

¹¹ O Próton é considerado uma partícula estável e não decai.

< Fonte: BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. Física para Universitários – Óptica e Física Moderna, 2013 >



Figura 22—partícula carregada de alta energia formando um rastro longo ao decorrer do percurso.

6.1 Prótons

Prótons livres de alta energia e velocidade compõem 90% dos raios cósmicos, que se propagam no vácuo em distâncias interestelares. Prótons livres são emitidos diretamente de núcleos atômicos em alguns tipos raros de decaimento radioativo. Prótons também resultam (junto com os elétrons e os antineutrinos) do decaimento radioativo de nêutrons livres, que são instáveis.

7. RESULTADOS

7.1 Partículas de baixa energia

As partículas de baixa energia são constantemente presentes no experimento da câmara de nuvens e são muito presentes nos raios cósmicos. As características de uma partícula de baixa energia são os desvios que ela sofre durante a passagem sobre o vapor de álcool, com um valor energético considerável de 0.05 MeV.

A características das partículas de baixa energia foram os espalhamentos ou desvios que são proporcionais conforme sua energia, que, quanto menor a energia do elétron, maiores as chances de sofrer uma colisão, dando origem aos desvios na trajetória.

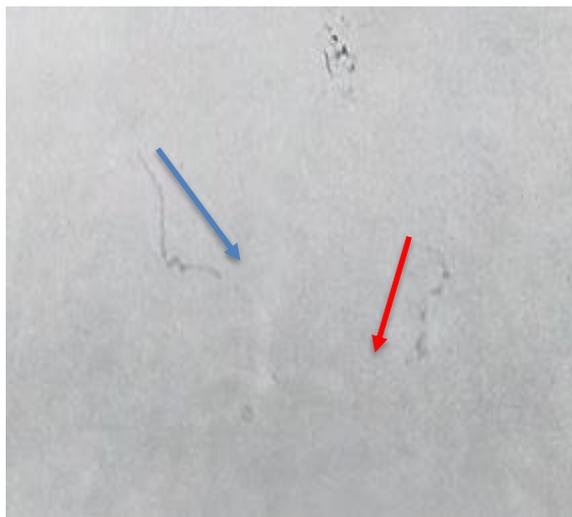


Figura 23–Obtenção de duas partículas de baixa energia, ocorrendo duas trajetórias de desvio, com setas em azul no lado esquerdo e em vermelho no lado direito da imagem.

7.2 Elétrons de ionização

Quando uma partícula energética passa próxima a um átomo, ela pode arrancar algum de seus elétrons, dando origem a um elétron de ionização (Fig. 24). Elétrons de ionização são comuns, e compõem a maior parte das partículas de baixa energia (≈ 0.05 MeV) observadas na câmara.

Na imagem abaixo foi possível obter imagens que mostravam os elétrons de ionização no momento do experimento, de acordo com a figura abaixo, e têm uma característica única de bifurcação do elétron no momento da passagem sobre o vapor de álcool, percorrem alguns centímetros até depositar toda sua energia no vapor de álcool e terminar o seu trajeto brevemente.

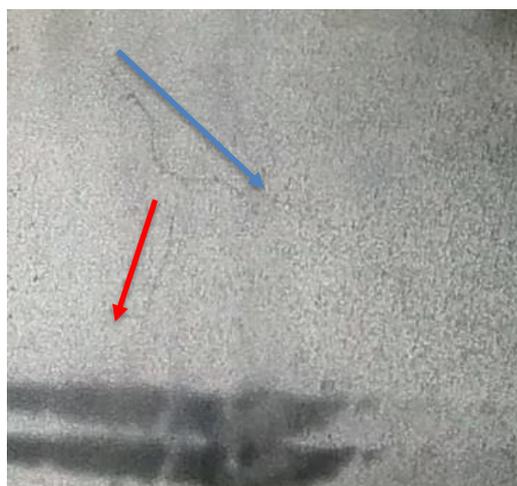


Figura 24– Nessa imagem, observe a seta azul indicando a partícula vindo da esquerda, produzindo um elétron de ionização, que foi para baixo (seta vermelha) dando origem à separação no traço.

7.3 Prótons

Os prótons têm uma característica intrínseca: sua passagem pelo vapor de álcool é reta e extremamente forte e algumas dessas partículas podem, raramente, atingir o nível do mar.

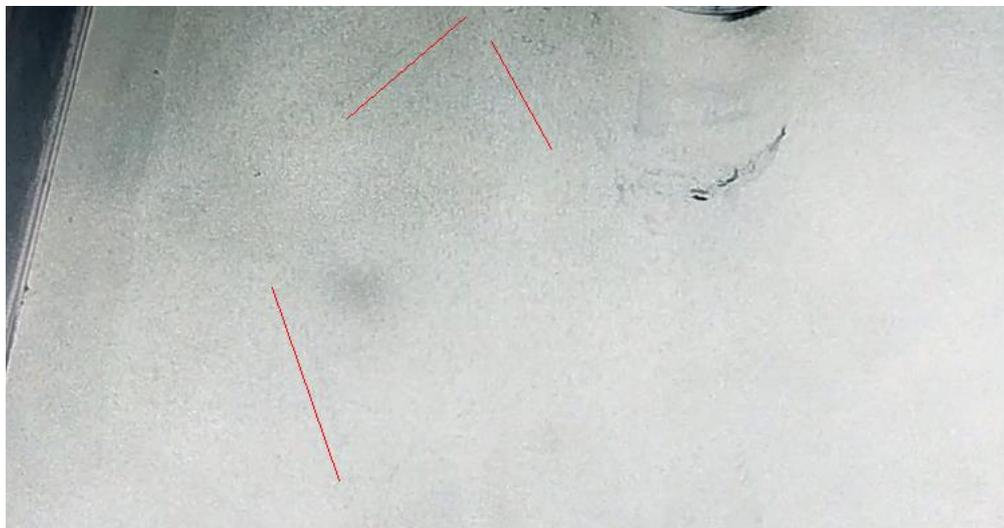


Figura 25– Traços em vermelho indicam a passagem de próton sobre o vapor de álcool, formando uma linha grossa e reta, mas com um comprimento menor do que uma partícula de alta energia e uma maior densidade na linha do vapor.

7.4 Partículas de alta energia

As partículas de alta energia estão abundantemente presentes nos raios cósmicos e têm uma característica única, formando um traço reto e longo na sua passagem, com altíssima energia ($T > 100 \text{ MeV}$)¹², e devido a essa energia decorrente de $T > 100 \text{ MeV}$, não transcorre desvios em sua trajetória, obtendo menos chances de colidirem com as moléculas do vapor de álcool.

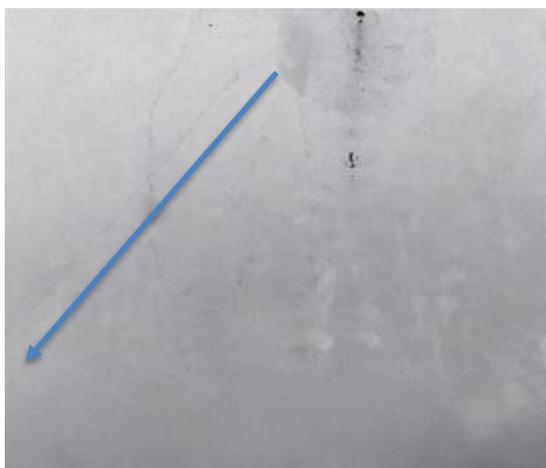


Figura 26–partícula de alta energia não sofre desvio durante sua trajetória devido a sua alta energia (seta em azul).

¹² T é a energia cinética da partícula carregada.

8 CONCLUSÃO

Constata-se a importância de abordar temas pertinentes para as aulas de Física no ensino médio e de desenvolver métodos que facilitam a aprendizagem dos alunos e modificar a concepção de certos assuntos relevantes como a Radiação, que por falta de conhecimento, leva o discente a acreditar que somente há malefícios para a sociedade.

Este trabalho têm o objetivo, de que, futuramente possa ser utilizado esse experimento de detector de partículas de baixo custo para desenvolver aulas demonstrativas nas escolas públicas do ensino médio e possivelmente também no fundamental, pois como dito, o importante é o aluno ter um primeiro contato com o experimento e abordar uma breve introdução do conteúdo. Como descrito no TCC, uma das maiores dificuldades de aplicar aulas experimentais é desenvolver um material que seja de baixo custo e que tenha uma montagem acessível para o professor. As maiores dificuldades na montagem da Câmara de nuvens tiveram dois pontos fundamentais, o selamento da Câmara de acrílico com a chapa de aço inox e a busca pelo gelo seco, pois esse material não está presente em todos os lugares para comércio.

Conclui-se que o experimento foi demonstrativo e funcionou perfeitamente como esperado, sendo um ótimo experimento para ser elaborado em aulas de física experimental, conciliando a teoria com a prática.

9 REFERÊNCIAS

- BARCELLOS, M.; GUERRA, A.; **inovação curricular e física moderna: da prescrição à prática**. Revista Ensaio; v.17, p. 329-350, 2015.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; DIAS, H. **Física para Universitários – Óptica e Física Moderna**. AMGH Editora Ltda. Porto Alegre. 2013.
- BRASIL. **Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais da Educação Básica** / Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. Diretoria de Currículos e Educação Integral. Brasília: MEC, SEB, DICEI, 2013.
- BRASIL. Lei nº9.394, de 20 de dezembro de 1996. **Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional**. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 20 dez. 1996. Disponível em:. Acesso em: 07/12/2016.
- BRASIL. **Plano Nacional de Educação - PNE/Ministério da Educação**. Brasília, DF: INEP, 2014.
- Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Apostila, PRINCÍPIOS BÁSICOS DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO RADIOLÓGICA. 4a. EDIÇÃO**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.
- Comissão Nacional de Energia Nuclear. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 9ª revisão**. IRD/CNEN. 345p. Rio de Janeiro - RJ. 2013.
- CORDEIRO, Marinês Domingues; PEDUZZI, Luiz OQ. **Entre os transurânicos e a fissão nuclear: um exemplo do papel da interdisciplinaridade em uma descoberta científica**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 31, n. 3, p. 536-563, 2014.
- D'ANDREA, Alexandre Dimas Queiroz et al. **Câmara de Wilson eletrônica para o auxílio na aprendizagem de física moderna no ensino médio**; Universidade Federal de São Carlos, 2014.
- Disponível em:. <http://apcauger.in2p3.fr/Public/Presentation/Images/principe.png>
- FAUTH, A. C., PENEREIRO, J. C., KEMP, E., GRIZOLLI, W. C., CONSALTER D. M., & GONZALESZ, L. F. G. **Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço dos múons da radiação cósmica**. Revista Brasileira de Ensino de Física. vol. 29, n.4, pp. 585-591. 2007.
- IPEN – INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Radioatividade no ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental**. São Paulo-SP. 2016.

- KNIGHT, R. D. **Física, uma Abordagem Estratégica – Vol. 4, Relatividade, Física Quântica**. 2a. ed. Bookman editora. Porto Alegre. 2009.
- LAGANÁ, Caio. **Estudo de raios cósmicos utilizando uma câmara de nuvens de baixo custo**. Revista Brasileira de Ensino de Física, p. 1-5, 2011.
- MACHADO, D.I; NARDI, R.; **Construção de conceitos de física moderna e sobre a natureza da ciência com o suporte da hipermídia**. Revista Brasileira de ensino de física, v.4, p. 473-485, 2006.
- MARTINS, Roberto de Andrade. **"Como Becquerel não descobriu a radioatividade"**. Caderno Catarinense de Ensino de Física 7: 27-45, 1990.
- OKUNO, Emico; CALDAS, Ibere L. & CHOW, Cecil. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**, 2 a ed., Editora Harbra. 1986.
- OKUNO, Emico. **Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia**. Estudos avançados, v. 27, n. 77, p. 185-200, 2013.
- OKUNO, Emico; YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. **Física das Radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em ensino de ciências**, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2016.
- PEIXOTO, Carlos Jose Todero et al. Reconstrução de chuueiros atmosféricos extensos detectados pelo Observatório Pierre Auger utilizando métodos robustos. 2008.
- PINHEIRO, Lisiane Araujo. **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, ago. 2015. 517.
- RAMOS, Rogério. Dicionário Didático, 3ª. ed. – São Paulo: Edições SM, 2009.
- ROCHA, C. R.; **inserindo conceitos e princípios de mecânica quântica no ensino médio: estados quânticos e superposição linear de estados**. Porto Alegre :UFRGS, 2015. 198f. Tese de Doutorado (Pós-graduação em ensino de física), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- TIPLER, P. A. **Física Moderna**. Guanabara Dois Editora. Rio de Janeiro. 1981.
- WATSON, E. C. The discovery of X-rays. **American Journal of Physics**, v. 13, n. 5, p. 281-291, 1945.
- Williams, E. R. **Origin and context of C. T. R. Wilson’s ideas on electron runaway in thunderclouds**, J. Geophys. Res., 115. 2010.

WILSON, C.T.R. – **Biographical**. Nobelprize.org, The Official Web Site of the Nobel Prize. Disponível em: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1927/wilson-bio.html. Acessado em: 10/08/2018.

XAVIER, A. M., Lima, A. G. D., Vigna, C. R. M., Verbi, F. M., Bortoleto, G. G., Goraieb, K., ... & Bueno, M. I. M. S. (2007). **Marcos da história da radioatividade e tendências atuais**. Química Nova.

10 APÊNDICE

Plano de aula

Nome da Escola/Colégio: Escola Estadual

Professor: Tiago Schipp

Série:

Turma:

Duração: 30 minutos

Tema da aula

Radioatividade

Objetivos

Compreender o princípio da radiação cósmica vinda do universo

Pré-requisitos

O aluno necessita ter conhecimentos prévios dos conteúdos de decaimentos nucleares e a estrutura do átomo.

Materiais utilizados

- Aquário;
- Fita isolante (Parafilme) ou massa de modelar;
- Fita Crepe
- Gelo seco;
- Recipiente raso;
- Álcool isopropílico;
- Câmera Filmadora ou Celular
- Feltro;

Metodologia

A aula será de caráter expositivo e dialogado. Começaremos falando sobre o objetivo do experimento, que é o estudo dos Raios cósmicos. A seguir iniciaremos a montagem do equipamento:

Procedimento Experimental:

1. Colamos o Feltro com a fita crepe sobre a parte superior do aquário;
2. Embebedasse com o álcool isopropílico o feltro, com o aquário virado para baixo;
3. Colocamos a tampa de aço inox sobre o aquário que está virado para baixo e lacramos com fita isolante ou massa de modelar;
4. Preenchemos o recipiente adquirido com gelo seco e colocamos o aquário lacrado com a tampa sobre o gelo seco e esperamos 10 minutos em média para o funcionamento do experimento;
5. Depois do vapor de álcool se condensar, desligue a luz ou coloque um pano preto sobre a Câmara de nuvens;
6. Utilize um Celular com câmera e flash para visualizar as partículas dentro da Câmara de Nuvens;
7. Filme o fenômeno por 5 minutos;

No passo seguinte vamos abordar as partículas visualizadas na filmagem. O objetivo é descrever os tipos de partículas conforme o rastro intrínseco que cada uma produz em sua passagem sobre a névoa. Elabore uma tabela com a quantidade de partículas observadas, os tipos de partículas mais abundante na filmagem e descreva um relatório sobre as características das partículas

Avaliação da aprendizagem

Avaliaremos a aprendizagem conforme o relatório preparado e a participação nas filmagens e montagens dos experimentos da Câmara de Nuvens.

Avaliação da aula

Avaliasse a aula conforme o nível de compreensão e escrita do relatório e os dados obtidos nas filmagens.

Referências Bibliográficas

SAMPAIO, José Luiz; CALÇADA, Caio Sérgio. 2ª Edição. **Física (ensino médio)**. Volume único. São Paulo: Editora Atual, 2005.