

**O ENSINO DA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A  
MATÉRIA - CURVA DE BRAGG**

**GUARAPUAVA**

**2020**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR**

**O ENSINO DA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A  
MATÉRIA - CURVA DE BRAGG**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ALLISON KLOSOWSKI**

**GUARAPUAVA, PR**

**2020**

**ALLISON KLOSOWSKI**

**O ENSINO DA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA - CURVA DE  
BRAGG**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática, área de concentração em Ensino e Aprendizagem de Ciências Naturais e Matemática, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Oliveira Bastos

GUARAPUAVA, PR

2020

Catálogo na Publicação  
Rede de Bibliotecas da Unicentro

K66e                      Klosowski, Allison  
                                 O ensino da interação da radiação com a matéria – curva de Bragg /  
                                 Allison Klosowski. – – Guarapuava, 2020.  
                                 x, 78 f. : il. ; 28 cm

                                 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste,  
                                 Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e  
                                 Matemática, área de concentração em Ensino e Aprendizagem de Ciências  
                                 Naturais e Matemática, 2020.

                                 Inclui Produto Educacional Aplicado intitulado: Curva de Bragg – O  
                                 ensino da interação da radiação com a matéria. 46 p.

                                 Orientador: Rodrigo Oliveira Bastos  
                                 Banca examinadora: Rodrigo Oliveira Bastos (Unicentro), Renato Akio  
                                 Ikeoka (UEL), Ricardo Yoshimitsu Miyahara (Unicentro)

Bibliografia

                                 1. Bragg. 2. Ionização. 3. Radiação alfa. 4. Ensino. I. Título. II. Programa  
                                 de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática.

|

CDD 500.7

ALLISON KLOSOWSKI

“O ENSINO DA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA - CURVA DE BRAGG”

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática, área de concentração em Ensino e Aprendizagem de Ciências Naturais e Matemática, para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 03 de dezembro de 2020.



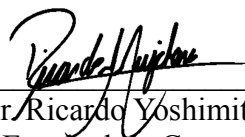
---

Prof. Dr. Rodrigo Oliveira Bastos  
Universidade Estadual do Centro-Oeste – Unicentro  
Orientador



---

Prof. Dr. Renato Akio Ikeoka  
Universidade Estadual de Londrina – UEL



---

Prof. Dr. Ricardo Yoshimitsu Miyahara  
Universidade Estadual do Centro-Oeste – Unicentro

Guarapuava, PR.  
2020

**"O temor do Senhor é o princípio da sabedoria, e o conhecimento do Santo é entendimento." Provérbios 9:10**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que participaram direta ou indiretamente no processo até a conclusão deste trabalho. Em especial:

À minha esposa pelo apoio e paciência em todos os momentos.

Aos meus pais Sergio e Nercilia, e ao meu irmão Sergio Junior, pelo apoio e palavras de incentivo.

Ao meu Orientador Professor Dr. Rodrigo Oliveira Bastos pela colaboração, incentivo, companheirismo e profissionalismo.

E, acima de tudo, a DEUS, por ter me permitido esta oportunidade.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
2.1 Objetivo geral	4
2.2. Objetivos específicos	4
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>5</b>
3.1 Ciência, Tecnologia e Sociedade	5
3.2 Análise de textos por nuvens de palavras	7
3.3 Experimentação em física	9
3.4 Experimentação em física nuclear	13
3.5 Física nuclear	15
3.6 Interação da Radiação com a Matéria e a Curva de Bragg	22
3.7 Aplicação Moderna da Curva de Bragg	29
3.8 Câmara de ionização	33
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS - CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO</b>	<b>35</b>
<b>5. PROPOSTA DIDÁTICA</b>	<b>40</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>44</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>63</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>70</b>



## RESUMO

Allison Klosowski . O ensino da interação da radiação com a matéria - curva de Bragg.

Esta pesquisa teve por objetivo verificar a eficácia de uma sequência para o ensino de física nuclear. Para tal, uma sequência de aulas conceituais, leitura de aprofundamento para os estudantes, e uma experimentação foram desenvolvidos. A sequência de aulas foram aplicadas em uma turma de 3º ano do ensino médio de um colégio particular de Guarapuava - PR. Porém, alguns obstáculos surgiram, como a mudança das aulas presenciais para aulas remotas durante a aplicação da sequência. Apesar das dificuldades, os alunos receberam com agrado a proposta desse trabalho e demonstraram interesse nas sequências e na experimentação. A pesquisa teve caráter qualitativo e as atividades desenvolvidas na sequência didática permitiram coletar informações por meio de um questionário, e de relatos sobre as atividades realizadas, e assim realizar diagnósticos. A construção da câmara de ionização de baixo custo proposta se mostrou eficiente para análise da ionização no ar causada pela passagem da radiação alfa, sendo possível obter experimentalmente a curva de Bragg, sendo que o uso da câmara de ionização de baixo custo despertou o interesse dos alunos. Portanto, esta pesquisa contribuiu para o ensino de física Nuclear, um tema pouco trabalhado no Ensino Médio, e pode servir de apoio a outros professores que tenham como objetivo, ensinar, de forma atrativa e dinâmica os conteúdos de física Moderna.

**Palavras-Chave:** Bragg, ionização, radiação alfa, ensino.

## ABSTRACT

Allison Klosowski. Teaching the interaction of radiation with matter - Bragg curve.

This research aimed to verify the effectiveness of a sequence to teach Nuclear Physics. For this, a sequence of conceptual classes, in-depth reading for students, and an experimentation were developed. The sequence of classes were applied to a 3rd year high school class at a private school in Guarapuava - PR. However, some obstacles arose, such as the change from classroom classes to remote classes during the application of the sequence. Despite the difficulties, the students welcomed the proposal for this work and showed interest in the sequences and experimentation. The research had a qualitative character and the activities developed in the didactic sequence allowed to collect information through a questionnaire, and reports about the activities carried out, and thus make diagnoses. The construction of the proposed low-cost ionization chamber detector proved to be efficient for analyzing the ionization in the air caused by the passage of alpha radiation, making it possible to experimentally obtain the Bragg curve, and the use of the low-cost ionization chamber aroused the students' interest. Therefore, this research contributed to the teaching of Nuclear Physics, a topic so little worked on High School, and can serve to support other teachers who aim to teach, with an attractive and dynamic way, the contents of Modern Physics.

**Keywords:** Bragg, ionization, alpha radiation, teaching.

## 1. INTRODUÇÃO

Esta década é caracterizada por rápidos avanços tecnológicos. Na era digital, a tecnologia foi responsável por muitas mudanças no setor educacional. Essas mudanças vão desde o método de ensino ministrado até as atitudes sobre como o aprendizado ocorre até a quantidade de colaboração e compartilhamento de conhecimento não apenas entre os alunos, mas também entre professores, gerentes e administradores. No meio da discussão e do debate sobre a reforma educacional, Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS) surge como uma nova organização conceitual para o ensino de ciências. A educação CTS fornece aos alunos uma conexão do mundo real entre a sala de aula e a sociedade. Ajuda os alunos a praticar a identificação de problemas potenciais, coletar dados em relação ao problema, considerar soluções alternativas e as consequências de uma determinada decisão. A abordagem CTS tornou-se um dos objetivos atuais para o ensino de ciências, pois é dada tanta ênfase na tecnologia e na sociedade quanto na ciência ao apresentar uma visão coerente da relação entre essas três vertentes.

Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), a física deve fornecer subsídios para que se possa compreender os fenômenos naturais e tecnológicos. Assim, no estudo da física deve-se ensinar como os conhecimentos foram adquiridos ao longo do tempo e ao mesmo tempo mostrar como estes influenciaram e impactaram a sociedade, de forma principal as que são frutos das inovações tecnológicas. Portanto, o ensino da física vai muito além de apenas da utilização decorada de fórmulas matemáticas e resolução de exercícios repetidos.

Segundo a PCN:

“...habilidades e competências concretizam-se em ações, objetos, assuntos, experiências que envolvem um determinado olhar sobre a realidade, ao qual denominamos física, podendo ser desenvolvidas em tópicos diferentes, assumindo formas diferentes em cada caso, tornando-se mais ou menos adequadas dependendo do contexto em que estão sendo desenvolvidas.” (BRASIL, 2000)

Assim, temos a evidência do benefício da experimentação no ensino da física, pois é

uma maneira pela qual se pode concretizar habilidades e competências de um estudante.

Quando se é possível a mensuração e análise de informações obtidas fisicamente a partir de observações/experimentações com a finalidade de alcançar um resultado aplicável ao mundo, o entendimento do fenômeno físico envolvido se torna mais claro e nítido. Portanto, quando se faz uso de atividades experimentais como parte integrante na estratégia de ensino de física, torna-se uma das maneiras mais produtivas de minimizar as dificuldades de aprender e ensinar física (ARAÚJO, 2003).

Segundo a PCN+ , o aluno deve ser capaz de:

- Compreender as transformações nucleares que dão origem à radioatividade para reconhecer sua presença na natureza e em sistemas tecnológicos.
- Conhecer a natureza das interações e a dimensão da energia envolvida nas transformações nucleares para explicar seu uso em, por exemplo, usinas nucleares, indústria, agricultura ou medicina.
- Avaliar os efeitos biológicos e ambientais, assim como medidas de proteção, da radioatividade e radiações ionizantes. (BRASIL, 2002)

Assim, vê-se a necessidade da exploração do tema de física nuclear durante o ensino médio.

Pretendeu-se neste trabalho que os estudantes do ensino médio possam aprender e incorporar os conteúdos e conceitos relativos à física nuclear, de modo que cada um saiba onde ela se insere no seu cotidiano, como ela influenciou a história da humanidade, seus impactos sociais, quais suas aplicações tecnológicas, e como tudo isso pode afetar ou não o bem estar social. No final, cada um deve ser hábil para tirar suas próprias conclusões sobre ela. Para que isso seja possível, nesta pesquisa fez-se a opção pela abordagem CTS, pois ela valoriza a interação do conceito científico com o cotidiano, as reflexões sobre as tecnologias emergentes e seu envolvimento social.

A dissertação está estruturada em 7 capítulos distintos.

O primeiro trata da introdução, onde é feita a apresentação do tema, as dificuldades gerais sobre a experimentação em física nuclear, o enfoque CTS,

No segundo se encontra o objetivo geral e os específicos, visando dar um panorama da proposta pedagógica e seus fins.

O terceiro capítulo contempla a fundamentação teórica. Neste capítulo é explorado o desenvolvimento histórico da física culminando na física nuclear; o enfoque CTS; a experimentação para o ensino de física, a técnica de análise de texto por meio de nuvem de palavras, bem como tópicos específicos de física nuclear como radiações nucleares, suas interações com a matéria, e a câmara de ionização

O quarto capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados na experimentação, visando dar uma visão sobre o funcionamento da câmara de ionização.

No capítulo cinco é explanado sobre a implementação da sequência didática, bem como os conteúdos e materiais utilizados.

No capítulo seis apresenta-se os resultados e discussões acerca da aplicação da sequência didática.

No capítulo sete apresentam-se as considerações finais e apontamentos de proposições para trabalhos futuros.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente projeto visou fornecer subsídios para a melhoria no processo de ensino-aprendizagem de física nuclear, por meio de uma sequência didática de aulas conceituais e experimentação sobre a interação da radiação ionizante com a matéria para obtenção experimental da curva de Bragg, com enfoque em CTS.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Criar uma sequência didática para o ensino de física nuclear, com enfoque na interação da radiação alfa com a matéria;
- Empregar o uso de uma câmara de ionização de baixo custo para obter a curva de Bragg experimentalmente;
- Analisar a eficácia da sequência didática e da experimentação em sala de aula;
- Contribuir para melhorar a qualidade do ensino de física para o ensino médio.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Ciência, Tecnologia e Sociedade

Por fazer parte de um contexto social que está sempre em constante movimento e mudança, é possível afirmar que a educação precisa sofrer transformações mais rapidamente. Existe hoje uma nova compreensão sobre o papel da escola, que se torna elemento de desenvolvimento social, estimulada pela incorporação de novos conhecimentos, sejam científicos ou tecnológicos (CAMPO, 2010).

A sociedade, que vem sendo marcada pela revolução da tecnologia, exige da escola que esta possa criar oportunidades para formação de competências básicas. Estas exigências estão estabelecidas na Constituição Brasileira de 1988:

A educação, direito de todos, é dever do estado e da família e será promovida e incentivada com a colaboração da sociedade, visando ao pleno desenvolvimento da pessoa, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho. (Brasil, 1988, art. 205)

Hoje existem questionamentos que são levantados quanto à forma com que o ensino de várias disciplinas são apresentadas nas escolas. Muito do que se vê hoje em sala de aula tem um caráter demasiado abstrato e rigoroso, distanciando-se das experiências únicas dos alunos, dificultando a preparação dos mesmos como cidadãos críticos (CAMPO, 2010).

Visto a existência desta dificuldade, um enfoque educacional que tem ganhado espaço na prática docente, possibilitando uma relação recíproca entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Este modelo visa dotar as pessoas de habilidades e competências, tornando-as capazes de debater e discutir questões científicas e tecnológicas que permeiam a sociedade, pondo em relevo um trabalho de investigação-ação em sala de aula (PINHEIRO, 2007).

As experiências que têm sido efetivadas com o enfoque CTS, no ensino médio, que tem por característica a investigação-ação, podem ser classificadas em três grupos (PINHEIRO, 2007; CHRISPINO, 2017):

- Enxerto CTS: tem por base a introdução de temas CTS nas disciplinas de ciências, abrindo assim discussões e questionamentos do que seja a ciência e a

tecnologia.

- Ciência e tecnologia por meio de CTS: tem por base a estruturação do conteúdo científico por meio do CTS. Essa estruturação pode ocorrer em uma só disciplina, ou ainda por meio de trabalhos multidisciplinares e interdisciplinares.
- CTS puro: tem por base o ensino da ciência, tecnologia e sociedade por intermédio do CTS, no qual o conteúdo científico tem um papel subordinado.

O enfoque CTS que, uma vez estando inserido nos currículos, terá um papel de impulsionar e estimular o aluno acerca da reflexão sobre as possibilidades de leitura sobre ciência, tecnologia e sociedade. Assim, pode-se esperar que o aluno assuma uma postura crítica. Com isto se chega à conclusão de que a aplicação do enfoque CTS não ocorre somente no ambiente escolar, mas também fora dela (CHRISPINO, 2017).

Uma vez estabelecido isto, o processo ensino-aprendizagem passará por uma transformação, passando a ser entendido como a possibilidade de estimular a curiosidade, o espírito inquiridor e pesquisador. Surge então uma necessidade de que se busque questões e elementos para resolução de problemas, mas que estes façam parte do cotidiano do aluno, ampliando o conhecimento necessário para que se possa utilizá-lo na solução de problemas da sociedade. Assim enfoque CTS em sala de aula pode ser tratado por meio de temas que possuam relevância para o contexto no qual o aluno está inserido. O enfoque CTS, tem sido indicado como um caminho para a construção de um letramento científico e tecnológico que propicie a formação de alunos, enquanto cidadão, capazes de atuar de forma responsável em relação a temas controversos que incorporem aspectos sociocientíficos (PINHEIRO, 2007; CHRISPINO, 2017).

Assim, ao se propor uma estratégia de forma conjunta em torno do enfoque CTS, existe um compromisso com a construção de uma nova metodologia para o ensino, passando a sala de aula a ser caracterizado como um cenário de pesquisa, na qual a investigação-ação estará presente (PINHEIRO, 2007).

No ensino de física, a responsabilidade da construção da cidadania é muitas vezes deixada de lado, pois muito se prioriza os valores desta ciência, e a preocupação é dirigida



para o funcionamento dos objetos, mas não preocupa-se com a compreensão que tal aprendizado poderia oferecer. Isso acarreta que não se dá atenção à interpretação do significado que o conteúdo possui (ANGOTTI, 2001; BELANCON, 2017). De acordo com Angotti (2011, p.3):

“... ensinar e aprender física, é ao mesmo tempo adquirir conhecimentos científicos históricos e socialmente construídos, de modo a propiciar o entendimento de fenômenos da natureza bruta, bem como da transformada, com os quais interagimos diariamente.”

Assim, é preciso discutir a ciência, seu desenvolvimento histórico, e seus desdobramentos tecnológicos e sociais.

Grande parte dos alunos apresenta um maior interesse pela disciplina a partir do rompimento com a abordagem tradicional. (BELANCON, 2017).

O enxerto foi a modalidade escolhida para a inserção do enfoque CTS neste presente trabalho, pois ao utilizar esta modalidade, não é necessário que o tema esteja diretamente relacionado com o conteúdo da série em questão, porém o que é relevante é propor temas que admitam discutir o envolvimento do conhecimento em suas implicações científicas, tecnológicas e sociais.

### **3.2 Análise de textos por nuvens de palavras**

Neste trabalho optou-se pela análise de textos dos alunos por nuvens de palavras, visando sua utilidade para qualquer tipo de dados de texto. Visto o enfoque CTS proposto na sequência didática, a nuvem de palavras se torna versátil para identificação de alguns padrões e relevância de assuntos nos textos.

A mineração de textos se mostra uma importante ferramenta no auxílio da tomada de decisões, sob vários aspectos (FREITAS; NEVES; GONÇALVES, 2018). Por exemplo, quando se trabalha com textos, em várias situações não temos uma hipótese inicial sobre quais informações relevantes podem ser consideradas dos mesmos.

A nuvem de texto, ou nuvem de palavras, é uma forma de visualização de dados linguísticos que mostra a frequência com que as palavras aparecem em determinado contexto. A técnica de construção desta nuvem de palavras reside em usar tamanhos e fontes de letras

diferentes de acordo com as ocorrências das palavras, gerando uma imagem que apresenta um conjunto de palavras, coletadas do corpo do texto e agregadas de acordo com sua frequência. O tamanho de cada palavra indica sua frequência, admitida como proxy da relevância de determinada temática na totalidade de hipertextos. Dessa maneira, a aplicabilidade desta técnica contribui para a visualização do que é mais relevante nos relatos selecionados (FRANCISCO, 2011).

A nuvem de palavras transcende seu mero apelo ilustrativo, sendo que as nuvens de palavras têm sido consideradas uma opção à análise de textos e na disseminação de resultados de pesquisas de abordagem qualitativa. Uma palavra repetida várias vezes o é por algum motivo, assim, as nuvens de palavras são um método heurístico de análise. Elas acrescentam clareza e também transparência na comunicação de ideias, revelando padrões interessantes (CIAIQ, 2019).

Ao examinar as frequências em uma nuvem de palavras, pode-se procurar padrões específicos de palavras e frases, ou a falta deles, em dados de texto. A eficácia da nuvem de palavras é fundamentada teoricamente no modelo de aprendizagem de organizadores gráficos. Um organizador gráfico nada mais é que uma ferramenta de comunicação visual que se utiliza de símbolos visuais para expressar ideias e conceitos, ou para transmitir significado. Os organizadores gráficos retratam o conhecimento de uma forma significativa, o que ajuda a trazer clareza às ideias conforme as conexões são feitas. As nuvens de palavras são úteis na análise de qualquer tipo de dados de texto (DEPAOLO, WILKINSON, 2014; HEIMERL et al., 2014).

As nuvens de palavras também podem ser usadas como uma representação gráfica da aprendizagem do aluno. Outra maneira pela qual as nuvens de palavras podem ser úteis é ajudando a entender o que os alunos estão aprendendo ou obtendo com o aprendizado experimental. Assim, o professor pode determinar as áreas que precisam ser abordadas ou corrigidas em aula com base no tamanho das palavras na nuvem de toda a classe. Dessa forma, a nuvem de palavras atua como um mapa para análises posteriores. Esta abordagem é útil ao analisar dados de texto de relatos, perguntas de pesquisa aberta, ou qualquer pesquisa qualitativa ou dados de avaliação (DEPAOLO; WILKINSON, 2014).

### **3.3 Experimentação em física**

É importante que o ensino da física e seus conceitos estejam relacionados com seu desenvolvimento histórico, as implicações sociais e tecnológicas, e isso pode ocorrer através de uma sequência didática que inclua experimentação no tema de interesse.

O declínio do interesse dos alunos e da popularidade das ciências, ou mais precisamente da física, durante o período do ensino médio é uma grande preocupação para muitos educadores e pesquisadores de ciências. Muitos estudos têm apontado o fato de que o ensino tradicional falha quando tenta alcançar os objetivos desejados em relação ao conhecimento aprofundado em relação à ciência. Diferentes propostas são necessárias para favorecer a interação, a motivação e a autonomia, e estas devem ser alternativas à sala de aula tradicional (baseada essencialmente na exposição, exemplos e resolução de casos práticos) onde o assunto é geralmente apresentado como conhecimentos sem relação com o cotidiano configuração. Desenvolvimentos recentes em Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) levam a pensar que serão amplamente utilizadas as simulações, tutoria virtual, videogames, laboratórios on-line, etc (DORRÍO, 2011).

O ensino de física está em constante evolução junto com as mudanças nas condições do mundo. Portanto, a criação de novos meios de aprendizagem nos programas educacionais de melhoria contínua e a determinação dos alunos em relação às aulas de física e experimentos físicos em uma seleção de materiais e métodos de aprendizagem são essenciais para a aprendizagem eficaz das aulas. As atitudes estão relacionadas ao enfrentamento e ao gerenciamento das emoções que ocorrem durante o processo de aprendizagem e desempenham um papel importante na direção do comportamento humano (DORRÍO, 2011; JOSEF TRNA, 2014).

Experimentos na educação científica são essenciais para a compreensão dos fenômenos naturais e princípios relacionados a um assunto. A física é uma ciência que também é experimental e, sendo que muitos de seus princípios e leis físicas estão firmemente enraizados na confirmação experimental. O desenvolvimento das teorias físicas é sempre um processo bidirecional que inicia e termina com observações ou experimentos. Felizmente, com algumas alterações, muitos desses princípios fundamentais que sob a disciplina de física

podem ser demonstrados usando complementos e materiais diretos, mas nada pode ser demonstrado por meio de complementos e materiais disponíveis.

Diferentes propostas são necessárias para favorecer a interação, a motivação e a autonomia, e estas devem ser alternativas à sala de aula tradicional (baseada essencialmente na exposição, exemplos e resolução de casos práticos) onde o assunto é geralmente apresentado como conhecimentos sem relação com o cotidiano. Isso significa que os alunos que conseguem resolver problemas e casos práticos com sucesso não são capazes de responder a questões conceituais simples corretamente. Este é o caso mesmo que as condições para uma boa aprendizagem (fundamentos básicos bem estruturados, motivação adequada, promoção da atividade autônoma e interação entre pares) sejam suficientemente compreendidas. Existem estratégias que permitem que este processo seja realizado com sucesso, utilizando interação, experimentação e demonstração para aumentar a informação retida, melhorar as notas e eliminar atitudes negativas em relação às disciplinas (DORRÍO, 2011; JOSEF TRNA, 2014).

Experimentos em diferentes formas podem certamente ser ferramentas adequadas para aumentar o interesse dos alunos pela física. No entanto, os educadores discutem continuamente quais formas de experimentação (se houver) são as mais benéficas para esses propósitos.

Focando em experimentos e outras estratégias e seu impacto imediato sobre os alunos, é claro que o envolvimento ativo junto com a novidade e o envolvimento social (por exemplo, trabalho em grupo) desempenham um papel fundamental no apoio aos experimentos práticos de interesse situacional dos alunos na física interativa em laboratório. Além disso, fazer experimentos e trabalhos em grupo não são apenas apreciados pelos alunos, mas também considerados úteis. Em comparação, as atividades passivas são percebidas de forma mais crítica em termos de saber se uma atividade é apreciada pelos alunos e como eles vêem sua utilidade (JOSEF TRNA, 2014).

Laboratórios remotos e simulações não podem substituir a experiência completa de trabalho no laboratório real, mas há benefícios óbvios, como exemplo pode-se citar o distanciamento e isolamento social (devido ao COVID-19<sup>1</sup>) sendo obedecido, porém sem a

---

<sup>1</sup> "Coronavírus Brasil." <https://covid.saude.gov.br/>. Acessado em 20 nov.. 2020.

perda de atividades experimentais e demonstrações.

Os projetos experimentais precisam ser adaptados para operação remota com uma atualização e modernização geral necessárias. Quando se faz uso remoto de um laboratório, pode-se proporcionar aos alunos algum controle interativo em tempo real sobre equipamentos reais, demonstrar fenômenos, envolvê-los na configuração do instrumento, tornar observável a limitação do equipamento e, portanto, é vantajoso quando comparado a laboratórios simulados por software. (SHARAFUTDINOVA *et al.*, 2013).

A observação e a experimentação constituem-se nos pressupostos iniciais do método científico. O método científico pode ser entendido como um processo de pesquisa que segue uma determinada sequência de etapas. Além disso, pode ser definido como a maneira ou conjunto de regras básicas empregadas em uma investigação científica com o intuito de se obter os resultados mais confiáveis. Portanto, as principais formas para aquisição de conhecimentos, tendo-se por princípio o método científico, são a observação e a experimentação dos fenômenos (SILVA, 2017).

Desta forma, o trabalho experimental não só permite confirmar leis e teorias, mas também permite que o aluno tenha um papel principal em seu processo de aprendizagem junto com o professor e os recursos oferecidos como um guia para isso. No que diz respeito aos laboratórios, virtuais e remotos, são uma inovação promissora para melhorar o ensino e aprendizagem das ciências exatas em todos os níveis de ensino, devido ao fato de que a utilização desses recursos pode permitir a utilização de conhecimentos em contextos reais (MATARRITA *et al.*, 2019).

Muitas metas podem ser alcançadas por meio de trabalho prático (HAVLÍČEK, 2015), tais como

- para encorajar observação precisa e registro cuidadoso;
- promover métodos científicos simples e de senso comum de pensamento;
- desenvolver habilidades de manipulação;
- dar treinamento na resolução de problemas;
- elucidar o trabalho teórico de forma a auxiliar a compreensão;
- verificar fatos e princípios já ensinados;
- ser parte integrante do processo de descoberta de fatos por investigação e obtenção de

princípios;

- despertar e manter o interesse pelo assunto;
- motivar os alunos, estimulando o interesse e o prazer;
- aumentar a aprendizagem do conhecimento científico;
- para fornecer uma visão sobre o método científico e desenvolver experiência em usá-lo;
- desenvolver habilidades e técnicas científicas práticas.

Os laboratórios baseados em pesquisas têm como objetivo ensinar aos alunos métodos científicos, habilidades e processos de pensamento. Isto o torna um diferencial, visto que os laboratórios usuais não usam a inclusão de alunos desde o início do processo de planejamento do experimento que estão conduzindo. Assim, em um laboratório baseado em pesquisa, os alunos recebem tarefas de pesquisa e, com a ajuda de experimentos de projeto do professor, decidem quais instrumentos eles precisam e como irão analisar os dados coletados.

O trabalho prático e experimental é uma parte inseparável do ensino de física e provavelmente isso não vai mudar. Existem muitos objetivos que se acredita serem alcançáveis com ele. No entanto, incluir o trabalho prático às cegas nas aulas de física pode se tornar desastroso ou pouco proveitoso para o aprendizado. Todo laboratório de ciências ou experimento deve ser bem pensado e planejado com um objetivo específico em mente, caso contrário, pode se tornar uma grande perda de tempo e recursos (HAVLÍČEK, 2015).

As configurações experimentais podem variar de muito baixa tecnologia até a alta tecnologia, mas um parâmetro-chave para uma aprendizagem bem-sucedida é o envolvimento do aluno. Ao ter alunos realizando experimentos em um contexto diferente do laboratório, tem-se uma maneira poderosa de contextualizar os conceitos de física, mas deve-se notar que esses mesmos experimentos podem ser facilmente usados para aprendizagem à distância, com experimentos de baixo custo. A qualidade dos resultados obtidos com essas configurações de baixo custo é suficiente para interessantes investigações de física (BOUQUET *et al.*, 2019).

### 3.4 Experimentação em física nuclear

Segundo a PCN+, os alunos devem ser capazes de compreender as transformações nucleares que dão origem à radioatividade, conhecer a natureza das interações e avaliar os efeitos biológicos e ambientais, assim como medidas de proteção, da radioatividade e radiações ionizantes (BRASIL, 2002). Isto nos mostra a importância deste tema na formação do aluno, e para que isso ocorra de forma. Assim, existem hoje trabalhos propondo experimentos e sequências didáticas que envolvem conceitos e fundamentos da física nuclear.

Lagana (2013) utiliza-se de imagens de decaimentos- $\alpha$  de uma fonte radioativa de Amerício-241, obtidas com uma câmara de nuvens de baixo custo como motivação para o desenvolvimento de conceitos ligados à passagem de partículas carregadas pela matéria e na discussão de um modelo simples de estrutura nuclear. As imagens obtidas puderam ser usadas para construir histograma do alcance de partículas alfa, possibilitando a investigação do espectro energético do Am-241.

Esse tipo de estudo possibilita a discussão e ensino sobre conceitos presentes em física experimental de altas e baixas energias, como os conceitos ligados à passagem de partículas carregadas pela matéria.

Visando esclarecer conceitos sobre radiações, Pereira (2014) projetou um conjunto simples de experimentos através do uso de um medidor Geiger montado na plataforma Arduino para a realização de sequências didáticas experimentais em sala de aula. A intenção de uma prática como essa é identificar como essa experimentação pode ajudar a despertar o interesse dos alunos em física nuclear, com enfoque nas radiações. Esse tipo de experimentação contribui para a alfabetização científica, onde o indivíduo consegue aplicar o conhecimento aprendido na vida social. Essa construção se torna viável de ser adquirida e montada, tornando seu uso prático em sala de aula.

Boff (2016) propõe ensinar conceitos de física nuclear com a construção de uma câmara de ionização de baixo custo, visando realizar algumas práticas didáticas como a medida de filhos do Radônio-222 e a medida do alcance de partículas alfa emitidas por filhos do Tório-232. Boff, Bastos e Melquiades (2017) sugerem tal experimentação para atenuar a pouca disseminação da experimentação da física nuclear no ensino da física

moderna. Muitas vezes a física nuclear só é tratada de forma conceitual ou por meio de simuladores, assim, sequências didáticas experimentais utilizando uma câmara de ionização de baixo custo sugerida conseguem superar essas dificuldades, podendo ser utilizada em sala de aula, sendo um importante complemento para as atividades experimentais de física nuclear (BASTOS; BOFF; MELQUIADES, 2016).

Por sua vez, Dierka (2016) propõe o uso de um detector de partículas alfa por faíscas, para demonstrar a interação da radiação alfa com a matéria, sugerindo que práticas experimentais inseridas no ensino podem melhorar o aprendizado, parcialmente pelo despertar dos interesses. Porém a prática não pode ficar somente na prática, quando acompanhadas de direcionamentos pedagógicos coerentes, a experimentação pode promover o desenvolvimento intelectual, atingindo maior número de alunos, auxiliando na aprendizagem significativa.

O detector de partículas alfa por faíscas possui uma montagem relativamente simples e pode ser feita através da aquisição de peças de sucatas eletrônicas, porém deve-se ter um cuidado especial nesse tipo de experimentação, visto que opera com alta tensão. Por possuir um apelo visual e sonoro, o detector pode contribuir para reverter o desinteresse dos alunos. A experimentação pode ainda ser realizada de maneira qualitativa ou quantitativa (DIERKA, 2017)

Boch (2018) utiliza-se de uma sequência didática com enfoque CTS para o ensino de física nuclear, com uma atividade experimental investigativa utilizando o eletroscópio de folhas. A prática didática envolvendo um eletroscópio de folha mostra como este pode ser usado para medições quantitativas e apresenta como a meia-vida de Rn-220 pode ser medida usando um eletroscópio de emanção construído com materiais simples e acessíveis.

A proposta do uso do eletroscópio para o ensino da física nuclear pode parecer estranha, visto que os eletroscópios são amplamente usados no ensino de princípios eletrostáticos. Porém o eletroscópio é um protagonista nas pesquisas em física de altas energias, e o tornam um dos melhores detectores de radiação para o ensino de alguns conceitos da radioatividade e detecção de radiação. Demonstrações de física nuclear usando o eletroscópio de folhas podem ser usadas para ilustrar princípios da radioatividade com um aparelho simples e pequenas quantidades de material radioativo (BASTOS; BOCH, 2017).

Bastos (2020) propõe o uso de um eletroscópio de baixo custo, possibilitando a



abordagem da radioatividade de forma quantitativa. A experimentação consiste em medir a radiação ionizante por meio de um eletroscópio simples, juntamente com a captura e análise de vídeo com o software Tracker.

A experimentação para a obtenção da curva de Bragg, conforme este presente trabalho já foi publicado. A experimentação proposta visa utilizar uma câmara de ionização de baixo custo, com uma amostra radioativa de baixa atividade, facilitando sua construção e utilização. Conforme Klosowski e Bastos (2020) a prática experimental é estimada em 45 min, podendo ser realizada em sala de aula, visto a praticidade de uso da câmara de ionização.

Esses estudos mostram que essas práticas de física nuclear podem ocorrer utilizando materiais de baixo custo e de fácil acesso, facilitando o ensino deste tema em todas as esferas de ensino.

Percebe-se que as possibilidades de trabalhar o tema física nuclear em sala de aula por meio de experimentação são muitas, e traz muitos benefícios na formação do aluno. Esses e outros trabalhos mostram diversas estratégias de ensino envolvendo práticas experimentais para o ensino de física nuclear. Estas possibilidades para o ensino de física no contexto escolar mostram o quão importante é o ensino da física nuclear por meio da experimentação.

### **3.5 Física nuclear**

#### **História e desenvolvimento da física nuclear**

Tendo em vista a importância da física nuclear e de sua experimentação em sala de aula, precisamos também compreender alguns pontos históricos do desenvolvimento da ciência até culminar na física nuclear e física moderna, para que se perceba a relação entre o desenvolvimento científico e sua relação com a sociedade e tecnologia.

Desde os primeiros filósofos gregos existe a especulação e interesse sobre a constituição da matéria, tendo estes um conceito correto de que toda a matéria é constituída de combinações de elementos básicos. Já no século VII, os filósofos árabes responderam muitas questões nas quais a Europa não se perguntava. Eles descobriram e nomearam muitos elementos químicos e compostos. Porém, somente em 1803 foi proposto uma prova da

natureza da estrutura atômica por John Dalton, sendo que entre outras coisas, sua proposta era que a distinção de elementos químicos se davam pelos diferentes tipos de átomos, e que o que distinguia cada átomo diferente era seu peso (WOOLBRIGHT, 2014).

Através das décadas e séculos, o estudo da matéria veio se desenvolvendo, até que em 1895 a 1905 cientistas dedicaram seus esforços para métodos da ciência experimental para os problemas do átomo. A partir de seus estudos, eles obtiveram as evidências necessárias para elevar a ideia de atomismo ao nível de teoria científica. Essa época ficou então conhecida como o início da física moderna.

Morre Ernest Rutherford é considerado o pai da física nuclear, ele estudou as emissões radioativas descobertas por Henri Becquerel, e conseguiu classificá-las em alfa, beta e gama. Descobriu que a radioatividade era acompanhada por uma desintegração dos elementos. A lista do desenvolvimento histórico da física nuclear é longa, mas podemos traçar uma breve cronologia (KRANE, 1988):

1895: descoberta dos raios X - Wilhelm Conrad Röntgen (primeiro a receber o Prêmio Nobel de Física, em 1901);

1896: descoberta de radioatividade por Henri Becquerel;

1898: separação do rádio por Maria e Pierre Curie; Descoberta da radiação alfa, beta e gama;

Em 1903 Henri Becquerel, Pierre Curie e Marie Curie foram ganhadores do prêmio Nobel pela descoberta da radioatividade espontânea.

1905: teoria da relatividade especial de Einstein;

Em 1908 Ernest Rutherford foi ganhador do prêmio Nobel pelo seu trabalho na desintegração dos elementos e na química dos elementos radioativos

1911: descoberta do núcleo como uma parte central de um átomo - Ernest Rutherford;

1912: desenvolvimento da câmara de nuvem para detectar partículas carregadas - Charles Thomson Rees Wilson;

1919: descoberta do próton - Rutherford;

Em 1927 Charles Wilson ganhou o prêmio Nobel pelo desenvolvimento da câmara de nuvem.

1928: teoria da radiação alfa - Gamow, Gurney, Condon;

Em 1935, pelo seu trabalho na síntese de vários novos elementos radioativos, Joliot e Irene Joliot-Curie foram os ganhadores do prêmio Nobel;

Já em 1938 Enrico Fermi ganha o prêmio Nobel pelo trabalho com novos elementos radioativos produzidos por irradiação de nêutrons.

A lista de descobertas e prêmios Nobel segue anos afora, mas podemos observar que o desenvolvimento da física nuclear ocorreu de maneira rápida, com grandes descobertas e desenvolvimentos. Todas essas, e muitas outras ideias, levaram a um dos desenvolvimentos mais importantes do século XX: a teoria quântica. Essa teoria inclui a mecânica quântica e a teoria quântica da radiação (1924-1928) (WOOLBRIGHT, 2014).

Em 1904 Bragg, que após estudar a passagem da radiação pela matéria, descobre um fato que até então não tinha sido observado. Bragg conseguiu prever que a partícula alfa é mais ionizante no extremo final de seu percurso, fato que passa a ser conhecido como curva de Bragg, tendo implicações na medicina, como o tratamento de tumores com feixe de prótons (BRAGG, 1912).

A história da física nuclear pode ser dividida em três períodos. O primeiro período começou com a descoberta da radioatividade do núcleo, e terminou em 1939 com a descoberta de fissão de Hahn e Strassman. O segundo período se estende de 1940 a 1969, quando a física nuclear testemunhou desenvolvimentos importantes em aplicações práticas e explicações teóricas, como exemplo, surge a espectroscopia nuclear, reatores e modelos nucleares (ABDULLAH, 2014).

O terceiro período, por volta do ano de 1960, se caracteriza pelo surgimento de uma teoria unificadora microscópica, permitindo entender a estrutura e o comportamento dos prótons e nêutrons em termos das interações fundamentais de suas partículas constituintes, quarks e glúons (ABDULLAH, 2014).

A física nuclear se torna então o coração da habilidade de entender o universo nas escalas muitíssimas pequenas e também extremamente grande. O núcleo de um átomo, onde existem interações entre quarks e gluons, da ordem de  $10^{-15}$  metros, formam um complexo sistema incrivelmente rico e cheio de diversidade, e suas propriedades determinam o comportamento de uma estrela vermelha gigante de raio  $10^{11}$  metros (ABDULLAH, 2014).

Com o aumento das aplicações da física nuclear, a fissão nuclear do Urânio 235 se torna a principal aplicação civil da energia nuclear. Por ser uma fonte de energia altamente concentrada e de elevado rendimento, diversos países utilizam a energia nuclear como opção energética. O desenvolvimento da física nuclear possibilitou que a sociedade usufrua de muitos benefícios, como na geração de energia, aplicações industriais e medicinais.

### **Física nuclear na medicina**

A medicina nuclear é parte essencial das estratégias de saúde moderna para diagnosticar e tratar certas doenças, particularmente na área de oncologia. Centros médicos modernos possuem um departamento de medicina nuclear que fornece serviços de diagnóstico e tratamento. A base científica e muitas das tecnologias que existem neste ramo de medicina são produtos da pesquisa básica em ciências nucleares.

No que se refere a diagnósticos, os núcleos atômicos radioativos são amplamente utilizados na biologia e medicina como marcadores radioativos. Tendo propriedades químicas idênticas aos isótopos estáveis do mesmo elemento, os isótopos radioativos podem ser incorporados em substâncias metabolizadas pelo corpo, permitindo assim tanto o rastreamento do material e também diagnósticos de órgãos. Alternativamente, a radiação emitida pelos radiofármacos pode ser usada para fins terapêuticos. Faz-se uso em larga escala do benefício oriundo da descoberta dos raios X, para realizar diagnósticos por imagens. Tecidos e fibras musculares são praticamente atravessados pelos raios X, enquanto os ossos absorvem essa radiação. Como esses raios X têm a capacidade de enegrecer chapas fotográficas, assim, ao se colocar o paciente entre uma fonte de raios X e uma chapa fotográfica, pode-se observar a formação de uma imagem correspondente aos ossos (BALOSSO et al., 2014).

A Imagem por Tomografia por Emissão de Positrons (PET - sigla em inglês) tornou-se uma importante modalidade de diagnóstico. Imagens PET fornecem informações metabólicas mediante o uso de rádio-substâncias marcadas com isótopos que têm diferentes taxas de captação, dependendo do tipo e função do tecido envolvido. Cada vez mais, scanners PET são combinados com scanners de tomografia computadorizada para fornecer imagens multimodais que fornecem informação metabólica e anatômica (BALOSSO et al., 2014).

## Alguns conceitos de física nuclear

A observação simples da matéria que compõe todos os objetos, seres vivos, rochas, planetas, entre outras coisas, mostra uma diferenciação na constituição, na cor, no grau de dureza, transparência entre outras características. Todos os materiais existentes no universo são constituídos de átomos ou de suas combinações. As substâncias simples são constituídas de átomos, e suas combinações formam as moléculas das substâncias compostas. A maneira com que os átomos se combinam depende da sua natureza e das suas propriedades estruturais.

O modelo concebido para representar o átomo é um núcleo pesado, com carga elétrica positiva, e vários elétrons, com carga elétrica negativa, cujo número varia com a natureza do elemento químico. O raio de um átomo é da ordem de  $10^{-7}$  cm e suas propriedades químicas são definidas pelos elétrons das camadas mais externas. O valor do raio depende da força de atração entre o núcleo e os elétrons e é expresso em Angstrom ( $1\text{Å} = 10^{-8}$  cm) (TAUHATA et al., 2013).

Cada elétron está vinculado ao núcleo pela atração entre a sua carga negativa e a carga positiva do núcleo, pelo acoplamento atrativo do seu momento magnético (spin) com elétrons da mesma camada. A repulsão elétrica entre os elétrons acarreta numa atenuação da força atrativa entre um elétron e o núcleo. A energia consumida neste acoplamento se chama energia de ligação (TAUHATA et al., 2013).

O núcleo atômico é constituído de  $A$  núcleons, sendo  $N$  nêutrons e  $Z$  prótons. Os prótons são positivamente carregados e determinam o número de elétrons do átomo, uma vez que este é eletricamente neutro. Os nêutrons possuem praticamente a mesma massa que os prótons, mas não têm carga elétrica. Prótons e nêutrons são chamados de núcleons. O número de núcleons  $A = N + Z$  é denominado de número de massa e  $Z$  de número atômico. São os denominados isótopos. São nuclídeos que apresentam um mesmo número de prótons  $Z$ , porém diferentes números de nêutrons. Além dos nuclídeos estáveis, existem os instáveis, que são ditos radioativos, denominados de radioisótopos ou radionuclídeos (TAUHATA et al., 2013).

As radiações são produzidas por processos de ajustes que ocorrem no núcleo ou nas

camadas eletrônicas, ou pela interação de outras radiações ou partículas com o núcleo ou como átomo, sendo um processo que ocorre para tornar o átomo mais estável (TAUHATA et al., 2013).

A radiação eletromagnética é constituída por vibração simultânea de campos magnético e elétrico, perpendiculares entre si, originados durante uma transição, ocorrida pela movimentação da carga e momento magnético da partícula, quando modifica seu estado de energia, caracterizado pelo momento angular, spin e paridade. Raios X é a denominação dada à radiação eletromagnética de alta energia que tem origem na eletrosfera ou no freamento de partículas carregadas no campo eletromagnético do núcleo atômico ou dos elétrons (TAUHATA et al., 2013).

Os átomos instáveis, que apresentam um 'excesso de energia', de mesma espécie e contidos numa amostra, não realizam transformações para se estabilizarem, ao mesmo tempo. Eles realizam de modo aleatório. Para uma quantidade grande de átomos, o número de transformações ocorridas por segundo é proporcional ao número de átomos que estão por se transformar naquele instante. Isto significa que a probabilidade de decaimento por átomo por segundo deve ser constante, independente de quanto tempo ele tem de existência. Esta probabilidade de decaimento por átomo por segundo é denominada de Constante de Decaimento  $\lambda$  e é característica para cada radionuclídeo (TAUHATA et al., 2013).

Após a descoberta da radioatividade por Becquerel um intenso esforço foi feito para verificar se as taxas de decaimento de nuclídeos podem ser afetados por influências externas, incluindo temperatura, pressão, composição química, concentração, e campos magnéticos. Em 1930, Rutherford chegou a conclusão que a taxa de transformação de um elemento deve ser constante em todas as condições (JENKINS et al., 2009).

Hoje se acredita que as taxas de decaimento nuclear são constantes sobre praticamente todas as condições e segue uma lei de decaimento exponencial,

$$dN(t)/dt = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

onde  $N(t)$  é o número de átomos restantes no momento  $t$ ,  $N_0 = N(0)$  é o número inicial de átomos, e  $\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$  é uma constante determinada pelo tempo nuclear de meia vida  $T_{1/2}$ , sendo o tempo de meia vida o intervalo de tempo, contado a partir de um certo instante, necessário para que metade dos átomos radioativos decaiam. Porém, trabalhos recentes

evidenciam a descoberta de uma periodicidade inesperada em vários decaimentos nucleares (JAVORSEK II, 2010).

Radiação nuclear é o nome dado às partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna, para atingir a estabilidade (TAUHATA et al., 2013). As três formas de radiações nucleares são brevemente descritas abaixo:

- Radiação  $\beta$  : Radiação beta ( $\beta$ ) é o termo usado para descrever elétrons de origem nuclear, carregados positiva ( $\beta^+$ ) ou negativamente ( $\beta^-$ ). Sua emissão é constituída por um processo comum em núcleos de massa pequena ou intermediária, que possuem excesso de nêutrons ou de prótons em relação à estrutura estável correspondente.

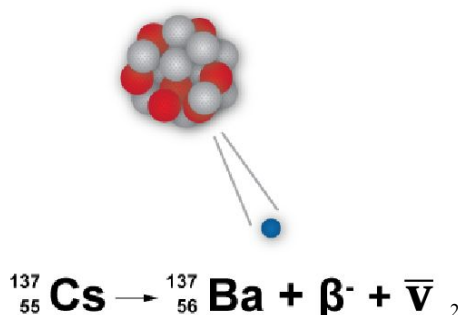


Figura 1 - Decaimento beta do Césio 137. Adaptado de <http://maisunifra.com.br>

- Radiação  $\alpha$  : Quando o número de prótons e nêutrons é elevado, o núcleo pode se tornar instável devido à repulsão elétrica existente entre os prótons, que pode superar a força nuclear atrativa, de alcance da ordem do diâmetro nuclear. Nesses casos pode ocorrer a emissão pelo núcleo de partículas constituídas de 2 prótons e 2 nêutrons (núcleo de  ${}^4\text{He}$ ), que permite que seja descartado 2 cargas elétricas positivas (2 prótons) e 2 nêutrons, e grande quantidade de energia. A emissão  $\alpha$  representa transições com energias bem definidas, e portanto com valores discretos. De modo semelhante ao decaimento beta, o processo de decaimento pode ocorrer por caminhos alternativos, emitindo assim partículas alfa com diferentes energias (TAUHATA et al., 2013).

---

<sup>2</sup> "Radiação alfa, beta e gama - MAIS Unifra." <http://maisunifra.com.br/conteudo/radiacoes-alfa-e-beta/>. Acessado em 17 nov.. 2020.

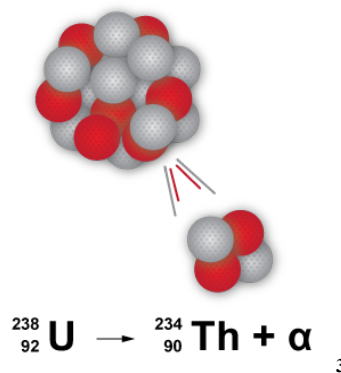


Figura 2 - Decaimento alfa do Urânio 238. Fonte: <http://maisunifra.com.br>

Outro exemplo de decaimento alfa, é do Amerício-241. Este elemento é obtido do plutônio pela absorção de um nêutron. O Am-241 decai pela emissão de uma partícula alfa para o Np-237. Este isótopo de amerício é usado em detectores de fumaça (EASON, 2011).

- Emissão gama ( $\gamma$ ): Quando um núcleo decai pela emissão de radiação alfa ou beta, geralmente o núcleo residual tem seus núcleons fora da configuração de equilíbrio, ou seja, estão alocados em estados excitados. Então para que o estado fundamental seja atingido, emitem a energia excedente sob a forma de radiação eletromagnética, que é denominada radiação gama ( $\gamma$ ) (TAUHATA et al., 2013).

### 3.6 Interação da Radiação com a Matéria e a Curva de Bragg

Uma vez que a radiação interage com a matéria, é necessário perceber como isso ocorre. Quando se trata das radiações indiretamente ionizantes (fótons e nêutrons), a palavra interação é empregada nos processos nos quais é alterada a energia ou a direção da radiação (TAUHATA et al., 2013).

No processo de transferência de energia de uma radiação incidente para a matéria, as radiações que têm carga, como elétrons, partículas  $\alpha$  e fragmentos de fissão, atuam

<sup>3</sup> "Radiação alfa, beta e gama - MAIS Unifra." <http://maisunifra.com.br/conteudo/radiacoes-alfa-e-beta/>. Acessado em 17 nov.. 2020.



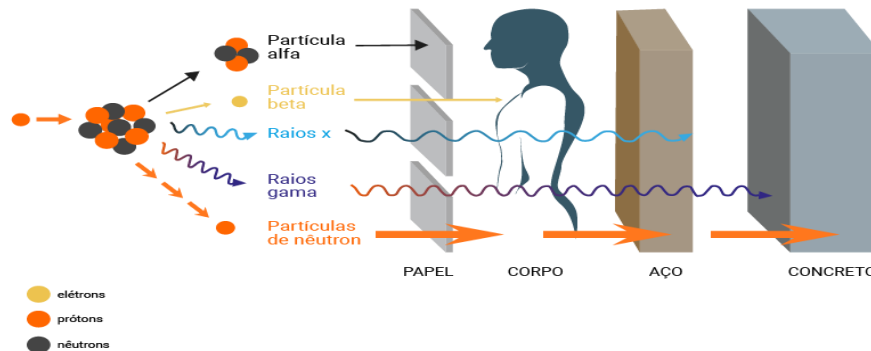
principalmente por meio de seu campo elétrico, e acabam assim transferindo sua energia para muitos átomos ao mesmo tempo. Estas são denominadas radiações diretamente ionizantes. Já radiações que não possuem carga, como as radiações eletromagnéticas e os nêutrons, são denominadas de radiações indiretamente ionizantes, pois essas interagem de forma individual, transferindo sua energia para elétrons, que na sequência irão provocar novas ionizações (TAUHATA et al., 2013).

Na faixa de energias que engloba os raios X e gama, existem várias interações possíveis com o átomo ou com elétrons atômicos ou ainda com o núcleo. Porém há também a possibilidade de não existir uma interação, isto é, a interação da radiação eletromagnética pode atravessar distâncias consideráveis em um meio material sem modificá-lo e sem se modificar (OKUNO, 2010).

Ao contrário das radiações eletromagnéticas, as partículas carregadas têm probabilidade de 100% de interagir com o meio material, pois há cargas distribuídas no meio e a força coulombiana é de longo alcance (OKUNO, 2010).

Partículas massivas carregadas, como a partícula alfa, interagem com a matéria principalmente por meio da força coulombiana entre sua carga positiva e a carga negativa dos elétrons orbitais do corpo que recebeu a radiação. Embora as interações da partícula com os núcleos também sejam possíveis, tais ocorrem raramente e normalmente não são significativas na resposta da radiação em detectores (OKUNO, 2010).

De maneira geral, quando um feixe de partículas carregadas incide em um material, o número de partículas deste feixe quase não modifica, porém a energia média das partículas sofre um decréscimo. W. Bragg, N. Bohr e E. Rutherford, interessados pelo estudo destas partículas, buscavam uma previsão e quantificação das perdas de energia das partículas, e assim, obter a previsão de deposição de energia no meio (OKUNO, 2010). Na figura 3 podemos ver esquematicamente a diferença da penetração das radiações em meios materiais, e no corpo humano.



4

Figura 3 - Poder de penetração na matéria dos tipos de radiações. Fonte: <https://radioprotecaonapratica.com.br>

As interações mais ocorrentes das partículas carregadas são com os elétrons orbitais, mas podem ocorrer com o átomo como um todo e também com o núcleo. Na tabela 1 podemos ver as interações:

Tabela 1 - Interações possíveis de ocorrer para partículas carregadas e consequências das interações. Adaptado de OKUNO, 2010.

Interação	O que muda no meio	O que muda na radiação incidente
Colisão inelástica com o átomo	Excitação atômica	Pequena perda de energia
Colisão inelástica com elétron fortemente ligado	Ionização	Grande perda de energia
Colisão elástica com o núcleo	Reco no núcleo	Mudança na direção da trajetória
Colisão inelástica com o núcleo		Grande, ou total perda de energia
Reações nucleares	Ionização	

<sup>4</sup> "Radiação - Entenda de uma vez por todas | Radioproteção na ...." 4 dez.. 2017, <https://radioprotecaonapratica.com.br/2017/12/04/radiacao-entenda-de-uma-vez-por-todas/>. Acessado em 17 nov.. 2020.

O poder de freamento (taxa média de perda de energia dos elétrons em qualquer ponto ao longo de sua trajetória) dessas partículas está relacionado com os processos de colisões, assim, o poder de freamento está relacionado com a ionização e excitação dos átomos do meio (OKUNO, 2010).

O comprimento total do caminho percorrido por uma partícula carregada antes de ser interrompida é chamado de intervalo. O alcance é considerado a soma da distância percorrida ao longo do caminho tortuoso, enquanto a projeção líquida medida ao longo da direção inicial do movimento é conhecida como penetração. A diferença entre o alcance e as distâncias de penetração resulta do espalhamento encontrado pela partícula ao longo de seu caminho. Para partículas carregadas pesadas com altas velocidades iniciais, dispersões de grande ângulo são raras, sendo que as trajetórias correspondentes são retas e a diferença entre o alcance e a distância de penetração é, para a maioria dos propósitos, insignificante (SILVERMAN *et al.*, 2017).

Quando a radiação alfa atinge um material, o número de partículas que penetram em determinada distância não altera muito em um certa distância, até que um determinado valor crítico seja atingido, após tal ser passado, ocorre uma rápida queda no número de partículas (BRAGG, 1912).

A energia das partículas alfa que penetram dada distância diminui de forma gradual à medida que a distância é aumentada, desaparecendo neste valor crítico. Assim, se a partícula alfa possui uma trajetória retilínea, e se perde sua energia produzindo ionização ao longo de sua trajetória, existe então um alcance máximo para esta partícula. O efeito ionizante da passagem das partículas alfa termina repentinamente numa distância crítica da fonte de origem destas partículas. Essa distância depende da energia inicial da partícula e do material atravessado (BRAGG, 1912).

Bragg (1912), concluiu com seus estudos que:

- A partícula alfa não é consideravelmente espalhada ao passar por um meio, mas apenas “absorvida” apenas através do gasto de sua energia produzindo ionização no meio.
- A partícula alfa tem um alcance máximo em qualquer material, e depende de

sua energia inicial.

- A partícula alfa produz mais ionizações no meio à medida que sua velocidade diminui.

Portanto, a dependência com o inverso da energia da partícula alfa a altas velocidades mostra que partículas mais lentas interagem por um tempo maior com os elétrons do meio e, portanto, podem ionizá-los mais eficientemente (FONSECA, 2010).

Uma curva de densidade de ionização versus distância em um determinado meio é chamada de curva de Bragg. O chamado pico de Bragg, indica que partículas alfa perdem a maior parte de sua energia no final de seu caminho. A Figura 4 mostra a intensidade das partículas no meio versus a distância. Para maiores distâncias, ao longo do trajeto da partícula, a intensidade é constante, ou seja, as partículas diminuem de velocidade, mas seu número não muda. No entanto, no final do trajeto, a intensidade não cai imediatamente para zero, porém diminui ao longo de uma determinada distância da fonte da partícula. Assim, a densidade de ionização (número de íons por unidade de comprimento do caminho) produzida por uma partícula carregada ao longo de sua trajetória aumenta à medida que a partícula desacelera. Eventualmente, atinge um máximo denominado pico de Bragg próximo ao final de sua trajetória. (ILIADIS, 2014).

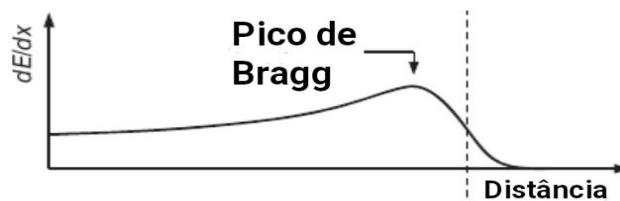


Figura 4 - Poder de freamento versus distância. Adaptado de: ILIADIS, 2014.

As partículas alfa perdem a maior parte de sua energia no final do caminho. O máximo na figura 4 corresponde a uma energia  $E$ , que é chamada pico de Bragg. Assim, à medida que a partícula alfa perde sua velocidade, sua capacidade de ionizar o meio aumenta, atingindo um máximo no final de sua trajetória (pico de Bragg). Isto mostra que durante a maior parte do trajeto, a partícula é freada, isto é, o poder linear de freamento aumenta aproximadamente com o inverso da energia. Como Bragg previu, a ocorrência em profundidade depende da

energia do feixe de partículas, assim como esperado, a profundidade ou alcance do pico de Bragg depende da energia do feixe (CHRISTOVAO, 2010).

A perda de energia ao longo da trajetória de uma partícula carregada pode ser esboçada numa curva conhecida como curva de Bragg. (FONSECA, 2010).

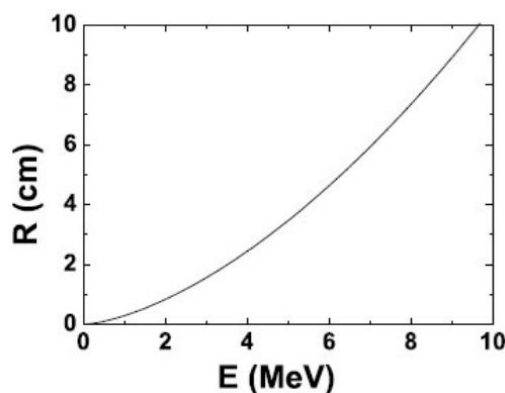


Figura 5 - Alcance da partícula alfa no ar em função de sua energia. Fonte: FONSECA, 2010.

Dentre equações empíricas desenvolvidas para relacionar o alcance no ar e a energia de partículas alfa, uma muito precisa, para partículas alfa com energia entre 4,0 e 11,0 MeV e é dada por:

$$R = (0,005E + 0,285)E^{3/2} \quad (1),$$

onde R é dado em cm e E em MeV. Na figura 5 pode-se ver claramente que o alcance de uma partícula alfa depende de sua energia, sendo que quanto maior a energia da partícula maior será o seu alcance (FONSECA, 2010). Uma amostra de Am-241 emite partículas alfa com energia de 5,4 MeV, assim, de acordo com a equação 1, essas partículas terão um alcance máximo de cerca de 4cm.

A conexão entre a energia inicial  $E_0$  de uma partícula carregada e o alcance R em um meio homogêneo com perda de energia contínua é referida como poder de frenamento. Tanto o poder de frenamento quanto o intervalo devem ser entendidos como valores médios sobre um conjunto de átomos ou moléculas, porque a perda de energia é um fenômeno estatístico. As flutuações são esperadas, e em geral, essas flutuações são chamadas de *straggling* (dispersão), e existem vários tipos. O mais importante entre eles é o *range straggling*, que sugere que, por razões estatísticas, as partículas no mesmo meio têm caminhos variados entre as mesmas energias inicial e final. As medições de alcance e poder de frenamento são de

grande importância na identificação de partículas e a medição de suas energias. A teoria pela qual Bethe encontrou um número de parada é geralmente aceita como a que fornece a estrutura para a compreensão da variação do alcance com a energia (SILVERMAN et al., 2017).

Uma variável conveniente que descreve as propriedades de ionização do meio circundante é o poder de frenamento, sendo que o poder de frenamento linear do material é definido como a razão da perda de energia diferencial para a partícula dentro do material para o comprimento do caminho diferencial correspondente:

$$S(T) = -\frac{dT}{dx} = n_{\text{ion}} \bar{I}, \quad (2)$$

onde  $T$  é a energia cinética da partícula carregada,  $n_{\text{ion}}$  é o número de pares elétron-íon formados por unidade de comprimento de caminho e  $I$  denota a energia média necessária para ionizar um átomo no meio. Para partículas carregadas,  $S$  aumenta à medida que a velocidade da partícula diminui (KNOLL, 2000).

Se a quantidade de ionização e excitação produzida pela partícula alfa depende da distância de sua origem, a relação entre a distância e a ionização produzida pela passagem da partícula alfa pode ser medida usando um detector de câmara de ionização, que produzirá um sinal elétrico proporcional à ionização produzida pela partícula alfa em seu volume sensível (WENZEL, 2020; BRAGG, 1912; BETHE, 1997). Assim, variando a distância entre a fonte radioativa e o detector, e medindo a ionização do meio causada pelas partículas alfa, pode-se encontrar a curva de Bragg, que mostra como a variação da energia ionizante varia em função da distância. Conforme mostrado por Bragg, o poder ionizante de uma partícula alfa é aproximadamente constante para a primeira parte de seu caminho, aumenta para um máximo pouco antes do intervalo da partícula ser completado e cai rapidamente para zero (BRAGG, 1912). As Equações 3 e 4 apresentam a fórmula de Bethe que descreve a perda de energia específica,  $-dE/dx$ , de uma partícula pesada carregada na matéria (BETHE, 1997).

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2 N B}{m_0 v^2} \quad (3)$$

$$B = Z \left[ \ln \frac{2mv^2}{I} - \ln \left( 1 - \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right) - \left( \frac{v}{c} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Nas equações 3 e 4,  $E$ ,  $Ze$  e  $v$  representam energia, carga e velocidade da partícula,  $N$  e  $Z$  são a densidade numérica e o número atômico dos átomos absorvedores,  $m_0$  é a massa de repouso do elétron,  $e$  é a carga eletrônica e  $I$  representa a excitação média e potencial de ionização do absorvedor. Visto que  $B$  varia lentamente com a energia da partícula, o comportamento geral de  $dE/dx$  para uma partícula não relativística varia aproximadamente com  $1/v^2$ , ou inversamente com a energia da partícula. No final do caminho, a partícula pega elétrons dos átomos absorvedores, reduzindo sua carga, e a perda de energia específica cai para zero (KNOLL, 2000). Esse aumento na perda de energia específica seguido por uma queda caracteriza o que ficou conhecido como curva de Bragg.

### **3.7 Aplicação Moderna da Curva de Bragg**

A interação da radiação alfa com a matéria, e os estudos de Bragg, possibilitaram o desenvolvimento de métodos médicos modernos que se utilizam da curva de Bragg. Visto que partículas, como prótons apresentam uma curva de Bragg característica, se desenvolveu uma técnica médica revolucionária, que é a Terapia com feixe de prótons. As partículas carregadas depositam a maior parte de sua dose em uma faixa estreita, chamada pico de Bragg. A radioterapia com prótons energéticos permite que os oncologistas projetem tridimensionalmente os planos de tratamento e para obter uma melhor localização da área que irá receber a dose de radiação. Isso significa que pode-se usar uma dose maior no tumor, enquanto limita a dose total do paciente, sendo que este recurso torna esta tecnologia superior ao tratamento de fótons (radioterapia convencional) (TRIBBLE et al., 2007).

O uso de partículas na radioterapia foi proposto inicialmente em 1946 pelo físico Robert Wilson, porém levou vários anos para que o primeiro paciente recebesse um tratamento com feixes de prótons no Laboratório Nacional Lawrence Berkeley, na Califórnia, em 1954. Wilson descreveu a característica física fundamental da curva de dose em profundidade para prótons e partículas pesadas em comparação com ondas eletromagnéticas. Ele descreveu a forma como os feixes de partículas depositam sua energia quando o feixe entra no corpo em direção ao tumor: uma quantidade menor de energia é liberada primeiro e,

em seguida, uma quantidade muito maior de energia do feixe é liberada no final de seu caminho ( Pico de Bragg) e, em seguida, para completamente (PROTOM INTERNATIONAL, 2018).

No final da década de 1970, os avanços em imagens, juntamente com o desenvolvimento de computadores sofisticados e aceleradores aprimorados e tecnologia de tratamento, tornaram a terapia de prótons mais viável para aplicações médicas de rotina, como o tratamento do câncer. A partir de 1975, os médicos do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley trataram centenas de pacientes com outros feixes de partículas, incluindo íons de carbono, porém este programa terminou em 1992. Somente nos últimos anos tornou-se possível desenvolver instalações de feixe de prótons em conjunto com centros médicos estabelecidos (MOHAMAD, 2018).

O método de terapia com feixes de prótons tem implicações positivas significativas para o tratamento de muitos tipos de câncer. Uma das principais vantagens da terapia de prótons é seu nível preciso de controle de dosagem.

Partículas carregadas, como prótons ou íons de carbono, têm um alcance máximo no tecido, determinado por sua energia. Diferentemente dos raios X, que transmitem doses ao longo de todo o caminho através do tecido, as partículas carregadas liberam a maior parte de sua energia em uma região bem definida do pico de Bragg. Ao utilizar uma variação de energias, é possível criar uma distribuição de dose na profundidade do tumor, que é chamada de "pico de Bragg espalhado" (NICHOLS, 2015). Na figura 6 podemos ver a diferença entre a transmissão de energia entre um tratamento convencional com raios X e com feixe de prótons.

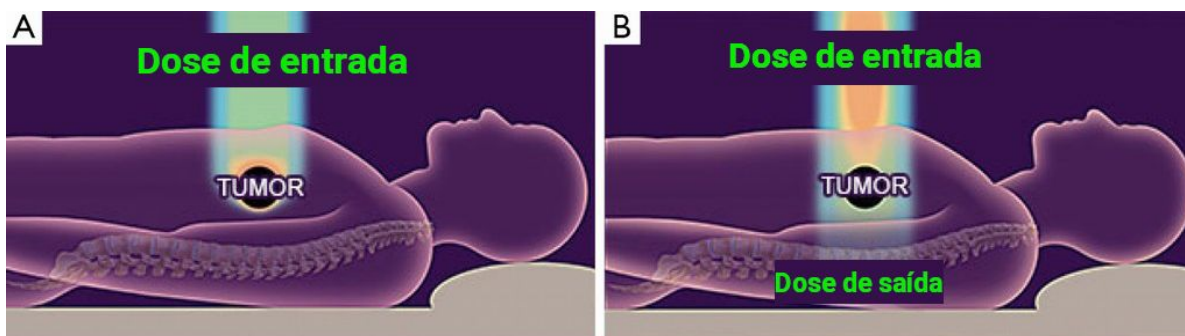
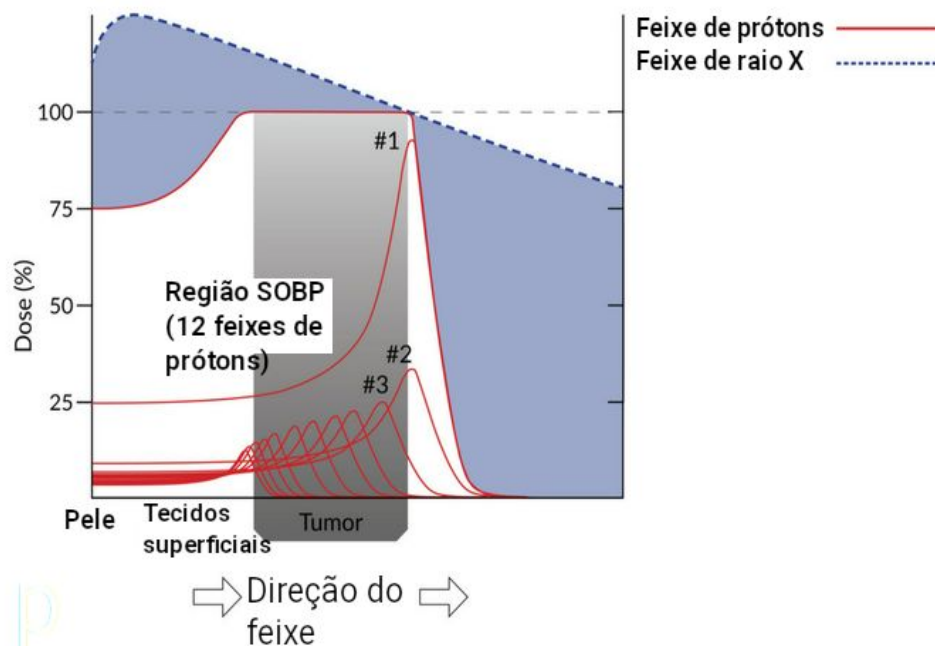


Figura 6 - (A) Dose absorvida com o tratamento de feixes de prótons; (B) Dose absorvida com tratamento de raios X. Adaptado de NICHOLS, 2015.



Na figura 6 (A) pode-se ver que o tratamento com partículas carregadas, como prótons ou íons carbono, a dose inicial é baixa, e a dose mais alta é depositada na profundidade do alvo do tumor. Com prótons, não há dose de saída além do alvo. Na figura 6 (B), observa-se que no tratamento com raio X, a dose mais alta é no ponto de entrada do feixe no paciente. A dose do tumor é menor que a dose de entrada e uma dose de saída significativa é entregue além do alvo. Assim, na radiação com prótons, a quantidade de energia ionizante começa relativamente baixa à medida que entra no tecido do paciente, porém a quantidade de energia transmitida ao tecido circundante por um próton aumenta ao longo de uma curva exponencial até atingir seu alvo, onde a energia transmitida atinge seu pico antes de cair para zero. (NICHOLS, 2015).

A curva da dose absorvida em função da espessura do tecido absorvedor mostra um pico de Bragg típico, de modo que a largura depende da natureza da radiação, da energia espalhada (*straggling*) e do material do absorvedor. A região inicial, antes do pico de Bragg, exibe uma distribuição de dose aproximadamente constante, apresentando em torno de 30% da dose máxima. Como benefício, o pico de Bragg é bastante estreito ao atingir o volume alvo, não afetando tão prejudicialmente o material em torno. Visto que os feixes de prótons são muito mais estreitos, eles permitem o tratamento de tumores de uma maneira muito mais precisa. Isso permite que os médicos controlem a localização do pico de Bragg e, portanto, a deposição de radiação. Conforme um próton penetra no tecido, ele se move extremamente rápido, de forma que mal interage com os átomos do tecido circundante. Conforme ele interage, ele perde energia e fica mais lento. À medida que desacelera, ele interage com mais átomos e transmite mais energia até que o próton fique sem energia e pare (CHRISTOVAO, 2010).



5

Figura 7 - Dose produzida por feixes de prótons comparado com a de raio X. Adaptado de PROTOM INTERNATIONAL, 2018.

Na figura 7 pode ser observado a diferença entre vários feixes de prótons, onde na região #2 e #3, são feixes de prótons produzidos com energias desejadas de forma que se possa ter um pico de ionização na região do tumor, diminuindo lesões de tecidos saudáveis. A região SOBP (spread-out Bragg peak - pico de Bragg espalhado), é uma faixa espacial usada para ampliar a extensão de profundidade do tratamento. Uma região SOBP é criada variando um pouco a energia do feixe de prótons incidente, usando várias energias com ponderação apropriadas. Em contraste, o feixe de raio X afeta todo o tecido, tanto o saudável quanto o tumor. Assim, ao contrário dos raios X, os feixes de prótons causam menos danos quando entram nos tecidos em alta velocidade, atingindo o pico de ionização no alvo estabelecido. Diante disso, podemos ver a física que possibilita uma opção por uma forma melhorada de radioterapia; um que mata células cancerosas, mas com redução dos danos colaterais ao tecido saudável circundante (PROTOM INTERNATIONAL, 2018).

Hoje em dia, no tratamento médico, os feixes de prótons são mais utilizados para o

<sup>5</sup> "The Bragg Peak - ProTom." 18 jun.. 2018, <https://www.protominternational.com/2018/06/bragg-peak/>. Acessado em 19 nov.. 2020.

tratamento de tumores por apresentarem um pico de Bragg mais acentuado e pela possibilidade de modificação da energia do feixe. A escolha do uso de partículas alfa neste trabalho se deve à similaridade das curvas de Bragg das partículas alfa e prótons, e à facilidade de obtenção de uma amostra radioativa de baixa intensidade.

### **3.8 Câmara de ionização**

Para verificar experimentalmente a interação da radiação com a matéria, e a curva de Bragg característica da radiação alfa emitida por uma amostra de baixa atividade, propomos a construção e uso de uma câmara de ionização de baixo custo.

Nos primórdios da radioterapia, a medida da quantidade de radiação era realizada a partir de efeitos químicos e biológicos detectáveis disponíveis na época. Como exemplo, usava-se a mudança de cor de compostos químicos, métodos fotográficos (quantímetro de Kienbock comunidade X), ou ainda, de forma mais ousada, o avermelhamento da pele como indicador de dose recebida. Medidas radioativas baseadas em câmaras de ionização foram realizadas por Blythswood e Scoble em 1907 e por Villardem 1908 (VIGNA FILHO et al., 2001).

Quando os gases são atravessados por certas radiações, como, por exemplo raios catódicos, eles são condutores de eletricidade. O mesmo resultado é o produzido pelas radiações a partir de substâncias radioativas, e a partir dessa propriedade baseia-se o método para detectar substâncias radioativas, e medir as intensidades das radiações emitidas por elas (MAKOWER, 1912).

Quando um gás ionizado é submetido a um campo elétrico, ocorre uma passagem de corrente elétrica que, desde que o campo não seja tão intenso, proporcional à diferença de potencial entre os eletrodos imersos no gás. Assim, o gás se comporta como um condutor metálico e obedece à Lei de Ohm. Quando uma partícula carregada atravessa o detector, ela ioniza o meio e produz pares elétron-íon. Devido ao campo elétrico, os elétrons migram para o anodo e os íons para o catodo, produzindo assim um sinal, que dá origem a uma corrente (MAKOWER, 1912).

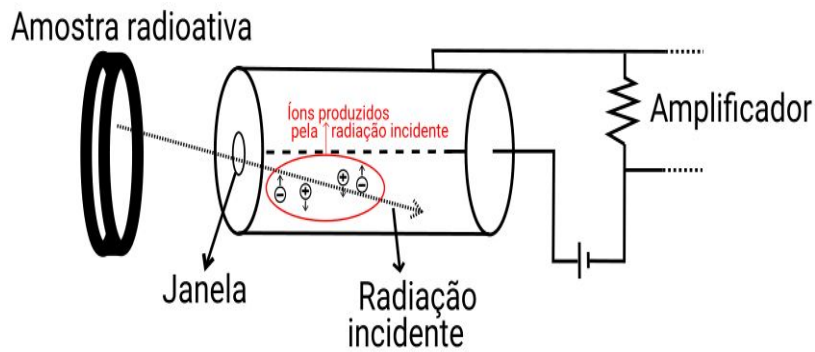


Figura 8 - Diagrama esquemático da câmara de ionização. Fonte: Autor.

Nas câmaras de ionização, o número de elétrons e de íons positivos detectados é uma medida da energia depositada no material, então deve-se evitar que qualquer par elétron-íon seja recombinado. Para isso, é aplicada uma tensão suficientemente alta no meio. Este campo irá separar as cargas, e empurrá-las para os seus respectivos eletrodos coletores, prevenindo assim que se recombinem (MAKOWER, 1912).

Porém, quando a tensão é aumentada além de um determinado limite, a corrente aumenta menos e, rapidamente, tende a um limite, tornando-se independente da tensão aplicada. Esse valor limite é conhecido como corrente de saturação (MAKOWER, 1912).

Na figura 9 pode-se ver a curva característica da corrente de saturação para uma câmara de ionização, sendo que o processo de recombinação ocorre em baixas tensões, e à medida que a tensão aumenta, há menos recombinação e a corrente elétrica aumenta. Quando a tensão se torna suficiente para causar a coleta completa de todas as cargas produzidas, a curva entra em um platô (região de saturação).

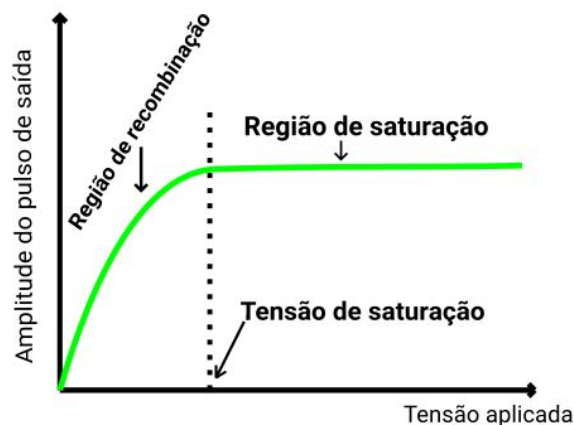


Figura 9 - Curva de saturação para uma câmara de ionização. Fonte: Autor.

As dimensões da câmara de ionização exercem influências sobre a tensão necessária para a saturação, bem como a saturação também depende do gás ionizado.

Em uma câmara de ionização, seu campo elétrico é gerado através de duas placas condutoras cuja separação define um volume sensível chamado cavidade, preenchido geralmente por ar. Estando então em contato com a atmosfera externa, essa massa de ar contida na câmara apresenta uma dependência com as condições de temperatura, pressão e umidade. Uma de suas placas deve ser aterrada, enquanto a outra é submetida a um potencial grande o suficiente para coletar os íons gerados entre as placas, evitando que os íons sejam acelerados, o que provocaria novas ionizações por colisões. O número ou a taxa de íons coletados é o sinal registrado (KNOLL, 2000; MAKOWER, 1912).

A intensidade da corrente de ionização em condições típicas é muito pequena para ser medida usando medidores comuns, em vez disso, deve ser usado amplificadores da corrente, permitindo assim a medição indireta da corrente gerada (KNOLL, 2000).

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS - CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO**

O detector proposto é do tipo câmara de ionização de placas paralelas, tendo como princípio básico de funcionamento a coleta de cargas criadas pela ionização do gás presente no interior da câmara (ar), de forma que esta interação é medida diretamente, devido ao campo elétrico estabelecido entre dois eletrodos.

A figura 10 mostra o circuito proposto para o levantamento experimental da curva de Bragg. Abaixo a lista de componentes necessários para a construção do detector:

- 2 pedaços de placa de fenolite (aproximadamente 25x15mm);
- Percloroeto de ferro para corrosão da placa;
- Caneta permanente para demarcar as linhas que serão os eletrodos;
- Uma lata metálica que comporá a blindagem da câmara de ionização;
- 1 paquímetro;
- 1 palito de madeira para fixação dos eletrodos e circuito eletrônico;

- 1 resistor de valor 4k7 de  $\frac{1}{4}W$  ou  $\frac{1}{8}W$ ;
- 1 transistor BC517;
- 1 transistor BC557;
- 1 bateria 9V e 1 clip para bateria;
- 1 multímetro;
- 1 amostra radioativa - Am-241.

O detector tem por base um transistor do tipo Darlington BC517 de alto ganho. Todo o circuito do detector, bem com amostra radioativa, fica dentro da lata de alumínio, que por sua vez é ligada ao negativo da bateria, constituindo uma blindagem eletrostática. É importante a utilização de uma lata metálica pelo motivo da mesma oferecer uma blindagem eletrostática para o circuito, e proteger as medidas de interferências pela movimentação de ar nos eletrodos, o que pode causar distorções dos dados obtidos de tensão.

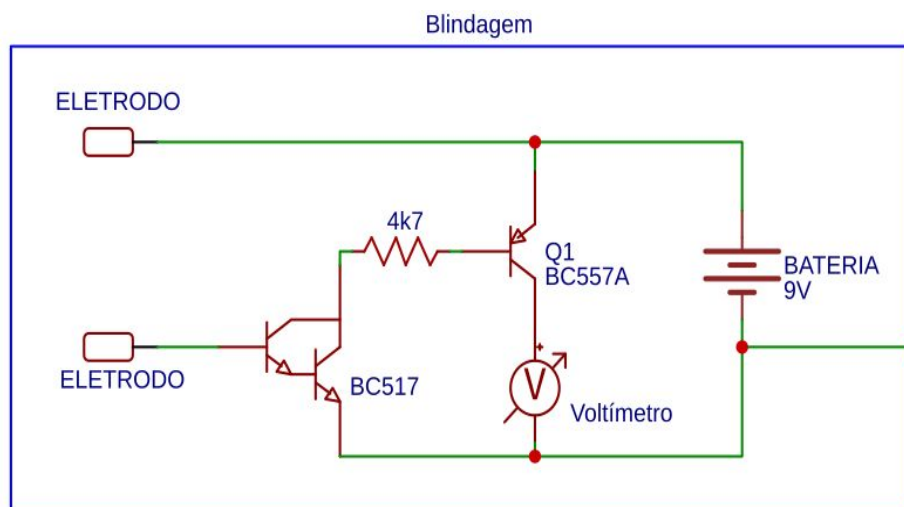


Figura 10 - Circuito do detector proposto. Fonte: Autor.

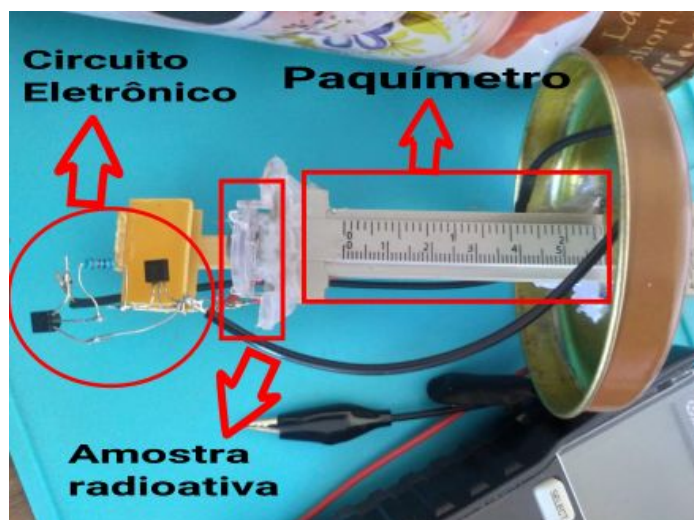


Figura 11 - Montagem do detector proposto. Fonte: Autor.

Na figura 11 podemos ver a disposição do circuito eletrônico, que é soldado todo diretamente dos eletrodos, e por contar com apenas 3 componentes, fica firmemente apoiado. Vemos também o paquímetro que é apoiado na tampa da lata, e na ponta do paquímetro é fixado a amostra radioativa de Am-241. Optou-se por esta amostra por ser de fácil acesso, visto que é utilizada em detectores de fumaça. Essa amostra costuma ter a mesma ordem de grandeza das atividades que obedecem aos critérios de exclusão, isenção e dispensa de requisitos de proteção radiológica conforme CNEN (2011), 10 kBq para o Am-241. Na montagem da amostra radioativa, mesmo em se tratando de uma amostra de baixa atividade e energia, e com emissão de radiação alfa de baixo alcance, deve-se tomar um cuidado especial, sendo necessário o uso de EPI's (Equipamento de proteção individual). Aconselha-se o uso de luvas e pinça para manipulação da fonte radioativa, que por sua vez deve ser sempre mantida a uma distância de pelo menos 5 cm do manipulador. Caso o manipulador tenha alguma dúvida em relação a amostra radioativa e sua manipulação, aconselha-se fortemente que se busque um profissional especializado. Por mais que seja uma amostra que não apresenta alta atividade, e que a radiação alfa não tenha um alcance longo, sempre é sensato tomar precauções na sua manipulação.

É importante colimar a amostra radioativa, para que os eletrodos não colem um feixe de áreas diferentes de partículas alfa ao modificar a posição da amostra radioativa. O colimador utilizado na montagem é de plástico, possuindo abertura de 4,5mm e comprimento

de aproximadamente 7mm. Para a construção do colimador pode ser utilizado um pedaço de caneta ou outro material que possua abertura e comprimento similares.

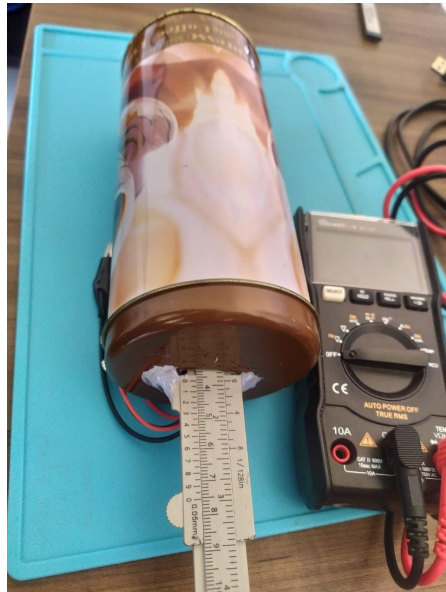


Figura 12 - Detector proposto. Fonte: Autor.

Na figura 12 é visto a câmara de ionização fechada. Na parte externa fica parte do paquímetro, para que seja possível fazer o ajuste de posição da amostra radioativa com segurança, e sem precisar abrir a tampa com o circuito. Isto facilita a coleta de dados e a estabilidade dos valores de tensão obtidos.

Como a ionização produzida pela radiação alfa ao passar pelo meio, será proporcional ao valor de voltagem obtido, propôs-se tornar os eletrodos especialmente estreitos (cerca de 1mm) para uma melhor precisão da relação voltagem-ionização gerada. Com isso, com somente o transistor BC517, o sinal de voltagem atinge no máximo cerca de 70mV. Para se ter uma melhor leitura de voltagem (em multímetros mais simples principalmente), utilizou-se mais um transistor de uso geral BC557. Com este circuito a faixa de voltagem devida à ionização gerada fica em torno de 0,3 - 7,5V.

O detector se mostra robusto e apresenta boas medidas de voltagem referente à corrente de ionização. O sinal se torna estável após 30-60s posicionar a amostra radioativa na posição desejada. Isto torna a experimentação rápida, podendo ser realizado o levantamento de dados em cerca de 25min.

A blindagem metálica da câmara de ionização permite a manipulação do detector



durante o levantamento de dados, não ocorrendo interferências na detecção pela sua movimentação ou pelo toque do instrumentador. Assim, a manipulação pode ser realizada sem maiores preocupações de interferências externas na medida de ionização. Isto permite que os alunos possam realizar a experimentação com maior praticidade, tranquilidade e segurança.

Pelo motivo de toda a base do detector ser fixada na tampa da lata metálica, pode-se desencaixar a tampa e mostrar a disposição dos componentes, para que não se torne algo obscuro no entendimento dos estudantes como cada parte funciona e como deve estar disposta.

Para efetuar a medição de tensão versus posição, sugere-se que seja feita a cada 2mm, acelerando o processo experimental. Porém nada impede que seja feita a cada 1mm. Os valores de posição devem ser ajustados, visto que pela disposição do paquímetro, quando a amostra radioativa está mais distante tem-se menores valores no paquímetro e vice-versa. Na câmara de ionização construída, quando a amostra está mais afastada, mede-se o valor de 0 cm, e quando está mais próxima possível dos eletrodos mede-se o valor de 7,3 cm. Após a coleta de dados de tensão e posição, os valores podem ser ajustados facilmente em uma planilha eletrônica.

Outro ponto importante a ser citado é a necessidade que se tem de transformar os valores de tensão de modo que os mesmos fiquem negativos. Isso se dá pelo motivo de que a curva de Bragg é obtido pela seguinte relação (KNOLL, 2000):

$$\frac{\partial E}{\partial x} = - \frac{\partial U}{\partial x} \quad (5)$$

onde E é a energia de ionização, e a função U é a curva ajustada sobre os dados coletados de tensão versus posição.

Assim, uma vez obtido o gráfico de tensão (negativa) versus posição, e ajustada a curva sobre os dados experimentais, basta aplicar a derivada sobre a curva ajustada e se obterá a curva de Bragg. Para a obtenção dos gráficos bem como das análises aconselha-se o uso do software QtiPlot, que conta com uma versão gratuita até esta data. Outra sugestão seria o software totalmente gratuito SCiDavis que apresenta funcionalidades semelhantes. Mais detalhes sobre este tratamento de valores, e ajustes de curva podem ser encontrados no Apêndice e no Produto Educacional proveniente deste trabalho.

## 5. PROPOSTA DIDÁTICA

Por se tratar de um assunto que requer um tratamento matemático de nível superior e levando em consideração as limitações matemáticas do ensino médio, a abordagem na proposta metodológica prioriza a parte qualitativa dos fenômenos.

Na construção da proposta metodológica procurou-se privilegiar uma concepção de ensino onde o assunto radiação e interação seja abordado de forma que se possa compreender como ocorre qualitativamente, quais as implicações históricas, sociais e tecnológicas.

Com isso, é permitido ao aluno a compreensão de quais são os riscos e benefícios que a aplicação de uma teoria científica pode trazer para a sua vida, bem como para a sociedade em que vive. Isto habilita-o a questionar e também decidir sobre questões que envolvam conhecimentos de Ciência e Tecnologia, e as implicações sociais provindas dessas situações.

A sequência didática seguiu as etapas abaixo:

### 1. Retomada histórica do desenvolvimento da física moderna e física nuclear;

A questão norteadora desta etapa foi: Quais os impactos do desenvolvimento tecnológico para a sociedade?

Explicação do desenvolvimento histórico da física moderna e nuclear e seus principais colaboradores. Discute-se as questões sociais e a busca tecnológica que levaram ao desenvolvimento destas áreas.

Como forma de instigação e para e aumentar a curiosidade dos alunos, foi proposto a leitura das seguintes matérias sobre os acidentes de Chernobyl (como o seriado Chernobyl<sup>6</sup>), o acidente de Goiânia, e sobre o perigo da radiação:

<https://www.bbc.com/portuguese/vert-fut-49256601>

<https://www.bbc.com/portuguese/geral-45783343>

<https://www.dw.com/pt-br/os-perigos-da-radiao/C3%A7%C3%A3o/a-829381>

Como complementação, os alunos assistiram uma reportagem sobre os 30 anos do acidente de Goiânia: <https://www.youtube.com/watch?v=VUHLS1WL6FM>

Esses materiais proporcionaram nas próximas etapas um debate mais

---

<sup>6</sup> "Chernobyl - Parte 01 | HBO Brasil."

<https://www.hbo brasil.com/series/detail/chernobyl---parte-01/14789/ttl727646>. Acessado em 15 nov.. 2020.

aprofundado e instigando mais questionamentos sobre a interação da radiação com a matéria e do perigo de exposição a materiais radioativos.

Abaixo segue algumas sugestões de matérias de outras aplicações da física nuclear:

<https://www.h9j.com.br/suasaude/paginas/Voc%C3%AA-sabe-o-que-%C3%A9-Medicina-Nuclear.aspx>

<http://radiologiaindustrial.com.br/irradiacao-de-alimentos/>

[http://www.tecnologiaradiologica.com/materia\\_riconceito.htm](http://www.tecnologiaradiologica.com/materia_riconceito.htm)

### **Objetivos:**

- Compreender o desenvolvimento histórico e tecnológico da física nuclear;
- Instigar a curiosidade sobre as questões sociais que levaram a desenvolvimentos tecnológicos;
- Investigar os impactos sociais do desenvolvimento científico e tecnológico.

## **2. Radiação nuclear;**

Na segunda etapa deu-se a explicação dos decaimentos alfa e gama, bem como a diferença entre as duas, e como ocorrem na natureza. Trabalhou-se o tema sobre a interação da radiação com a matéria, e quais as implicações sobre tecidos biológicos. A relação sobre sociedade e radiação foi exposta lembrando acontecimentos históricos como o acidente de Chernobyl e de Goiânia.

A pergunta que norteou essa etapa é: Qual é a relação entre sociedade e radiação ionizante?

Para continuidade a próxima etapa, os alunos leram a matéria abaixo:

<https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2011/05/25/efeitos-biologicos-das-radicoes-ionizantes/>

Como sugestão de aprofundamento para os alunos, pode ser feita a leitura de alguns tópicos específicos da apostila educativa de física nuclear, disponível em:

[https://200.20.226.66/images/phocagallery/cnen\\_na\\_escola/apostila\\_educativa\\_aplicacoes.pdf](https://200.20.226.66/images/phocagallery/cnen_na_escola/apostila_educativa_aplicacoes.pdf)

### **Objetivos:**

- Compreender os tipos de radiações bem como suas diferenças e semelhanças;
- Instigar o pensamento crítico sobre a relação que a sociedade tem com o desenvolvimento tecnológico;
- Discutir os impactos causados por acidentes nucleares;
- Compreender a diferença entre exposição e contaminação radiológica.

### **3. Curva de Bragg e a interação da radiação com a matéria;**

Nesta etapa, explorou-se a curva de Bragg, bem como sua interpretação. Os alunos foram questionados sobre quais métodos de tratamento de tumores eles conhecem, e após isto, foi exposto as diferenças de tratamentos, bem como as implicações modernas da curva de Bragg na medicina para o tratamento de tumores como a Terapia com feixe de prótons, explicitado qual o benefício de se utilizar tal método.

A pergunta central dessa etapa foi: Quais perigos da radiação para a vida biológica, e que cuidados devem ser tomados para prevenção de exposição e contaminação.

### **Objetivos:**

- Compreender as possíveis interações da radiação com a matéria;
- Compreender como a passagem da radiação em um meio pode ioniza-lo;
- Debater e perceber os efeitos biológicos da radiação ionizante;
- Perceber como a ionização em um meio causada por partículas carregadas pode ser utilizada em tratamentos medicinais.

4. **Prática experimental** – Ocorreu de forma virtual ao vivo, onde o professor manipulou os materiais. Para que ocorresse de forma dinâmica, foi feito uso de duas

câmeras de modo alternado, uma focalizada no professor e outra na câmara de ionização.

Toda essa etapa norteou-se pela pergunta: Como uma partícula alfa interage em todo o seu percurso?

Antes de iniciar o procedimento experimental, discutiu-se o funcionamento de um detector de radiação do tipo câmara de ionização.

Nesta etapa realizou-se o levantamento da curva de Bragg. Os alunos foram encorajados a refletir sobre o que estava acontecendo enquanto o material era manipulado. Neste momento os alunos foram então incentivados a responder algumas perguntas como:

- Qual a relação entre a posição da amostra radioativa e o valor de tensão obtido?
- Como varia a relação da posição da amostra radioativa com a tensão correspondente?
- Em que faixa de posição ocorre a maior variação de tensão, e o que isso significa?

### **Objetivos:**

- Compreender o funcionamento de uma câmara de ionização;
- Perceber como uma câmara de ionização pode ser utilizada para encontrar experimentalmente a curva de Bragg;
- Instigar a curiosidade sobre como a posição da amostra radioativa influencia no valor medido na câmara de ionização;
- Motivar a procura por outros tipos de detectores de radiação, bem como suas características e diferenças.

Ao finalizar a sequência didática, foi requisitado aos alunos que produzissem um relato sobre o que foi feito experimentalmente e quais conclusões eles chegaram.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sequência didática foi aplicada em uma turma de 3º ano do ensino médio de uma escola particular de Guarapuava/PR. As aulas de física ocorrem em cinco aulas por semana. O colégio conta com material pedagógico próprio, sendo uma apostila por bimestre. No primeiro semestre escolar é trabalhado todo o conteúdo do 3º ano do ensino médio, e no segundo semestre é revisto todo o conteúdo de física do ensino médio.

Devido às paralisações de aulas presenciais no ano de 2020 devido ao COVID-19, as aulas foram adaptadas para aplicação em aulas síncronas. Pela falta de contato visual com os alunos, e a proximidade característica em sala de aula, os alunos foram incentivados a ligarem as câmeras e a participar das aulas de forma ativa.

No momento em que foi dito que seria feito algumas aulas especiais sobre física nuclear e aplicações modernas, todos os alunos mostraram-se interessados e empenhados pelo conteúdo de física, o que facilitou o andamento da aula. Assim, as aulas foram realizadas na totalidade de forma virtual e com a participação de todos.

A seguir temos alguns relatos da aplicação da sequência didática.

### AULA 1

Na etapa 1, enquanto era exposto o desenvolvimento histórico da física até o culminar da física moderna e física nuclear, a turma foi questionada sobre a utilização da energia nuclear.

P: Qual a utilização possível de materiais radioativos?

Turma: Em *usinas nucleares*.

P: Em quais países é utilizado?

Aluno 1: *Em Chernobyl não mais...*

Turma: *risos...*

Aluno 1: Na Alemanha e França tem usinas nucleares.

P: E no Brasil, tem uma usina nuclear?

Turma: *acho que não.*

P: Em Angra, no Rio de Janeiro.

Após ser discutido onde existem usinas nucleares, foi discutida a questão da segurança quando se trata de materiais radioativos.

P: Tirando o acidente da usina de Chernobyl, quais outros acidentes vocês conhecem?

Turma: Fukushima foi uma usina também?

P: Foi uma usina nuclear em Fukushima.

P: No Brasil já ocorreu algum acidente?

Turma: *Não sabemos.*

P: Ocorreu na década de 80 um grave acidente de Goiânia.

## **AULA 2**

Na aula seguinte (etapa 2), onde os alunos leram as matérias sobre os acidentes de Chernobyl e de Goiânia, foi discutido sobre as causas e efeitos dos acidentes, bem como isso afetou a sociedade onde o acidente ocorreu. Neste momento a maioria dos alunos participaram, onde todos expressaram sentimentos de tristeza e de espanto de como estes acidentes ocorreram. Muitos se entristeceram quando foi relatado com mais detalhes o caso da menina Leide das Neves que morreu por contaminação de Césio-137. Neste momento um aluno expressou:

Aluno 2: *Não professor, isso não pode ser...*

P: Esse é um dos casos mais lembrados, mas muitas outras pessoas foram afetadas.

Aluno 2: *Sim, até hoje pessoas têm sequelas por brincar com o material radioativo.*

P: E de quem é a culpa desse terrível acidente?

Turma: *Talvez não só um culpado, mas vários, é difícil saber.*

Aluno 3: *Os catadores só queriam vender o chumbo, não sabiam o que tinha dentro e do perigo que era mexer com aquilo.*

P: Exatamente, por não ser dado um destino correto aquela unidade de radioterapia, ocorreu toda aquela tragédia.

Foi nítida a empatia dos alunos por este caso, e todos entenderam a grandiosidade desta calamidade.

Após essa discussão os alunos estavam muito interessados no assunto, fazendo várias perguntas sobre a contaminação radiológica, assim, para direcioná-las, foi feita duas perguntas a eles:

P: Qual a diferença entre exposição e contaminação?

Aluno 4: *Exposição a pessoa só recebe a radiação, e contaminação a pessoa fica com aquilo no corpo?*

P: Exatamente, na exposição a pessoa só recebe a radiação mas não transmite para mais ninguém, já quando uma pessoa é contaminada, o material radioativo fica em suas roupas, pele, cabelo, necessitando que esse material seja retirado para que não espalhe e não contamine mais ninguém.

Assim, voltou-se à questão dos impactos sociais do desenvolvimento tecnológico, que de forma geral, todos pensavam da mesma maneira.

Como os alunos já estavam inteirados do assunto da aula, a participação por parte deles foi maior, observando que a maioria apresentava grande interesse pela sequência que viria.

Durante a aula muitas perguntas para instigar a reflexão dos assuntos foram realizadas, sendo que surtiu muito efeito. O pensamento da turma era: A ciência traz muitos benefícios e aplicações interessantes, porém, deve existir um grande cuidado quando se trata de materiais radioativos. O ponto que mais impactou os alunos foi o fato de muitas vezes a sociedade e a população não saber do que se trata a radiação ionizante, e de como perigoso isso pode se tornar.

### **AULA 3**

Durante a aplicação da etapa 3, os alunos se mostraram ainda mais animados e interessados que durante as aulas anteriores. A maioria ligou a câmera sem mesmo ser pedido,



e a interação foi muito produtiva. Nos momentos onde conceitos e explicações mais aprofundadas eram discutidas, eles pediam calma para que pudessem realizar anotações sobre o assunto.

Quando foi questionado a respeito dos tratamentos de tumores que eles tinham conhecimento.

P: Quais são os métodos de tratamento médico para tumores?

Turma: *Quimioterapia e radioterapia*

P: Qual a diferença entre esses dois métodos?

Aluna 1: *Quimioterapia a pessoa toma vários remédios para matar o tumor, mas também mata muitas células boas do corpo.*

Aluno 4: *Radioterapia a pessoa fica exposta a uma radiação, mas não sei como.*

P: *Só existem esses dois métodos?*

Turma: *Deve existir outros, mas não sabemos.*

Na sequência, ao perguntar como que a radioterapia atua no corpo humano e no tumor, nenhum soube responder, e neste momento foi nítido o interesse e a atenção deles no assunto. Foi exposto também o tratamento da terapia com feixes de prótons. A turma ficou muito surpresa com este tratamento, pois pouco tecido saudável é afetado, ao contrário dos métodos tradicionais.

#### **AULA 4**

Durante a etapa 4, a experimentação ocorreu de forma muito dinâmica, onde para cada passo e cada explicação, os alunos estavam sempre muito atentos. Durante a experimentação, os alunos receberam tarefas, como organizar os dados obtidos, decidir como analisar os dados iniciais, definir quais instrumentos iriam precisar, entre outras tarefas.

Antes de mostrar o funcionamento da câmara de ionização, foi questionado de como seria a variação da tensão com a mudança da posição da amostra radioativa.

P: Ao aproximar a amostra radiativa do detector, o que vai acontecer com os valores de tensão do multímetro?

Turma: *Vai aumentar conforme se aproxima.*

P: Mas vai aumentar de forma constante?

Turma: *Acho que não, vai aumentar mais no começo, por causa da curva de Bragg né?*

Como já tinha sido discutida a curva de Bragg, os alunos propuseram que a maior variação de tensão seria no entorno de 3,5cm. Após serem discutidos alguns pontos, foi proposto o levantamento experimental da curva de Bragg com os valores obtidos.

P: Agora vamos obter os dados necessários para a obtenção experimental da curva de Bragg.

Turma: *Mas como?*

P: Com a câmara de ionização. Agora vocês irão anotar os valores de tensão e da posição da amostra radioativa. Após, vocês vão construir um gráfico de tensão versus posição.

Turma: *Fazer em uma planilha?*

P: A primeira análise pode ser em uma planilha eletrônica, mas depois vamos ter que usar outro software.

Turma: *Mas nós não sabemos mexer nesse programa.*

P: Calma, vou ajudar vocês com isso.

Turma: *Tá bom professor.*

Com os dados obtidos, e com as escolhas feitas por eles nas tarefas propostas, foi utilizado multímetro, alguns usaram calculadora enquanto outros usaram planilha eletrônica para a manipulação inicial dos dados, mas ao final, com o software QtiPlot, todos conseguiram encontrar a curva de variação de tensão devido a posição da amostra radioativa, e a curva de Bragg. Foi explicado o motivo da inversão do sinal de tensão para a construção dos gráficos, não sendo percebida qualquer dúvida nos alunos.

Todos se mostraram animados, e durante os procedimentos eles tiravam dúvidas sobre as interpretações sobre o que estava ocorrendo. Ao final, todos conseguiram acompanhar e encontrar a curva de Bragg, o que impressionou a muitos. Toda a turma apresentou grande interesse durante a experimentação, e muitos elogiaram a construção da câmara de ionização bem como sua utilização.

A seguir estão os gráficos obtidos durante a experimentação que representam os demais gráficos obtidos.

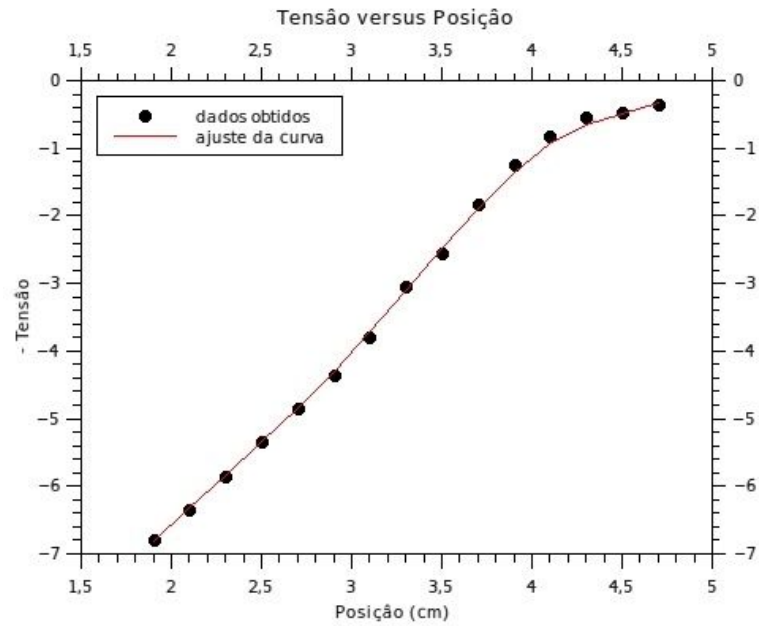


Gráfico 1 - Gráfico de Tensão versus Posição obtido durante a experimentação em aula.

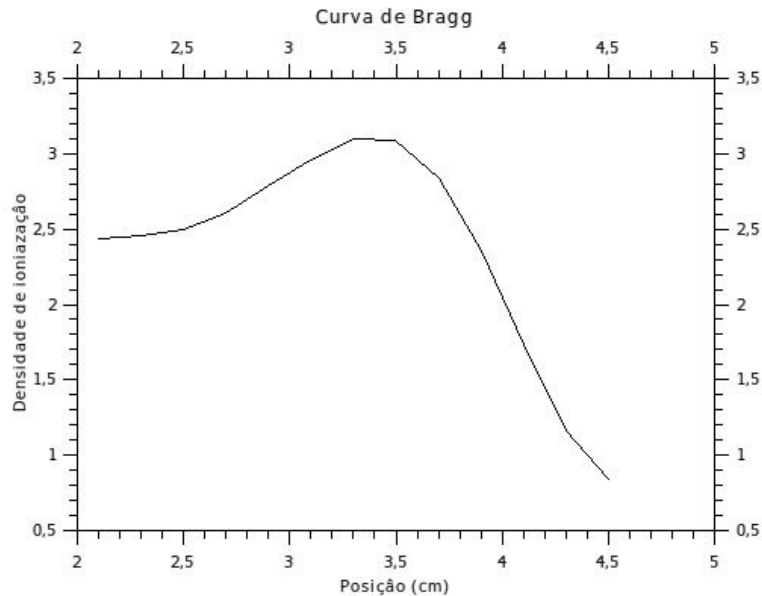


Gráfico 2 - Curva de Bragg obtida experimentalmente em aula.

No gráfico 1 tem-se os dados experimentais de tensão e posição da amostra radioativa, bem como a curva ajustada sobre os dados. No gráfico 2 é possível ver a curva de Bragg obtida experimentalmente. O processamento dos dados foi realizado com o software Qtiplot, que é um aplicativo científico multiplataforma para análise e visualização de dados, que

oferece uma versão gratuita limitada. Essas limitações não impediram a realização da proposta experimental.

O Gráfico 1 mostra os resultados experimentais juntamente com o ajuste dos pontos de dados obtidos experimentalmente, feito pelo método Lowess de regressão não paramétrica, com  $f = 0,4$  e interações = 2. Lowess (suavização de gráfico de dispersão localmente ponderada) é um método com base em ajustes polinomiais locais (WILCOX, 2017). A curva de Bragg pode ser obtida por diferenciação numérica da curva ajustada. O Gráfico 2 mostra a diferenciação numérica da curva ajustada anteriormente (Gráfico 1). Esta curva apresenta o pico de Bragg característico no final do alcance da radiação alfa.

Como mencionado por Boff, Bastos e Melquiades (2017), a dificuldade existente na falta de experimentação em física nuclear pode ser superada utilizando detectores acessíveis de baixo custo, podendo ser utilizada em sala de aula, e se mostrado um importante complemento nas atividades experimentais de física nuclear, o que foi visto na prática experimental aqui proposta.

Conforme indicado por Bastos e Boch (2017), a experimentação em física nuclear se mostrou efetiva, sendo possível ilustrar princípios da radioatividade com um aparelho simples de baixo custo com pequenas quantidades de material radioativo. Da mesma forma que Pereira (2014), foi possível observar o interesse dos alunos em física nuclear, com enfoque nas radiações.

A aplicação experimental sendo bem aceita por todos, com ressalva à demora na obtenção dos valores. A prática se mostrou atrativa para os alunos, mesmo ocorrendo de forma virtual.

Campo (2010) cita-nos a importância de aproximar os conceitos trabalhados para a vida do aluno, visto que muito do que se vê hoje em sala de aula possui um caráter demasiado abstrato e rigoroso, o que distancia-se das experiências pessoais de cada um. Com a experimentação foi possível aproximar os conceitos trabalhados dos alunos, auxiliando a sua formação crítica.

Ao término da prática experimental, foi proposto aos alunos a realização de um breve questionário online e da confecção de um relato.

A seguir, podemos ver as perguntas do questionário aplicado, bem como a

porcentagem de acerto da turma.

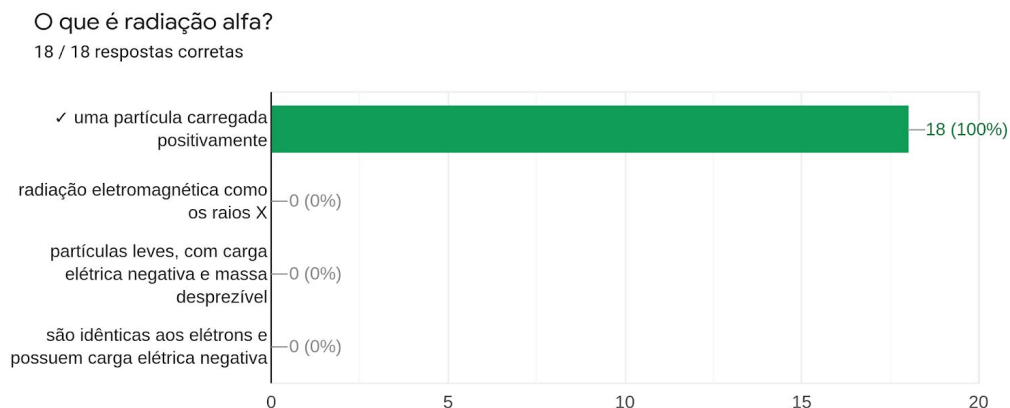


Figura 13 - Respostas para a pergunta: O que é radiação alfa.

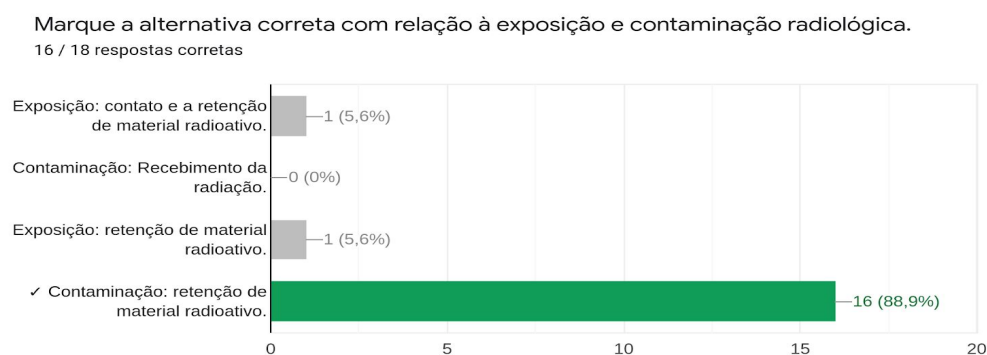


Figura 14 - Respostas sobre diferença entre exposição e contaminação.

As figuras 13 e 14 apresentam o resultado de questões que relacionam a composição de uma partícula alfa, e sobre exposição e contaminação. O acerto global da composição da partícula alfa se deve às aulas expostas nessa sequência, e por ser um conteúdo que a turma já tinha estudado em anos anteriores. Durante os debates e discussões sobre os acidentes nucleares que já ocorreram, foi levantada esta questão da diferença entre exposição e contaminação. Foi exemplificado de forma simples e didática a diferença para os alunos, sendo possível observar que 88,9% da turma teve um bom entendimento desta questão.

Na figura 15, ocorre 94,4% de acerto na relação da ionização de um material. Esta interação entre radiações ionizantes e o meio por onde passa foi discutida várias vezes durante a sequência de aulas, resultando neste resultado satisfatório.

A ionização de um material é:

17 / 18 respostas corretas

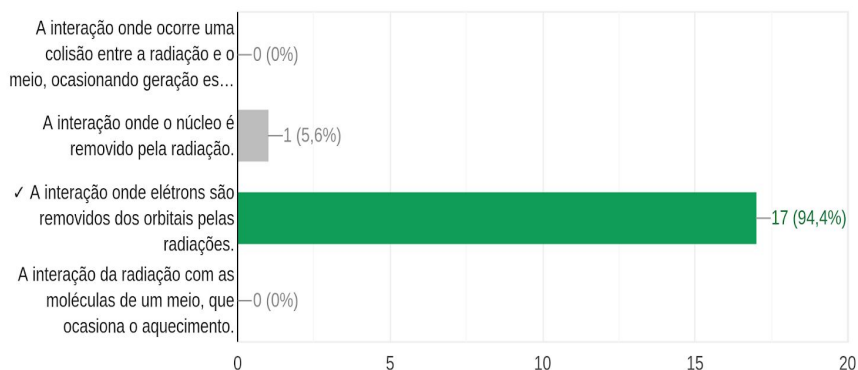
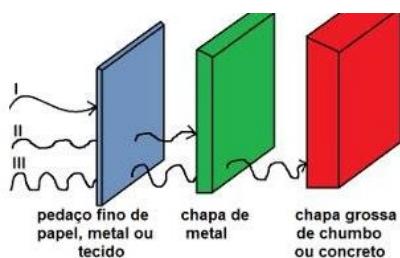


Figura 15 - Respostas sobre ionização de um material.



Três tipos de radiações interagem com três tipos de materiais. Marque a alternativa correta que indica os tipos de radiações.

16 / 18 respostas corretas

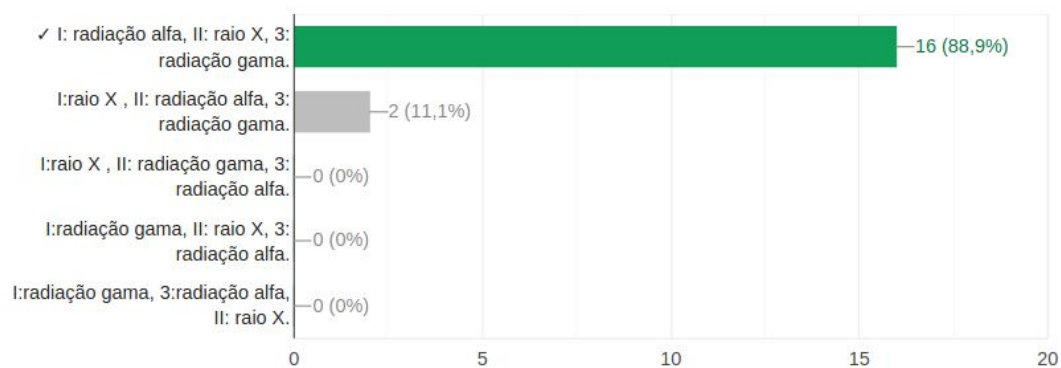


Figura 16 - Respostas sobre o poder de penetração das radiações.

Na figura 16, a questão relacionava o poder de penetração dos raios X, radiação alfa e gama em diferentes materiais. A porcentagem de 88,9% de acerto da questão evidencia a

compreensão da penetração destas radiações em diferentes meios.

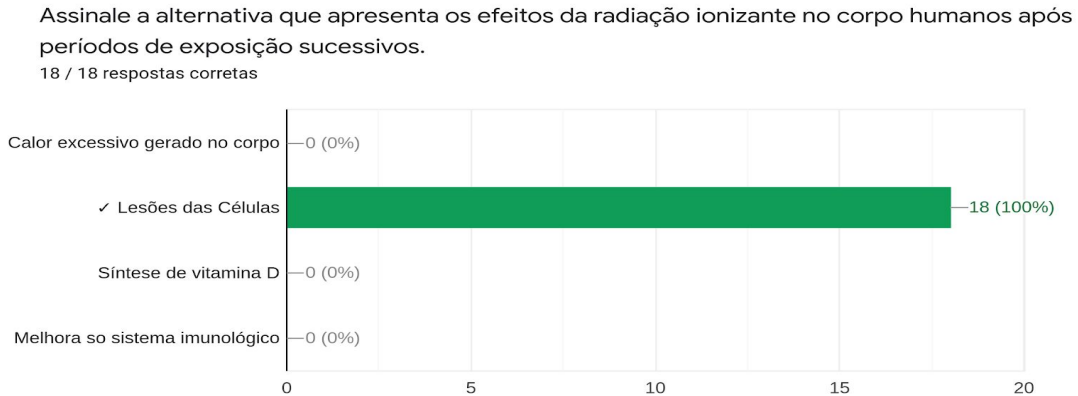


Figura 17 - Pergunta sobre efeitos biológicos da radiação ionizante.

Os conceitos de transferência de calor, principalmente por radiações não ionizantes, a relação do sistema imunológico e da síntese da vitamina D pela exposição à luz UVB proveniente do Sol foram discutidos durante as aulas. Na figura 17, fica evidente que todos internalizaram os possíveis efeitos da radiação ionizante em tecidos biológicos.

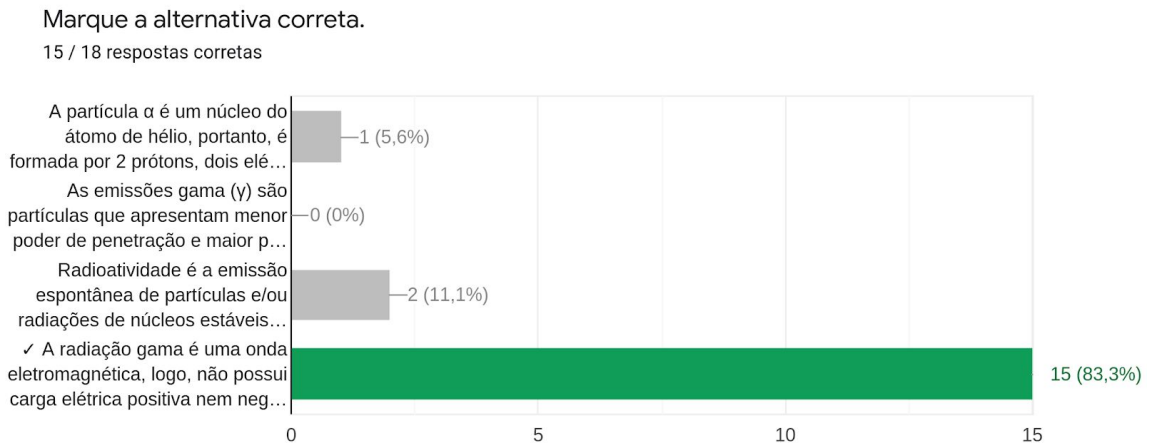


Figura 18 - Respostas sobre radioatividade e os tipos de radiação.

Pelas respostas obtidas nas perguntas, percebe-se que a turma compreendeu os conceitos trabalhados durante a sequência didática. Como exemplo, na figura 18, podemos

observar que cerca de 17% da turma errou a questão. Porém, deve ser levado em consideração que os alunos tiveram um tempo limitado para terminar o questionário. Mas mesmo com essa porcentagem de erro nesta questão, é evidente a boa compreensão da turma como um todo.

No questionário, continha uma pergunta descritiva: “A curva de Bragg pode ser entendida fisicamente como:” Abaixo temos as respostas enviadas pelos alunos.

1. *É medida por um gráfico de densidade de ionização por onde é encontrado o pico de Bragg, ou seja, região onde ocorre o máximo de ionização.*
2. *É um gráfico de quantidade de ionização. Nele é encontrado o pico de Bragg que é uma região onde ocorre o máximo de ionização naquele meio.*
3. *Uma curva onde tem o pico de ionização da matéria devido a passagem da radiação.*
4. *A curva de Bragg é uma representação gráfica que descreve a perda de energia da radiação ionizante durante a viagem da radiação pela matéria, sendo interpretada como uma curva de densidade de ionização pela distância. Quase em todo o percurso a densidade se mantém constante, quando chega na medida de 3,5cm mais ou menos, ocorre um pico na curva, isto para a partícula alfa do Am-241.*
5. *É um gráfico utilizado para mostrar a perda de energia de radiação de uma partícula pesada carregada enquanto ela atravessa a matéria.*
6. *curva de densidade de ionização por distância.*
7. *É uma curva onde a ionização se mantém constante quase todo o percurso, no final do percurso é onde a curva mais ioniza o tecido atingindo o Pico de Bragg. Por fim ela deixa de ionizar o que faz com que a reta caia a zero no gráfico.*
8. *Uma curva que mostra como as partículas carregadas e pesadas perdem energia ionizando o meio.*
9. *onde ocorre um máximo de ionização do meio por causa da radiação alfa*
10. *a perda da energia capaz de ionizar o meio. No finalzinho do caminho da radiação alfa, ocorre um máximo de ionização.*
11. *a perda de energia da radiação ionizante durante o percurso da radiação alfa pela matéria.*



12. Ela mostra a perda de energia da radiação ionizante durante a viagem pela matéria, sendo maior sempre que aproximada, como mostrou o experimento feito com o nosso professor.
13. a perda de energia da radiação ionizante no seu trajeto. Para o Am-241, a partícula alfa atinge o pico de Bragg a cerca de 3,5cm
14. deposição de energia na matéria pela ionização
15. Como as partículas carregadas ionizam o meio por onde passam.
16. As partículas pesadas (alfa) e carregadas ionizam o material, perdendo assim sua energia.
17. Uma curva em um gráfico, que mostra a densidade de ionização por distância, ou seja, o quanto a radiação ioniza o meio por onde passa.
18. Nada mais é que um gráfico que mostra o quanto a radiação ioniza o meio por onde passa. No final do percurso ocorre um pico, demonstrando que é nesse ponto onde ocorre um máximo de ionização. No experimento pudemos ver que o pico de Bragg para radiação alfa do Am-241 ocorre a 3,5cm.

Como na sequência didática, o desenvolvimento histórico da física nuclear, suas aplicações e os debates realizados tinham como objetivo culminar na compreensão física e aplicacional da curva de Bragg, fica evidenciado pelas respostas dos alunos que este objetivo foi alcançado. Em todas as respostas, mesmo algumas sendo muito breves, pode-se observar que cada estudante compreendeu o conceito físico da curva de Bragg. Alguns deixaram destacado também a ocorrência do pico de Bragg no final do alcance da partícula alfa. Nestas respostas alguns alunos trataram de forma mais coloquial enquanto outros descreveram de maneira mais formal. Vale ressaltar que neste momento eles deveriam descrever somente aquilo que tinham compreendido, não podendo consultar qualquer tipo de material.

Na sequência, foi requisitada então a escrita do relato, e como forma de direcionar sua escrita, os alunos deveriam contemplar as respostas das questões abaixo:

- 1) Quais as diferenças entre radiação alfa, gama e raio X?
- 2) Quais as interações da radiação com a matéria?
- 3) Quais as diferenças de tratamentos médicos de tumores?

- 4) Qual a interpretação física da curva de Bragg?
- 5) O que é uma câmara de ionização e como funciona?
- 6) Como ocorre a obtenção da curva de Bragg com uma câmara de ionização?

Podemos ver a mesma pergunta realizada tanto no questionário quanto para a escrita do relato. Isto ocorreu porque como era o tema principal, primeiramente eles deveriam responder no questionário de forma breve, para fixar melhor o conceito, e após, relacionar esta questão no relato.

Após o recebimento de todos relatos, foram analisados se todas as questões norteadoras foram respondidas no texto, e também feita uma análise dos conceitos mais trabalhados. A análise por meio das nuvens de palavras foi aqui utilizada como técnica complementar à análise temática.

#### **Relato 1:**

*O professor iniciou a primeira aula perguntando se queríamos ter algumas aulas diferentes, todos nós ficamos curiosos e animados pela pergunta. Assim então ele começou uma série de 4 aulas sobre física nuclear, algo do nosso interesse. Nós assistimos série e filmes sobre o assunto, e agora pudemos entender melhor.*

*Na primeira aula, o professor fez uma aula histórica da evolução da ciência desde os tempos antigos, até o surgimento da física moderna e nuclear. Foi legal, porque já sabíamos algumas coisas, como o Projeto Manhattan, e assim discutimos bastante. No final desta aula, recebemos algumas matérias e reportagens para ler e assistir sobre os acidentes de Chernobyl e de Goiânia.*

*Na segunda aula, nós discutimos quais são as relações entre a sociedade e a radiação ionizante. Acontece que muitas vezes a sociedade é afetada por acidentes de radiação, como acidentes em Chernobyl e Goiânia, devido ao problema da falta de cuidado das pessoas que trabalham com a radiação. Mas a radiação não traz só malefícios. Ela traz coisas muito úteis, como a geração de energia nuclear. Também há os tratamentos de câncer e tumor que são feitos com radiação, assim como os equipamentos raio-X. Na continuação, foi exposto as diferenças entre as radiações. A partícula alfa – que possui dois prótons e dois nêutrons - que*

*é emitida pelo núcleo tem massa e energia, já a gama é uma onda eletromagnética emitida pelo núcleo do átomo (não possui massa, apenas energia), e o raio X, por sua vez, é uma onda eletromagnética.*

*Na terceira aula foi visto quais as relações entre a radiação e a matéria. Existe a radiação não ionizante que não ioniza o material e a ionizante que ioniza o meio. Dependendo da intensidade, quantidade e do tempo de exposição da radiação sobre a matéria ela pode causar danos, afetando as células que multiplicam-se causando deformidades, e até mesmo matando as demais células. Foi perguntado para a turma se existem diferenças entre os tratamentos médicos de tumores, e após foi discutido sobre o tema. Tem a quimioterapia, onde o paciente toma um coquetel de medicamentos químicos que vão matar as células do tumor que se multiplicam rapidamente, embora também matem outras. Já a radioterapia atinge o tumor, porém para isso mata tudo na área de ação sobre o tumor.*

*Foi mostrado então a curva de Bragg, onde não entendemos sua interpretação somente pela nossa análise, sendo que após o professor explanou sobre a curva. Ela pode ser interpretada fisicamente como sendo a uma curva de densidade de ionização por distância. A ionização se mantém constante quase todo o percurso, no final do percurso é onde a curva mais ioniza o tecido atingindo o Pico de Bragg no gráfico. Por fim, ela deixa de afetar fazendo a reta cair a zero no gráfico. Depois, foi mostrado outro tratamento médico que utiliza os conceitos da curva de Bragg, que é o tratamento por emissão de prótons, onde somente a área maligna é efetivamente afetada.*

*Na quarta aula, pudemos observar uma câmara de ionização, que é um detector de radiação. É uma caixa fechada, com uma amostra radioativa e essa amostra emite radiação que produz íons. A câmara captura os íons produzidos pela passagem da radiação, sendo que esses íons capturados geram uma corrente de ionização no circuito eletrônico, que é medida em um multímetro. Na câmara existem duas placas, uma negativa e outra positiva, elas se ligam ao amplificador. Quando a radiação passa ela produz os íons que são capturados pelas placas eletrizadas, isso vai gerar a corrente ionizante. Então teremos o sinal correspondente a ionização. Quanto maior o valor, maior a ionização, quanto menor o valor, menor a ionização.*

*Se temos uma amostra que aproximamos ao detector da câmara, conforme a aproximamos o*

*detector encontra valores cada vez maiores, que não variam de forma constante. Para se obter o gráfico, fizemos primeiro a coleta de dados de tensão correspondente a posição da amostra radioativa. Após é feito um gráfico de tensão por posição, depois é feita uma análise para encontrar uma curva que se ajuste aos dados. Após termos feito isto, é feita uma análise matemática (a derivada, que é a taxa de variação instantânea de uma função) para encontrar a curva de Bragg. Foi interessante essa experimentação, pois foi possível perceber que a maior variação de tensão ocorre a cerca de 3,5cm (onde ocorre a curva de Bragg).*

## **Relato 2:**

*Dentro da física nuclear existem três tipos de radiações, sendo elas a alfa, gama e raio X. A diferença entre elas é que a alfa é uma partícula que possui 2 prótons e 2 nêutrons. Essa partícula é capaz de ser barrada por uma simples folha de papel. Já a radiação gama possui alta frequência e tem alto poder de penetração na matéria, podendo arrancar elétrons de diversos materiais. O raio-X também possui alta frequência e é produzido através de colisões de feixes de elétrons com metais.*

*A radiação pode interagir com matéria, podendo ocorrer várias interações. Para diferenciar essas interações existem dois tipos de radiação, a não ionizante e a ionizante. A radiação não ionizante apenas pode aquecer o meio em que está atravessando, já a radiação ionizante interage diretamente com a matéria, sendo ela capaz de arrancar elétrons do meio, provocando a modificação da ligação do átomo e do composto. A radiação ionizante pode interagir com o organismo humano e causar sérios problemas de saúde, como lesões ou doenças que podem levar à morte.*

*Para o tratamento médico de tumores, os profissionais utilizam normalmente dois meios, a quimioterapia e a radioterapia. O tratamento da quimioterapia mata as células que se multiplicam rapidamente, sejam elas boas ou não, já que esse tratamento age no corpo inteiro. Já na radioterapia há a utilização de radiações ionizantes que destroem o tumor e impedem que as suas células aumentem, sendo este um tratamento que ocorre somente em uma determinada região do corpo, não atingindo as demais.*

*Como a radiação ionizante interage com o meio, para o caso de partículas carregadas a curva de Bragg representa graficamente a perda de energia da radiação ionizante durante o*

*percurso pela matéria. Assim, a curva de Bragg nada mais é que uma curva de densidade de ionização pela distância. Quando se trata de partículas alfa de cerca de 5,5 MeV, o alcance máximo da partícula é de 4cm, sendo que em quase todo o percurso a densidade se mantém constante, quando chega na medida de 3,5, mais ou menos, ocorre um pico na curva. Existem tratamentos medicinais que fazem o uso da curva de Bragg, para que partículas carregadas ionizam uma região específica do corpo onde estaria um tumor, não afetando tanto assim o resto das células boas.*

*Para obter a curva de Bragg, utilizamos uma câmara de ionização, que é uma caixa fechada com um detector de radiação. Nessa câmara também está presente uma amostra radioativa que emite radiações alfa e conseqüentemente produz íons. Dessa forma, a câmara de ionização captura os íons produzidos pela passagem de radiação e amplifica essa corrente de ionização, que será medida com um multímetro. Quanto maior a ionização, maior será o valor medido, quanto menor a ionização, menor o valor medido.*

*Ao aproximar a amostra o detector mede valores cada vez maiores e assim a tensão aumenta. No gráfico de tensão por distância, onde possui uma curva, é preciso analisar a curva para concluir o quanto varia por distância, ou seja, a densidade de ionização através da curva de Bragg. A voltagem não varia de forma constante com a posição, partindo de quase uma reta para uma parábola. Tem um máximo de variação entre 3 e 4 cm de distância.*

O método de nuvem de palavras foi utilizado para análise qualitativa dos relatos, na procura de padrões específicos de palavras e frases, ou a falta deles, sendo geradas a partir da ferramenta [tagcrowd.com](https://tagcrowd.com)<sup>7</sup>. Na figura 18 podemos ver a nuvem de palavras gerada a partir do texto do relato 1, é marcante a presença das palavras radiação, ionização e curva. Isto nos mostra que o relato é focado na explanação dos conceitos trabalhados em aula, mas não tanto nos debates sobre os temas de relação entre sociedade e radiação, e os benefícios que a tecnologia pode oferecer para a sociedade.

---

<sup>7</sup> "TagCrowd." <https://tagcrowd.com/>. Acessado em 10 out.. 2020.



Figura 20 - Nuvem de palavras do relato 1.



Figura 21 - Nuvem de palavras do relato 2.

É interessante adicionar exceções de palavras para a análise da nuvem de relatos. Preposições e conectores discursivos podem sobressair em relação às palavras chaves. Portanto, optou-se por excluir algumas proposições e conectores discursivos quando estes se destacavam exageradamente, dificultando a análise da nuvem de palavras.

Na figura 20, percebe-se que radiação, ionização e ionizante, curva e tratamento são palavras que apresentam maior frequência. Isto denota que o relato apresentou em várias sentenças estas palavras. Analisando o relato 1 (referente a figura 20), percebe-se que este foi escrito com enfoque nos conceitos trabalhados na sequência didática, e que apresentou de forma bem relacionada estes conceitos.



Se observa nos relatos a compreensão sobre o funcionamento de uma câmara de ionização e como obter experimentalmente a curva de Bragg. O debate sobre o conceito físico da curva de Bragg foi o auge da aula, visto o comportamento não esperado para o caminho de ionização de uma partícula carregada.

De acordo com Chrispino (2017) o enfoque CTS inserido na sequência didática, teve um papel impulsionador e incentivador para o aluno acerca da reflexão sobre as relações sobre ciência, tecnologia e sociedade.

Em análise geral da sequência das aulas e da experimentação, as atividades despertaram a atenção de forma que houve a participação dos alunos tanto como observadores quanto nos debates e nas análises para obtenção da curva de Bragg. As atividades e debates serviram para sair do tradicionalismo na qual as aulas são normalmente trabalhadas. As aulas serviram para abordar conteúdos que muitas vezes deixam de ser abordados ou são fracamente analisados nos livros didáticos.

Segundo Dierka (2016), como a prática experimental foi acompanhada de direcionamento pedagógico coerente, foi possível promover o desenvolvimento intelectual, atingindo o maior número de alunos, auxiliando na aprendizagem significativa e na formação.

O questionário, e os relatos elaborados pelos alunos mostram a internalização dos conteúdos por parte dos alunos. A boa aceitação da realização do relato mostra o interesse e empenho da turma em fazer parte dos debates e da experimentação realizada durante a sequência didática.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente existe a necessidade de elementos potencializadores do processo de ensino, isto prescreve a exigência de práticas pedagógicas cada vez mais elaboradas dentro de conceitos orientados a este fim.

Foi apresentada uma proposta de ensino que está em concordância com tais exigências, sendo embasada por uma fundamentação válida, além dos resultados práticos positivos obtidos pelas implementações, visualizados na prática, mediante debates, do questionário, e do relato desenvolvido.

O uso da câmara de ionização como parte da prática pedagógica em sala de aula se mostrou potencialmente válido, visto que permite ao aluno a visualização dos efeitos da ionização da radiação alfa no ar. Seu uso se torna viável visto que é uma montagem de valor acessível a professores e instituições de ensino, onde o preço dos componentes que formam a câmara de ionização podem ser obtidos por menos de 20 reais.

O tema física nuclear está envolvido com acontecimentos, descobertas e aplicações de grande importância científica, tecnológica e social no último século. Estes fatos permitiram desenvolver a abordagem CTS com certa facilidade. A atividade fazendo o uso de debate ao longo das aulas também contribuiu para a abordagem desejada. As aulas foram permeadas por atividades que permitiam o diálogo, a argumentação e a exposição de ideias, algo necessário para uma abordagem CTS.

As atividades permitiram que os alunos formassem uma opinião crítica a respeito do tema, uma vez que diversas informações foram expostas e discussões foram levantadas. Isto contribui para a formação de cidadãos mais críticos e conscientes a respeito da ciência e tecnologia.

A avaliação final da proposta educacional por meio de um relato dos estudantes se mostrou interessante, visto que é necessário expressar de forma escrita aquilo que internalizaram durante as exposições conceituais, debates e experimentação. Assim, temas como radiação, ionização, curva de Bragg e sociedade foram temas presentes em todos os relatos.

É possível dar continuidade a este trabalho, implementando o circuito proposto, bem

como obter outras amostras radioativas para a substituição do Am-241, podendo-se obter a curva de Bragg para partículas alfa com energias diferentes da do Am-241. Outra possibilidade é obter a curva de Bragg em diferentes meios não condutores como água destilada, óleo, entre outros, o que poderia acarretar a reformulação da proteção metálica que constitui a câmara de ionização.

Em suma, a proposta aqui apresentada serve aos seus princípios por contribuir para a melhoria da qualidade no processo de ensino de física, com enfoque em física moderna e nuclear, enriquecendo o currículo, motivando o aprendizado pela apresentação cativante dos princípios científicos, amadurecendo o entendimento sobre a natureza das atividades científicas e tecnológicas e o impacto social que acarretam.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, Khairi Mohammad Said. **FUNDAMENTALS IN NUCLEAR PHYSICS**. Duhok: University Of Duhok, 2014. 480 p.
- ANGOTTI, José André Perez; BASTOS, Fábio da Purificação de; MION, Rejane Aurora. Educação em física: discutindo ciência, tecnologia e sociedade. **Ciênc. educ. (Bauru)**, Bauru , v. 7, n. 2, p. 183-197, 2001 .
- ARAÚJO, M. S. T.; ABIB, M. L. V. S. Atividades experimentais no Ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Rev. Bras. Ensino Fís**, v. 25, n. 2, p. 176-194, 2003.
- BALOSSO, Jacques *et al* (org.). **NUCLEAR PHYSICS FOR MEDICINE**. : Nupecc, 2014.
- BASTOS, Rodrigo Oliveira. Practical measurements in radioactivity with the electroscope and the Tracker software. **Physics Education**, [S.L.], v. 55, n. 5, p. 7-13, 7 jul. 2020.
- BASTOS, Rodrigo Oliveira; BOCH, Layara Baltokoski. Modern projection of the old electroscope for nuclear radiation quantitative work and demonstrations. **Physics Education**, [S.L.], v. 52, n. 6, p. 064001-064008, 13 set. 2017. IOP Publishing.
- BASTOS, Rodrigo Oliveira; BOFF, Cleber Adelar; MELQUIADES, Fábio Luiz. Nuclear physics experiments with low cost instrumentation. **Physics Education**, [S.L.], v. 51, n. 6, p. 13-18, 3 out. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9120/51/6/065013>.
- BELANCON, Marcos Paulo. O ensino de física contextualizado ao século XXI. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo , v. 39, n. 4, e4001, 2017.
- BETHE, Hans A. (1997). **SELECTED WORKS OF HANS A BETHE** (With Commentary). Singapore: World Scientific.
- BOCH, Layara Baltokoski. **ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR COM ENFOQUE CTS POR MEIO DA EXPERIMENTAÇÃO**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática,, Unicentro, Guarapuava, 2018.
- BOFF, Cleber Adelar; BASTOS, Rodrigo Oliveira; MELQUIADES, Fábio Luiz. Práticas experimentais no ensino de física nuclear utilizando material de baixo custo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 236-247, 5 maio 2017. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- BOFF, Cleber Adelar. **CONSTRUÇÃO DE UM DETECTOR DE IONIZAÇÃO GASOSA COM MATERIAL DE BAIXO CUSTO PARA PRÁTICAS**

**EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR.** 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática,, Unicentro, Guarapuava, 2016.

BOUQUET, F *et al.* Low-cost experiments with everyday objects for homework assignments. **Physics Education**, [S.L.], v. 54, n. 2, p. 2-13, 3 jan. 2019.

BRAGG, W.h.. **Studies in Radioactivity.** Londres: Macmillan And Co., Limited, 1912.

BRASIL. CONSTITUIÇÃO (1988): Constituição da República Federativa do Brasil. Promulgada em 5 de outubro de 1988. 4.<sup>a</sup> ed. **Série Legislação Brasileira.** São Paulo:Saraiva.

BRASIL, Ministério da Educação. **Parâmetros curriculares Nacionais (Ensino Médio).** Brasil, 2000.

BRASIL, Ministério da Educação. **PCN+ Ensino Médio – Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais.** Brasil, 2002.

CAMPO, Fernando Rosseto Gallego. **Ciência, tecnologia e sociedade.** Florianópolis: Publicações do If-sc, 2010. 85 p.

CHRISPINO, Alvaro. **Introdução aos Enfoques CTS – Ciência, Tecnologia e Sociedade – na educação e no ensino.** : Oei, 2017.

CHRISTOVAO, Marília Tavares; CAMPOS, Tarcísio Passos Ribeiro de. Análise da distribuição espacial de dose absorvida em próton terapia ocular. **Radiol Bras**, São Paulo , v. 43, n. 4, p. 249-254, Aug. 2010

CIAIQ, 8., 2019, Lisboa. **Análise de conteúdo por meio de nuvem de palavras de postagens em comunidades virtuais: novas perspectivas e resultados preliminares.** Lisboa: Ciai, 2019. 8 p.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEA. **POSIÇÃO REGULATÓRIA3.01/001:2011: CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO ,ISENÇÃO EDISPENSADEREQUISITOS DEPROTEÇÃORADIOLÓGICA,** 2011.

DEPAOLO, Concetta A.; WILKINSON, Kelly. **Get Your Head into the Clouds: using word clouds for analyzing qualitative assessment data.** Techtrends, [S.L.], v. 58, n. 3, p. 38-44, 21 abr. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11528-014-0750-9>.

DIERKA, Tiago. **CONSTRUÇÃO DE UM DETECTOR DE RADIAÇÃO ALFA POR FAÍSCAELÉTRICA E DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES PEDAGÓGICAS PARA O ENSINO MÉDIO.** 2017. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática,, Unicentro, Guarapuava, 2017.

DIERKA, Tiago. **MONTAGEM DE UM DETECTOR DE RADIAÇÃO ALFA POR**

FAÍSCA ELÉTRICA PARA O ENSINO. *In*: SINECT, V., 2016, Ponta Grossa. **Anais**. Ponta Grossa.

DORRÍO, José Benito Vázquez. Teaching Physics through Experimental Projects. **8Th International Conference On Hands-On Science**, Ljubljana, p. 85-91, set. 2011.

EASON, Eric. **Americium Smoke Detectors**. 2011. Disponível em: <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/eason1/>. Acesso em: 13 nov. 2020.

FONSECA, P et al . Estudo do poder de frenamento de partículas alfa na matéria. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo , v. 32, n. 2, p. 1-5, June 2010

FRANCISCO, Eduardo de Rezende. RAE-eletrônica: exploração do acervo à luz da bibliometria, geoanálise e redes sociais. **Rev. adm. empres.**, São Paulo , v. 51, n. 3, p. 280-306, June 2011 .

FREITAS, Rovilson de; NEVES, Ruan Felipe de Oliveira; GONÇALVES, Victor Henrique. UTILIZANDO AS TÉCNICAS DE “NUVEM DE PALAVRAS” E CLUSTERIZAÇÃO APLICADAS AS ENTREVISTAS DOS ATLETAS OLÍMPICOS DA CIDADE DE SÃO CARLOS. **Olimpianos – Journal Of Olympic Studies**. São Paulo, p. 423-434. jan. 2018.

HAVLÍČEK, K.. Experiments in Physics Education: What do Students Remember? **Matfyzpress**, Prague, v. 1, n. 15, p. 144-148, jan. 2015.

HEIMERL, Florian et al. Word Cloud Explorer: text analytics based on word clouds. **2014 47Th Hawaii International Conference On System Sciences**, Waikoloa, jan. 2014. IEEE.

ILIADIS, Christian. **Nuclear Physics of Stars**. Chapel Hill: Wiley-vch, 2014.

JAVORSEK II, D. et al. Power spectrum analyses of nuclear decay rates, **Astroparticle Physics**, Volume 34, Issue 3, October 2010, Pages 173-178

JOSEF TRNA, 2014, Udine. **Motivational Effectiveness of Experiments in Physics Education**. Udine: Girep-Icpe-Mptl 2010, 2014. 9 p.

JENKINS, Jere H. et al. Evidence for Correlations Between Nuclear Decay Rates and Earth-Sun Distance. **Astroparticle Physics**, v. 32, n. 1, p. 42-46, ago. 2009.

KLOSOWSKI, Allison; BASTOS, Rodrigo Oliveira. Obtaining the Bragg Curve using a low-cost detector. **European Journal Of Physics**, [S.L.], 10 set. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6404/abb712>.

KNOLL, Glenn F. **Radiation Detection and Measurement**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.

KRANE, Kenneth S.. **INTRODUCTORY NUCLEAR PHYSICS**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

LAGANA, Caio. Decaimentos nucleares em uma câmara de nuvens. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo , v. 35, n. 3, p. 1-6, Sept. 2013 .

MATARRITA, Carlos Arguedas *et al.* Remote experimentation in the teaching of physics in Costa Rica: First steps. **Experiment International Conference**, Madeira, v. 1, n. 5, p. 208-213, jun. 2019.

MAKOWER, W.. **PRACTICAL MEASUREMENTS IN RADIO-ACTIVITY**. New York: Longmans, Green, And Co., 1912.

MOHAMAD, O.. Clinical Indications for Carbon Ion Radiotherapy. **Clinical Oncology**, Dallas, v. 30, p. 317-329, 2018.

NICHOLS, R. Charles. Particle therapy for pancreatic cancer. **Translational Cancer Research**, Jacksonville, v. 16, n. 4, p. 634-640, nov. 2015.

OKUNO, Emico. **Física das radiações**. : Editora Oficina de Textos, 2010.

PEREIRA, Alexandre Marcelo. **A FÍSICA DAS RADIAÇÕES EM SALA DE AULA: DO PROJETO À PRÁTICA**. 2014. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PINHEIRO, N. A. M.; MATOS, E. A. S. A.; BAZZO, W. A. Refletindo acerca da ciência, tecnologia e sociedade: enfocando o ensino médio. **Revista Iberoamericana de Educação**, n. 44, p. 147-165, 2007.

PROTOM INTERNATIONAL (org.). **The Bragg Peak**. 2018. Disponível em: <https://www.protominternational.com/2018/06/bragg-peak/>. Acesso em: 21 set. 2020.

PROTOM INTERNATIONAL (org.). **The Evolution of Proton Therapy: Accelerating Cancer Treatment**. 2018. Disponível em: <https://www.protominternational.com/2018/05/history-of-proton-therapy/>. Acesso em: 21 set. 2020.

SHARAFUTDINOVA, Galiya *et al.* Distance learning laboratory: A remote Atomic and Nuclear Physics experiment. **Australian Physics**, Callaghan, v. 2, n. 50, p. 55-59, mar. 2013.

SILVA, Kethelen Amanda. 1Educação, Gestão e Sociedade: revista da Faculdade Eça de Queirós, ISSN2179-9636, Ano 7, número 25, fevereiro de 2017. [www.faceq.edu.br/regs](http://www.faceq.edu.br/regs)MÉTODO CIENTÍFICO: O CONHECIMENTO COMO UMA UNIDADE EM QUETODOS OS SABERES ESTÃO CONECTADOS. **Educação, Gestão e Sociedade**, Jandira, v. 1, n. 7, p. 1-5, fev. 2017.

SILVERMAN, Joseph *et al.* **Radiation**. 2017. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/radiation>. Acesso em: 22 set. 2020.

TAUHATA, Luiz et al. **RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA:FUNDAMENTOS**. 9. ed. Rio de Janeiro: Rd/cnen, 2013.

TRIBBLE, Robert E. et al. **The Frontiers of Nuclear Science: a long range plan.** : Doe/nsf Nuclear Science, 2007. 184 p.

VIGNA FILHO, Eugenio del et al. Protocolo de Calibração: iaea trs #277. : IAEA TRS #277. In: TEMAS Físicos: Programa de Qualidade em Radioterapia. Programa de Qualidade em Radioterapia. Angra dos Reis: **Programa de Qualidade em Radioterapia - Pqrt**, 2001. p. 177-245.

WILCOX, Rand. (2017). *The Regression Smoother LOWESS: A Confidence Band That Allows Heteroscedasticity And Has Some Specified Simultaneous Probability Coverage.* **Journal of Modern Applied Statistical Methods**. 16. 29-38. 10.22237/jmasm/1509494580.

WOOLBRIGHT, Stephen J. From the Dawn of NuclearPhysics to the First Atomic Bombs. **Asian Journal Of Physics**. Delhi, p. 1-20. jan. 2014.

## APÊNDICE

### Materiais e Métodos

Os materiais utilizados para a construção do detector são: uma lata vazia de metal, dois pedaços de placa de circuito de mesmo tamanho, um palito de madeira, um paquímetro, uma amostra de amerício 241, um transistor BC517 e um BC557, um resistor 4k7  $\Omega$ , um suporte para bateria 9V, pedaços de fio. Vale ressaltar que os componentes utilizados podem ser substituídos por outros equivalentes, porém demandará conhecimento sobre eletrônica para que se possa obter os mesmos resultados que se alcança com o circuito proposto.

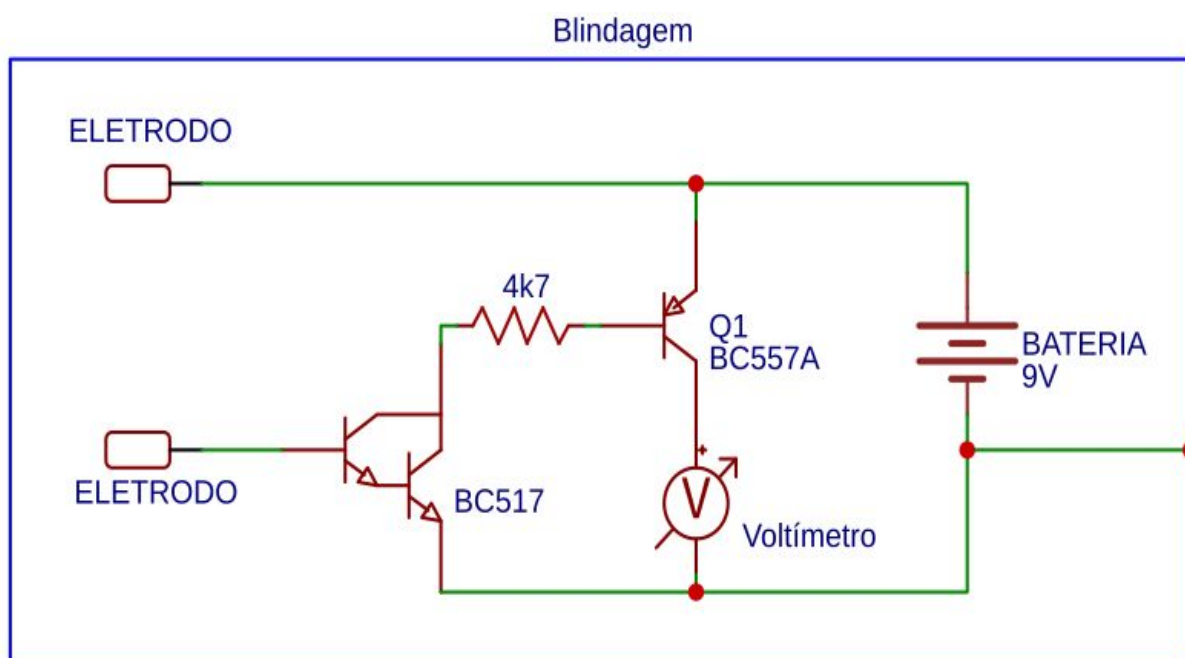


Figura 1 - Circuito proposto.

Todos os componentes citados devem ser ligados conforme o circuito proposto. É possível realizar alterações no circuito, como utilizar transistores equivalentes, modificar o resistor para maior ou menor amplificação. Dependendo da montagem dos eletrodos, figura 2, será necessário a modificação, como exemplo, se os eletrodos sejam muito largos, o circuito proposto amplificará muito o sinal da corrente de ionização, ocorrendo saturação da tensão, o que impedirá o levantamento adequado da curva de Bragg.



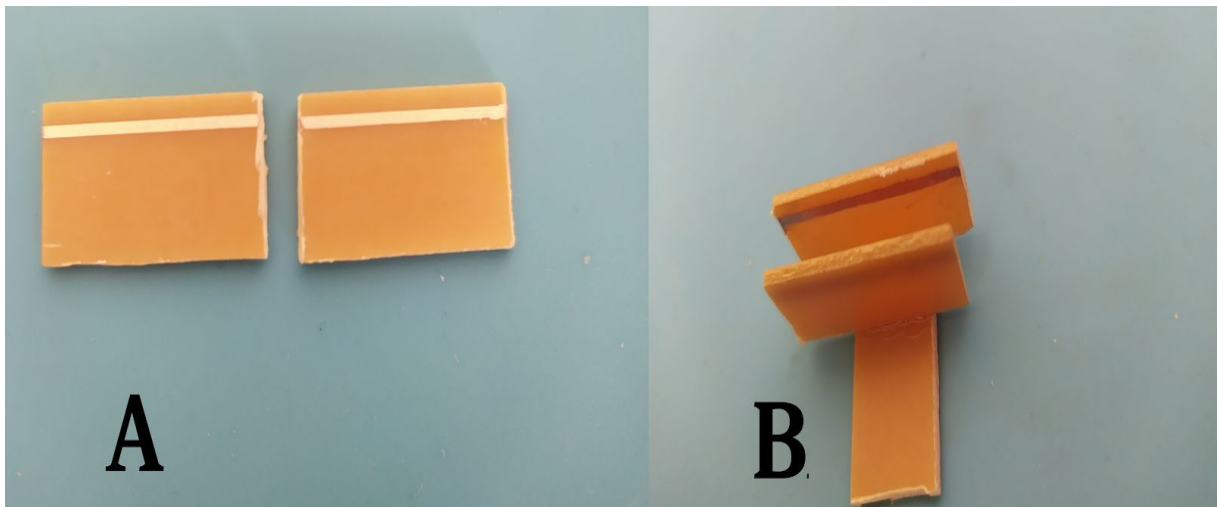


Figura 2 - A) Eletrodos usados no detector. B) Montagem dos eletrodos para fixação.

Na figura 2, vemos em A duas faixas de cobre que formam os eletrodos do detector, e em B vemos a montagem dos eletrodos para que permaneçam paralelos entre si os eletrodos. Para obter estes eletrodos, foi realizado o processo de corrosão com perclorato de ferro em um pedaço de placa de circuito impresso. Esta etapa apresentará uma característica importante do detector: quanto mais fina a faixa, menor a área de coleta de ionizações, porém mais precisa a coleta de dados para cada distância da amostra radioativa.

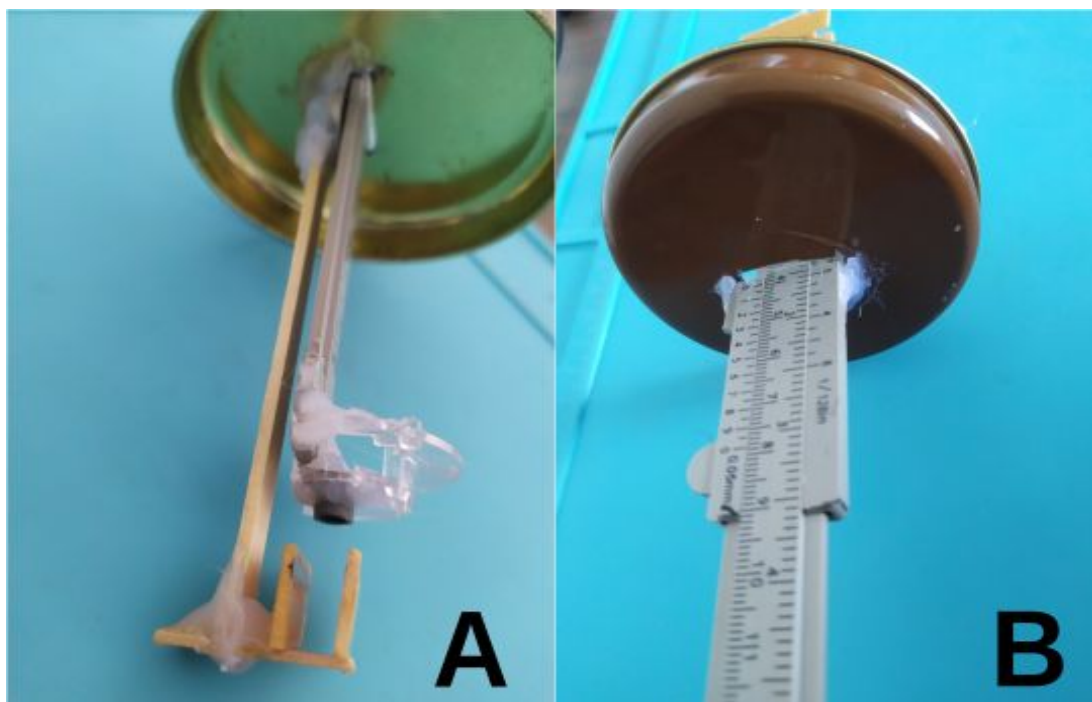


Figura 3 - A) Fixação do paquímetro e dos eletrodos. B) Parte exterior com o paquímetro já fixado.

Na figura 3, podemos ver a fixação do paquímetro para a movimentação da amostra radioativa, bem como os eletrodos já fixados em um palito de madeira em A; em B podemos ver a parte externa da tampa de metal onde foi aberta uma passagem para o paquímetro ser fixado. É importante o uso de um paquímetro para a movimentação da amostra radioativa pela precisão que o mesmo oferece, e também pela facilidade de fixar a amostra radioativa na parte frontal do mesmo, possibilitando uma fácil movimentação em direção aos eletrodos do detector, visto que todos (paquímetro com a amostra e eletrodos do detector) precisam estar muito bem alinhados para que não ocorra problemas na coleta de dados. Nesta etapa é importante que o conjunto paquímetro, amostra radioativa e eletrodos estejam bem alinhados, para que se possa ter uma movimentação livre do paquímetro, e seja possível obter os valores de tensão corretos para cada posição da amostra.

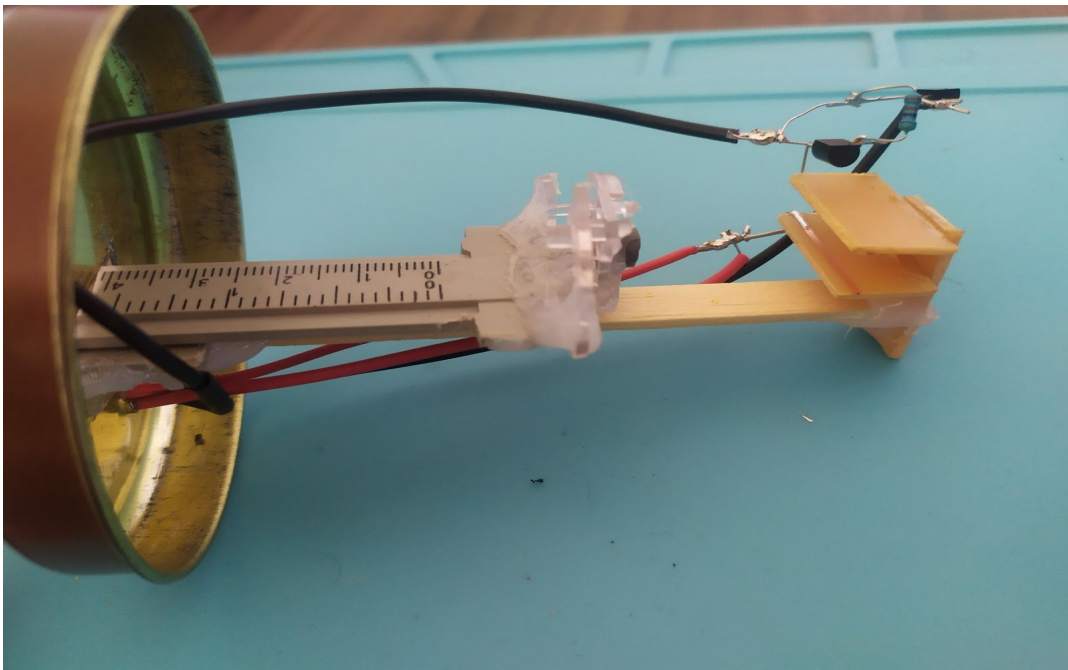


Figura 4 - Montagem final do detector com o circuito.

O circuito do detector é soldado diretamente nos eletrodos, e cada componente entre si como visto na figura 4, evitando o uso de placas para montagem que acarretam em mais dificuldade e também acabam por muitas vezes dando interferência nos dados coletados (visto a sensibilidade do detector ser muito alta). Uma vez que o circuito eletrônico fica bem posicionado dentro da lata metálica, não corre risco de ser danificado ou entrar em curto

circuito. Assim obtêm-se um circuito de fácil construção e robusto.



Figura 5 - Detector finalizado, com o multímetro medindo a ionização da amostra radioativa.

Na figura 5, a lata está fechada com a tampa, e a amostra radioativa foi aproximada dos eletrodos, podendo ser observada uma leitura de tensão equivalente a ionização produzida no volume do detector.

Com a variação da posição da fonte radioativa em relação aos eletrodos, vê-se a mudança do sinal de tensão obtido, como observado na figura 6. Com esta variação, pode ser observado que o valor de tensão não varia de forma linear, de modo que quando a amostra radioativa se encontra a mais de 4,0 cm de distância dos eletrodos, é medido sempre um mesmo valor de tensão. Mas, se aproximando a amostra, obtém-se rápida variação da tensão, mantendo uma variação quase constante depois de cerca de 2,3 cm.



Figura 6 - Mudança da posição da fonte radioativa e seu respectivo sinal de tensão obtido.

### Sequência da experimentação

A experimentação para o levantamento da curva de Bragg consiste em:

- Ligar o detector em uma bateria 9V, e conectar as saídas do detector no multímetro na função voltímetro de corrente contínua (na faixa de até 20V);
- Deixa-se o paquímetro mais afastado possível, marcando-se o valor de tensão obtido. Esse valor de tensão é correspondente a zero incidência de radiação da amostra radioativa;
- Para cada medição, deve-se esperar por cerca de 1 minuto para que o sinal estabilize-se;
- Com o paquímetro ainda afastado, deve-se ir aproximando a cada 1 ou 2mm, observando e anotando as posições e os valores obtidos no multímetro em uma tabela, como na tabela 1;

Tabela 1 - Valores obtidos para posição e tensão.

Posição (cm)	Tensão (V)
4,1	0,4
4,3	0,4
4,5	0,5
4,7	0,6
4,9	0,8
5,1	1,3
5,3	1,8
5,5	2,6
5,7	3,1
5,9	3,8
6,1	4,4
6,3	4,9
6,5	5,3
6,7	5,9
6,9	6,4
7,1	6,9
7,3	6,9

Com todos os valores de posição e tensão obtidos, e anotados em uma tabela, devemos fazer algumas transformações nos valores:

- Transformar os valores de distância, pois quando a amostra radioativa estava mais longe do detector, a posição marcada era a menor, e quando a amostra estava mais próxima do detector, a posição marcada era a maior. O ajuste dos valores se deu pela seguinte relação:

$$\text{Posição (ajustada)} = (\text{Posição} - 8,5) \times (-1)$$

Transformar os valores de tensão de modo que os mesmos fiquem negativos.

Isso se dá pelo motivo de que a curva de Bragg é obtido pela seguinte relação:

$$\frac{\partial E}{\partial x} \propto -\frac{\partial U}{\partial x},$$

onde a função U é a curva ajustada sobre os dados coletados

- Após coleta e ajuste dos dados coletados, realiza-se a análise dos dados no software QtiPlot.
- Como primeiro passo da análise, plota-se o gráfico -Tensão versus Posição. Em seguida realiza-se o ajuste de curva com o método Lowess de regressão não paramétrica, com  $f = 0,4$  e interações = 2.

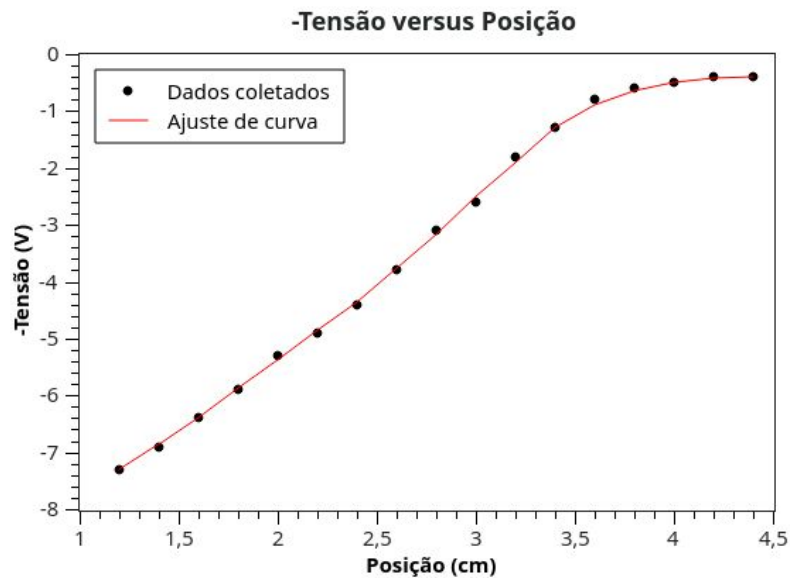


Gráfico 1 - Tensão versus posição com os dados coletados e ajuste de curva. Fonte: Autor.

- Com o ajuste de curva realizado, faz-se a derivada da curva, obtendo-se a curva de Bragg, com seu pico característico, como visto no gráfico 2.

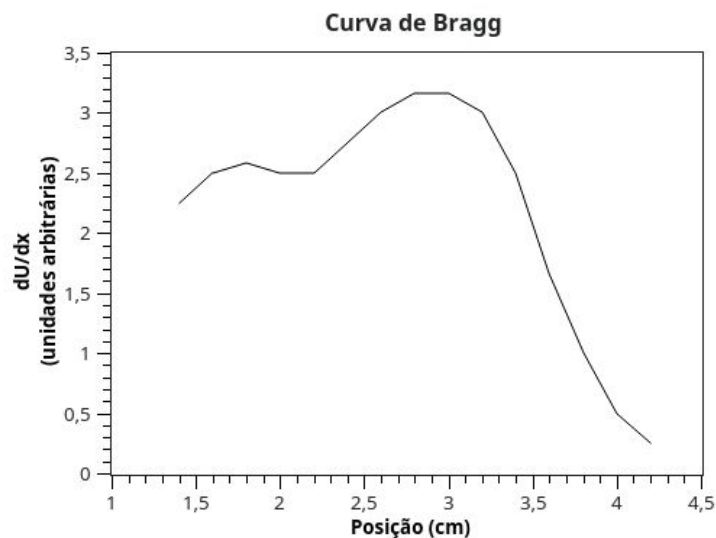


Gráfico 2 - Curva de Bragg obtida experimentalmente com o detector proposto. Fonte: Autor.

## Questionário

Nome: \_\_\_\_\_

1) O que é radiação alfa?

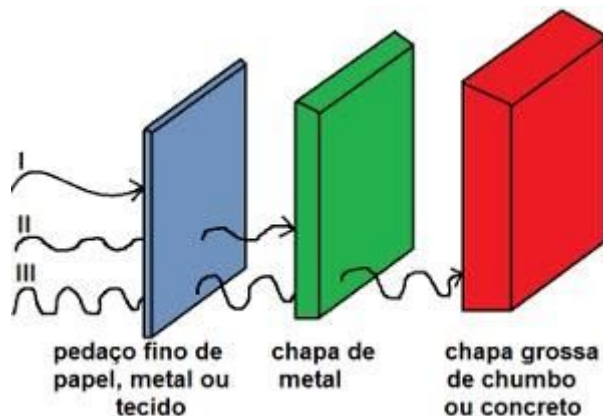
- uma partícula carregada positivamente
- radiação eletromagnética como os raios X
- partículas leves, com carga elétrica negativa e massa desprezível
- são idênticas aos elétrons e possuem carga elétrica negativa

2) A curva de Bragg pode ser entendida fisicamente como:

3) Marque a alternativa correta com relação à exposição e contaminação radiológica.

- Exposição: contato e a retenção de material radioativo.
- Contaminação: Recebimento da radiação.
- Exposição: retenção de material radioativo.
- Contaminação: retenção de material radioativo.

4) Três tipos de radiações interagem com três tipos de materiais. Marque a alternativa correta que indica os tipos de radiações.



Disponível em: <https://s4.static.brasilecola.uol.com.br/img/2014/07/radiacoes.jpg>. Acesso em 12/10/2020



- ( ) I: radiação alfa, II: raio X, 3: radiação gama.
- ( ) I:raio X , II: radiação alfa, 3: radiação gama.
- ( ) I:raio X , II: radiação gama, 3:radiação alfa.
- ( ) I:radiação gama, II: raio X, 3:radiação alfa.
- ( ) I:radiação gama, 3:radiação alfa, II: raio X.

5) A ionização de um material é:

- ( ) A interação onde ocorre uma colisão entre a radiação e o meio, ocasionando geração espontânea de energia.
- ( ) A interação onde o núcleo é removido pela radiação.
- ( ) A interação onde elétrons são removidos dos orbitais pelas radiações.
- ( ) A interação da radiação com as moléculas de um meio, que ocasiona o aquecimento.

6) Assinale a alternativa que apresenta os efeitos da radiação ionizante no corpo humano após períodos de exposição sucessivos.

- ( ) Calor excessivo gerado no corpo
- ( ) Lesões das Células
- ( ) Síntese de vitamina D
- ( ) Melhora o sistema imunológico

7) Marque a alternativa correta.

- ( ) A partícula  $\alpha$  é um núcleo do átomo de hélio, portanto, é formada por 2 prótons, dois elétrons e dois nêutrons.
- ( ) As emissões gama ( $\gamma$ ) são partículas que apresentam menor poder de penetração e maior poder ionizante sobre os gases.
- ( ) Radioatividade é a emissão espontânea de partículas e/ou radiações de núcleos estáveis de átomos, originando outros núcleos que serão sempre instáveis.
- ( ) A radiação gama é uma onda eletromagnética, logo, não possui carga elétrica positiva nem negativa.