



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENSINO DE CIÊNCIAS NATURAIS E MATEMÁTICA**

**MESTRADO PROFISSIONAL EM  
ENSINO DE CIÊNCIAS NATURAIS E MATEMÁTICA**

---

**ALLISON KLOSOWSKI**

## **PRODUTO EDUCACIONAL APLICADO**

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

Produto Educacional apresentado 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.

Prof. Dr. Rodrigo Oliveira Bastos

---

GUARAPUAVA, PR  
2020



**UNICENTRO**

PARANÁ

ENSINO DE CIÊNCIAS NATURAIS E MATEMÁTICA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO  
CENTRO-OESTE**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENSINO DE CIÊNCIAS NATURAIS E MATEMÁTICA

**MESTRADO PROFISSIONAL EM**

**ENSINO DE CIÊNCIAS NATURAIS E MATEMÁTICA**

---

**ALLISON KLOSOWSKI**

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

**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

## SUMÁRIO

<b>1. APRESENTAÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1 Análise de textos por nuvens de palavras	3
2.2 História da física nuclear e implicações tecnológicas e sociais	4
2.3 Alguns conceitos de física nuclear	7
2.4 Interação da Radiação com a Matéria e a Curva de Bragg	10
2.5 Aplicação Moderna da Curva de Bragg	17
2.6 Câmara de ionização	21
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS - CONSTRUÇÃO DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO</b>	<b>24</b>
3.1 Construção e operação da câmara de ionização	28
3.2 Sequência da experimentação	32
<b>4. ESTRUTURA DAS AULAS E AVALIAÇÃO</b>	<b>36</b>
<b>5. ROTEIRO EXPERIMENTAL</b>	<b>40</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>42</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>45</b>

## 1. APRESENTAÇÃO

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.

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).

Pretendeu-se neste trabalho elaborar uma sequência pedagógica para 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 humana, 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.

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 assumira 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.

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 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.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Análise de textos por nuvens de palavras

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).

## **2.2 História da física nuclear e implicações tecnológicas e sociais**

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



e 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.

### 2.3 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 núclídeos 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.

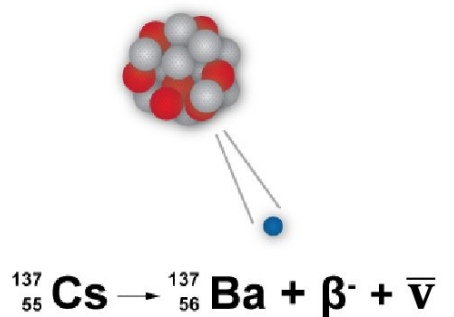


Figura 1 - Decaimento beta do Césio 137. Adaptado de <http://maisunifra.com.br>

- 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>1</sup> "Radiação alfa, beta e gama - MAIS Unifra." <http://maisunifra.com.br/conteudo/radiacoes-alfa-e-beta/>. Acessado em 17 nov.. 2020.

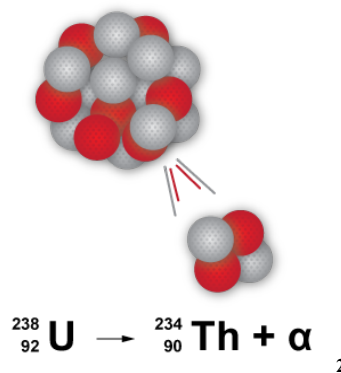


Figura 2 - Decaimento alfa do Urânio 238. Fonte: <http://maisunifra.com.br>

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).

#### 2.4 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>2</sup> "Radiação alfa, beta e gama - MAIS Unifra." <http://maisunifra.com.br/conteudo/radiacoes-alfa-e-beta/>. Acessado em 17 nov.. 2020.

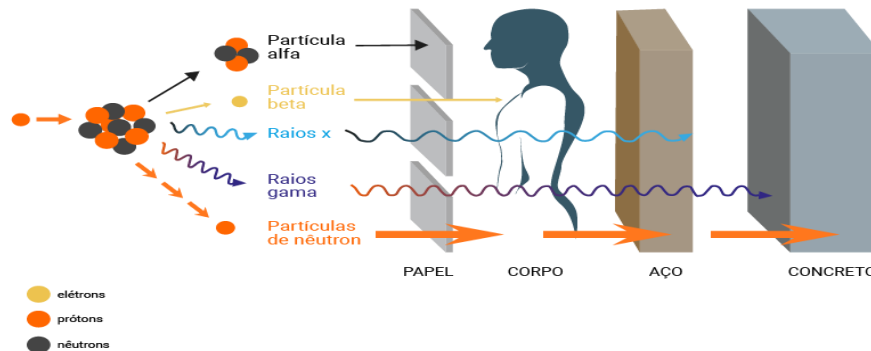
principalmente por meio de seu campo elétrico, e acabam assim transferindo sua energia para muitos átomos ao mesmo tempo. Estas são denominadas radiações diretamente ionizantes. Já radiações que não possuem carga, como as radiações eletromagnéticas e os nêutrons, são denominadas de radiações indiretamente 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.



3

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>3</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).

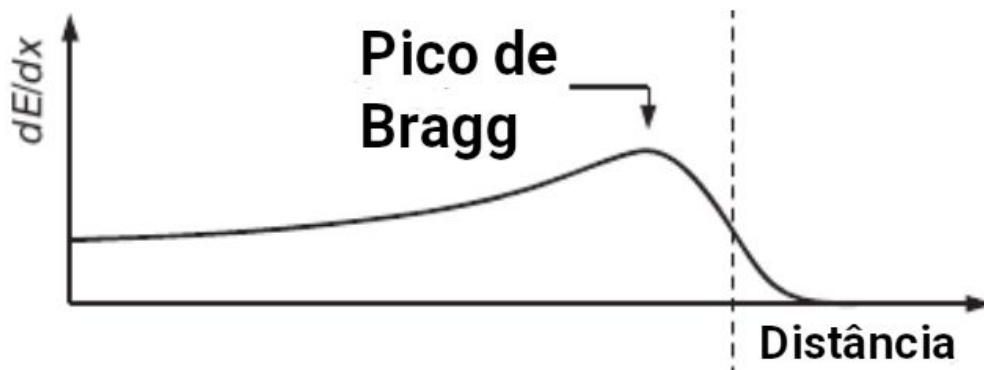


Figura 4 - Poder de freamento versus distância. Adaptado de: ILIADIS, 2014.

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).

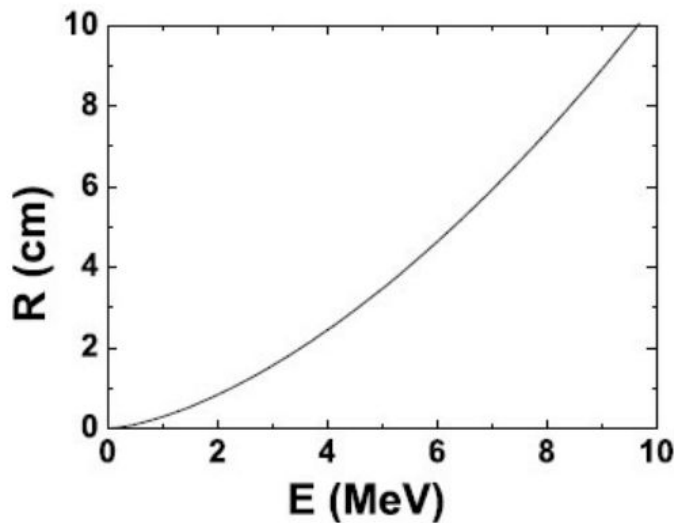


Figura 5 - Alcance da partícula alfa no ar em função de sua energia. Fonte: FONSECA, 2010.

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 muda 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 de o 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).

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

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

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.

## 2.5 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.

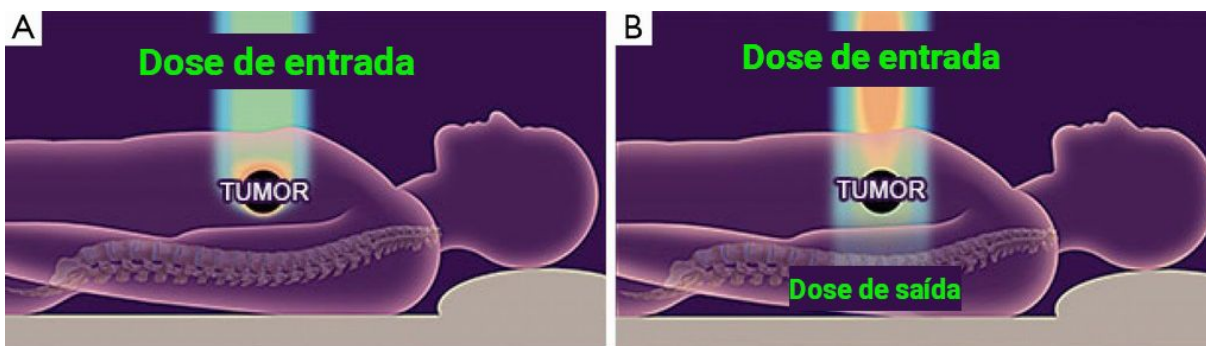
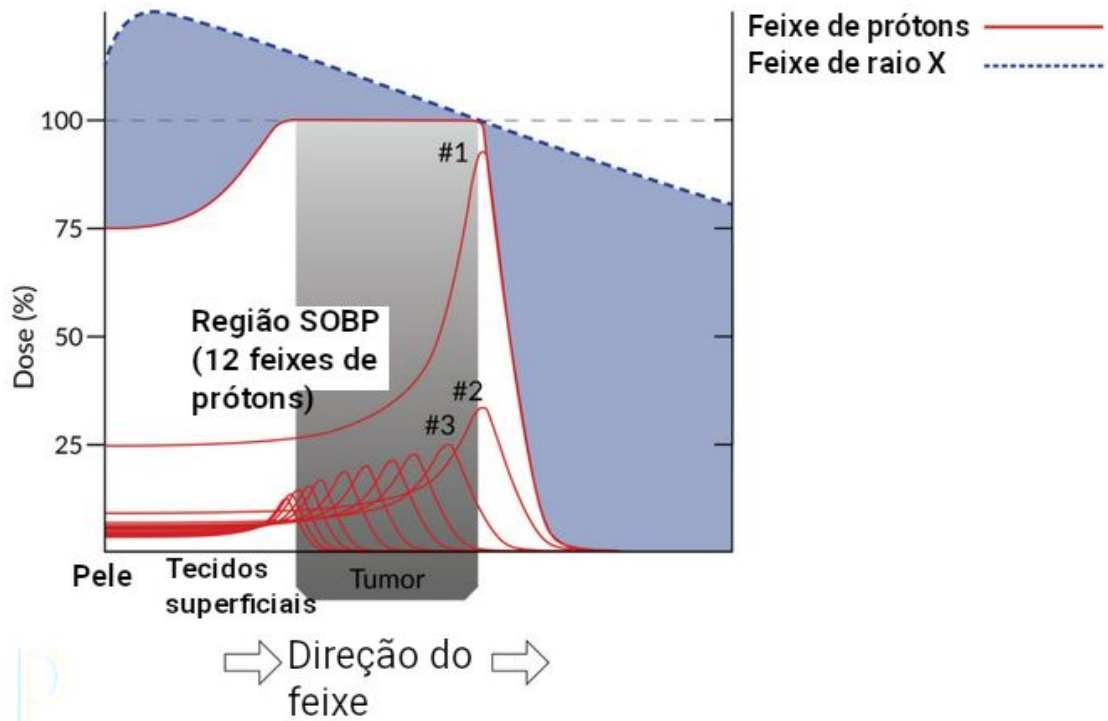


Figura 6 - (A) Dose absorvida com o tratamento de feixes de prótons; (B) Dose absorvida com tratamento de raios X. Fonte: NICHOLS, 2015.

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).



4

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.

<sup>4</sup> "The Bragg Peak - ProTom." 18 jun.. 2018, <https://www.protominternational.com/2018/06/bragg-peak/>. Acessado em 19 nov.. 2020.



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 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.

## **2.6 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).

### Amostra radioativa

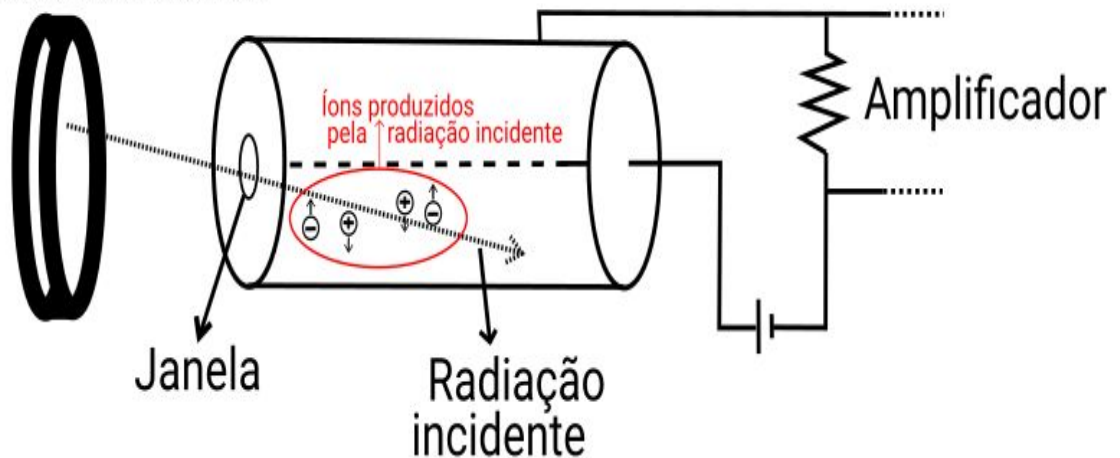


Figura 8 - Diagrama esquemático da câmara de ionização. Fonte: Autor.

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).

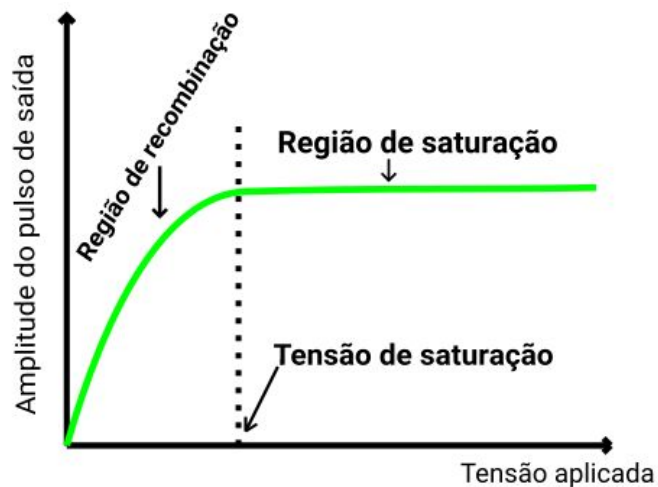


Figura 9 - Curva de saturação para uma câmara de ionização. Fonte: Autor.

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).

### 3. 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:

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, que pode causar distorções dos dados obtidos de tensão.

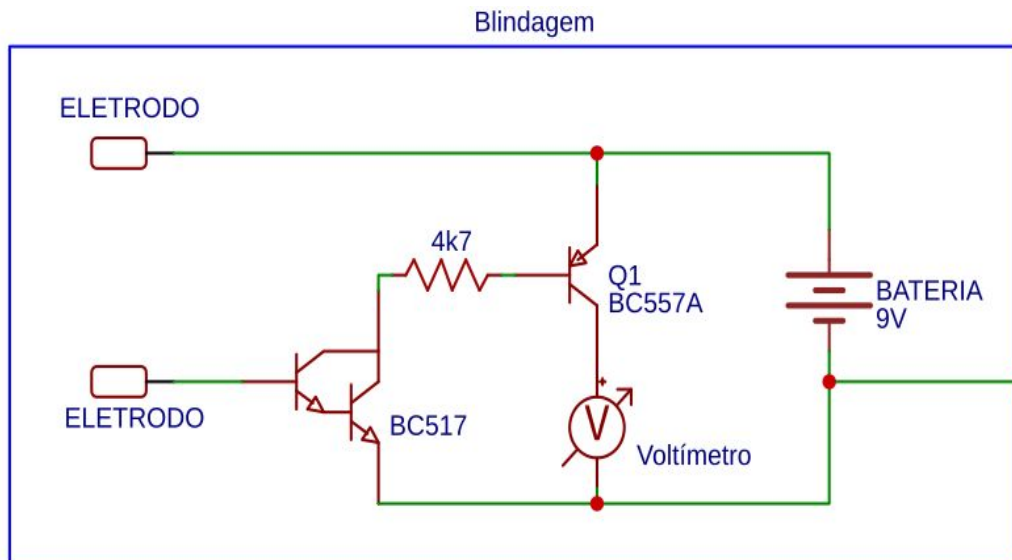


Figura 10 - Circuito do detector proposto. Fonte: Autoria própria.

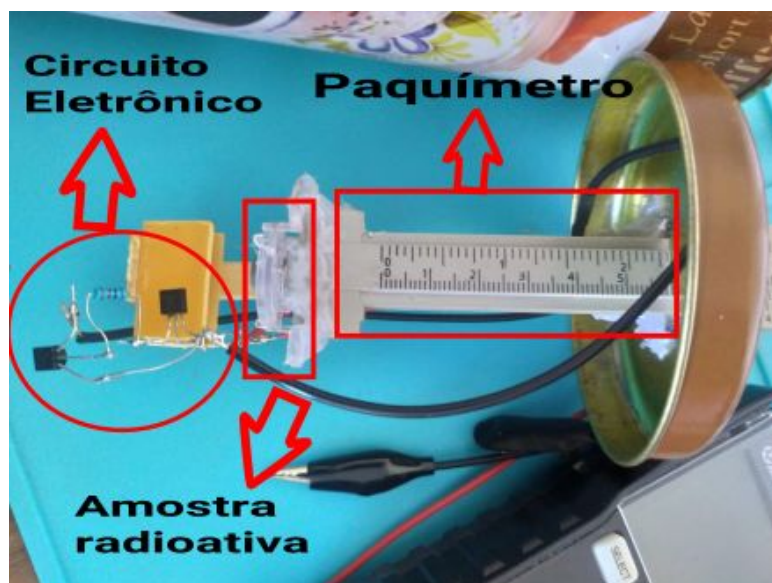


Figura 11 - Montagem do detector proposto. Fonte: Autoria própria.

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.

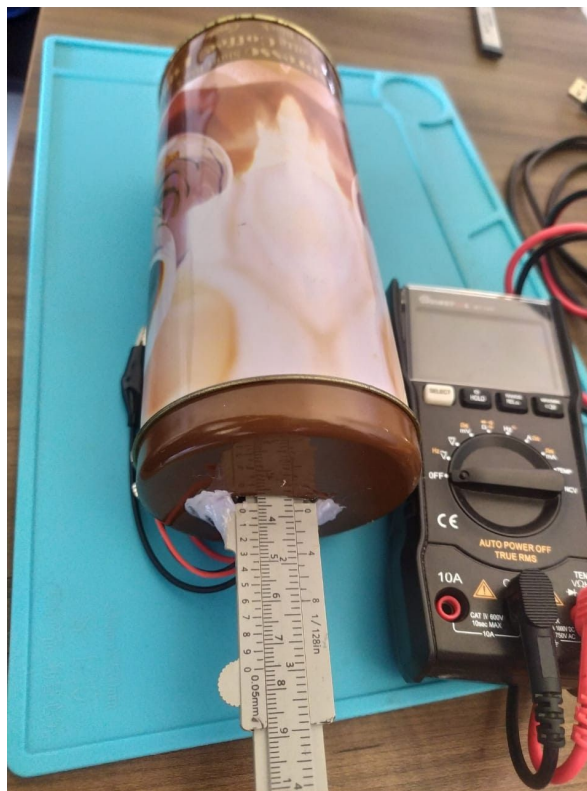


Figura 12 - Detector proposto. Fonte: Autoria própria.

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 deste trabalho.

### **3.1 Construção e operação da câmara de ionização**

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 13 -A, 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.



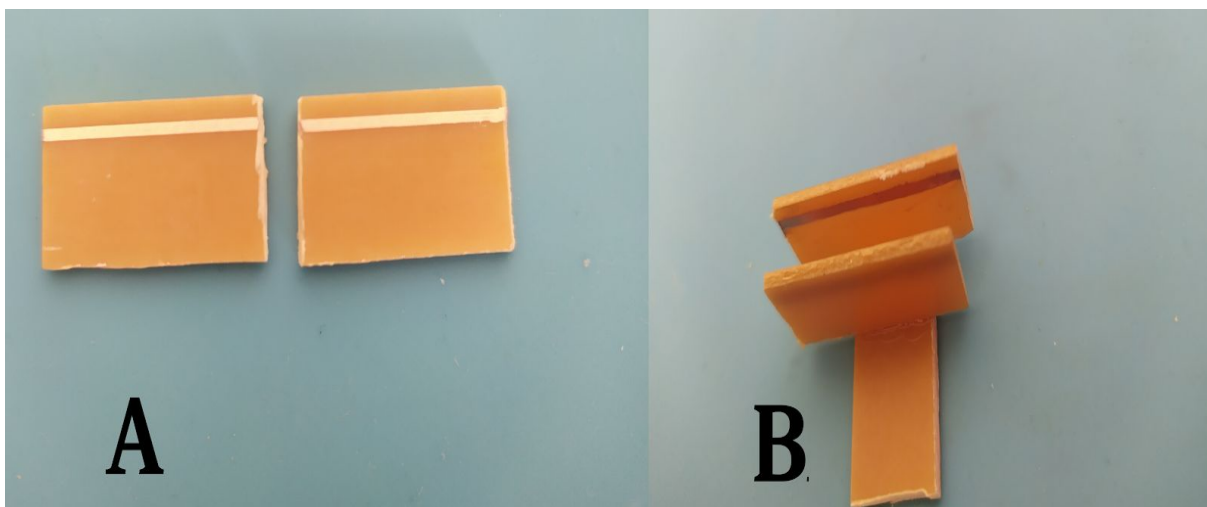


Figura 13 - A) Eletrodos usados no detector. B) Montagem dos eletrodos para fixação.

Na figura 13, 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.

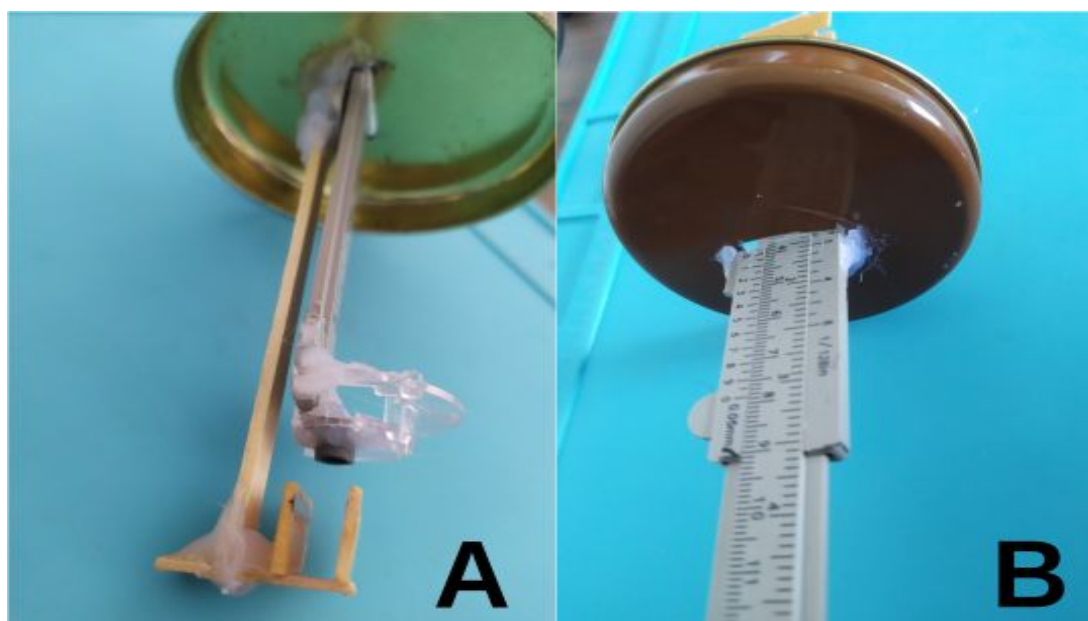


Figura 14 - A) Fixação do paquímetro e dos eletrodos. B) Parte exterior com o paquímetro já fixado.

Na figura 14, 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, visto que com isso se possa ter uma movimentação livre do paquímetro, e seja possível obter os valores de tensão corretos para cada posição da amostra.

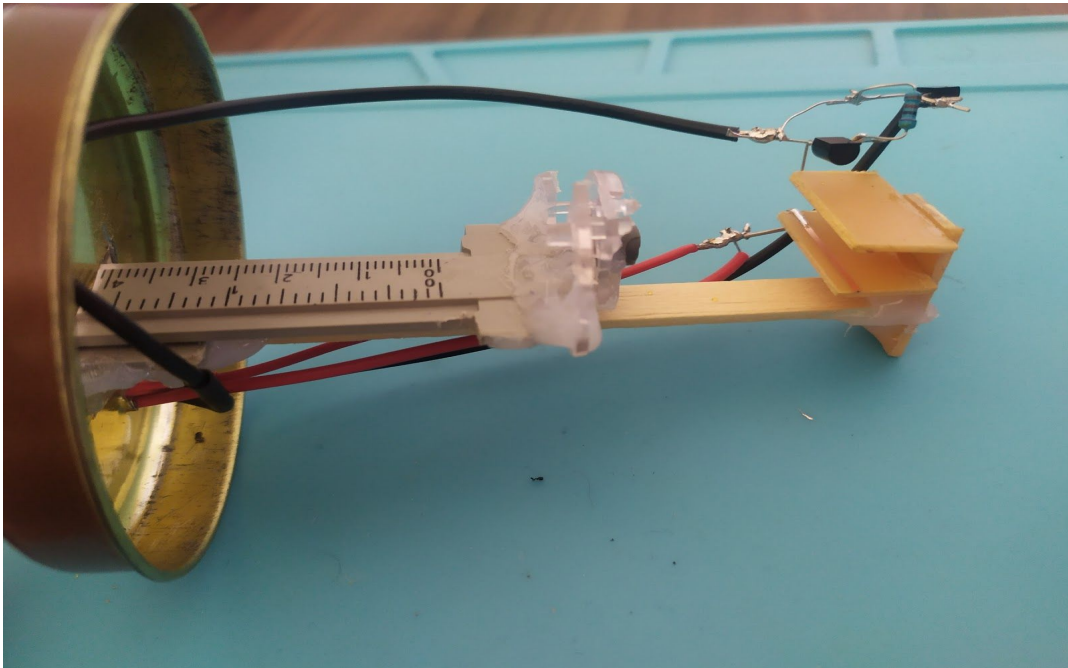


Figura 15 - Montagem final do detector com o circuito.

O circuito do detector é soldado diretamente nos eletrodos, e cada componente entre si como visto na figura 15, 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 grande). 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 16 - Detector finalizado, com o multímetro medindo a ionização da amostra radioativa.

Na figura 16, a lata está fechada com a tampa, e a amostra radioativa foi aproximada dos eletrodos, podendo ser observada uma leitura de voltagem 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 17. 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.

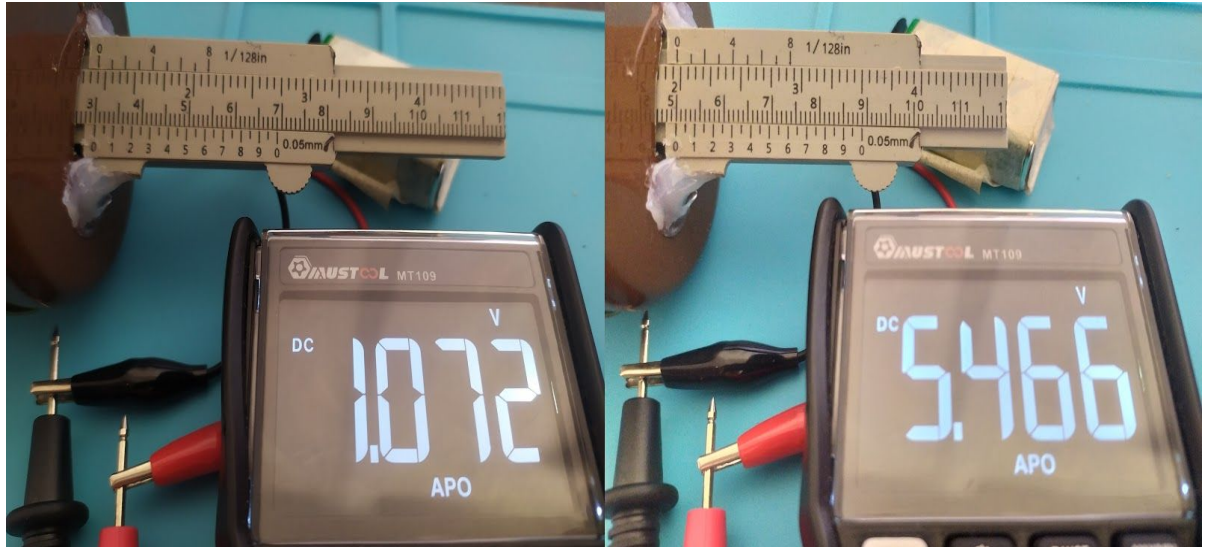


Figura 17 - Mudança da posição da fonte radioativa e seu respectivo sinal de tensão obtido.

### 3.2 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 2;

Tabela 2 - 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. Assim, devemos ajustar essas posições, onde observa-se, por exemplo, que nos valores de posição marcada para a amostra mais próxima do detector era de 7,3cm, sendo transformada, ficou em 1,2 cm. O ajuste dos valores se deu pela seguinte relação:

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

Posição (cm)	Posição - ajustada (cm)
4,1	4,4
4,3	4,2
4,5	4,0
4,7	3,8
4,9	3,6
5,1	3,4
5,3	3,2
5,5	3,0
5,7	2,8
5,9	2,6
6,1	2,4
6,3	2,2
6,5	2,0
6,7	1,8
6,9	1,6
7,1	1,4
7,3	1,2



Figura 18- Ajuste realizado nas posições da amostra radioativa. Fonte: Autoria própria.

Transformar os valores de tensão de modo que os mesmos fiquem negativos. A transformação dos valores de tensão podem ser vistos na figura 19.

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



Figura 8 - Transformação dos valores de tensão obtidos. Fonte: Autoria própria.

- 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.

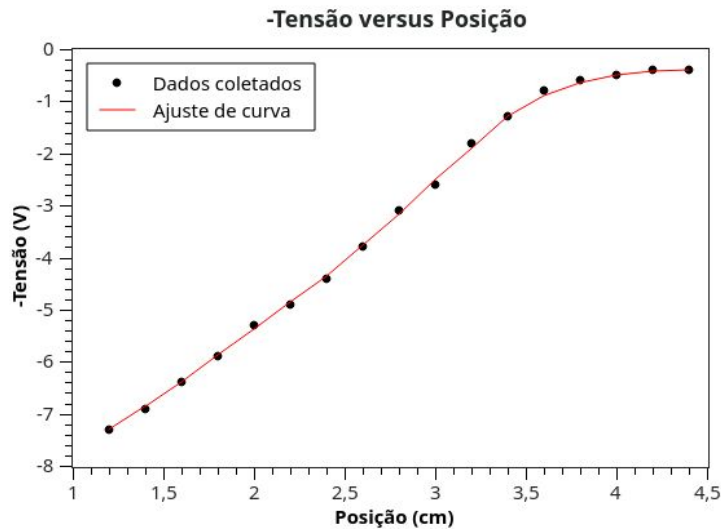


Gráfico 1 - Tensão versus posição com os dados coletados e ajuste de curva. Fonte: Autor.

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.

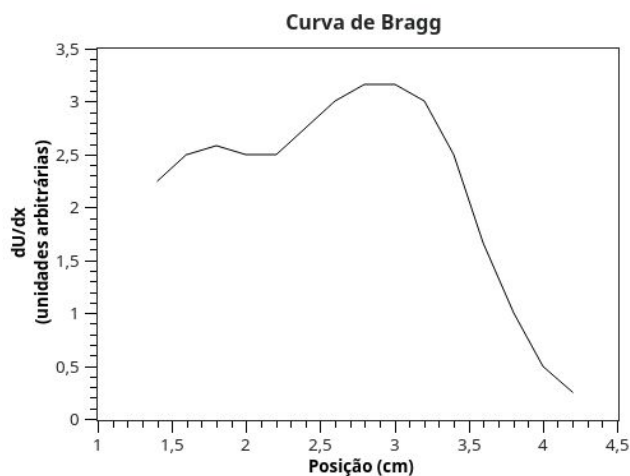


Gráfico 2 - Curva de Bragg obtida experimentalmente com o detector proposto. Fonte: Autor.



## 4. ESTRUTURA DAS AULAS E AVALIAÇÃO

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 procura-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 seguirá as etapas abaixo:

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

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

Deve ocorrer a explanação do desenvolvimento histórico da física moderna e nuclear e seus principais colaboradores, e a discussão sobre 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, é proposta a leitura das seguintes matérias sobre os acidentes de Chernobyl (como o seriado Chernobyl<sup>5</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 devem assistir a reportagem sobre os 30

---

<sup>5</sup> "Chernobyl - Parte 01 | HBO Brasil."

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



anos do acidente de Goiânia: <https://www.youtube.com/watch?v=VUHLS1WL6FM>

Esses materiais proporcionarão nas próximas etapas um debate mais 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 explana-se os decaimentos alfa e gama, bem como a diferença entre as duas, e como ocorrem na natureza. Deve ser trabalhado o tema sobre a interação da radiação com a matéria, e quais as implicações sobre tecidos biológicos. A relação sobre sociedade e radiação lembrando acontecimentos históricos como o acidente de Chernobyl e de Goiânia deve ser exposta nesta etapa.

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

Para dar continuidade a próxima etapa, os alunos deverão ler a matéria abaixo: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2011/05/25/efeitos-biologicos-das-radiao-coes-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, é explorada a curva de Bragg, bem como sua interpretação. Os alunos deverão ser questionados sobre quais métodos de tratamento de tumores eles conhecem, e após isto, será 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 é: 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 ionizá-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** – Pode ocorrer de forma virtual, onde o professor manipulará os materiais, ou presencial dividindo a sala em grupos para a experimentação.

Toda essa etapa é guiada pela pergunta: Como uma partícula alfa interage em todo o seu percurso?

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

Nesta etapa é feito o levantamento da curva de Bragg. Os alunos deverão ser encorajados a refletir sobre o que está acontecendo enquanto o material é manipulado.

Neste momento os alunos serão 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.

Ao finalizar a sequência didática, sugere-se que os alunos que produzam um relato sobre o que foi feito experimentalmente e quais conclusões eles chegaram. Esse relato será utilizado para análise qualitativa sobre a compreensão dos conteúdos e da experimentação realizadas durante a sequência. Para isso os alunos deveriam contemplar as respostas das questões abaixo na escrita do relato.

- 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?

Para análise dos relatos, além da leitura, sugere-se a construção de nuvem de palavras para análise de conceitos mais frequentes na escrita. Sugere-se a análise por meio de nuvem de palavras usando a ferramenta [tagcrowd.com](https://tagcrowd.com)<sup>6</sup>.

Como complementação ao relato, pode-se aplicar o questionário que se encontra no Apêndice.

## 5. ROTEIRO EXPERIMENTAL

### ATIVIDADE - Obtenção da curva de Bragg

**Duração: 1 a 2 aulas.**

**Objetivos:** Investigar a ionização no ar causada pela passagem da radiação alfa, encontrando experimentalmente a curva de Bragg.

**Conteúdos trabalhados:**

- Tipos de radiações;
- Interação da radiação com a matéria;
- Ionização da matéria;
- Funcionamento da câmara de ionização;
- Curva de Bragg.

**Materiais utilizados:**

- Câmara de ionização,
- Multímetro.

**Desenvolvimento da atividade:**

Para a realização desta atividade, deve-se seguir os seguintes passos:

1. Certificar que a câmara de ionização esteja devidamente fechada e bem apoiada sobre uma superfície;
2. Conectar uma bateria 9V à câmara de ionização;
3. Ligar o multímetro e escolher a opção de Tensão Corrente Contínua na escala adequada;

---

<sup>6</sup> "TagCrowd." <https://tagcrowd.com/>. Acessado em 10 out.. 2020.

4. Posicionar a amostra radioativa o mais afastado possível, para isso deve-se puxar o paquímetro para trás;
5. Criar uma planilha eletrônica, ou separar algum caderno de anotações para registrar os valores;
6. Aproximar a fonte radioativa a cada 2 mm, anotando os valores de posição e tensão correspondentes. Para cada nova medida, sugere-se esperar ao menos 30-60s até que o valor de tensão estabilize;
7. Ajustar os valores de tensão e posição conforme item 3.2;
8. Abrir um novo projeto no software QtiPlot;
9. Adicionar os dados de posição e tensão devidamente ajustados (ver passo 6);
10. Plotar o gráfico tensão versus posição;
11. Realizar o ajuste de curva sobre os dados experimentais (ver item 3.2);
12. Aplicar a análise “derivada” sobre a curva ajustada;

Durante a experimentação, os alunos devem ser instigados a refletir sobre os passos que estão realizando, bem como o porquê de cada passo. Assim, algumas perguntas instigantes e norteadoras devem ser realizadas neste momento:

- Qual a relação entre posição da amostra radioativa e o valor de tensão obtido?
- Em qual posição existe maior variação de tensão?
- De que forma a tensão varia?
- Como este experimento pode estar relacionado com tratamentos medicinais (tratamento por emissão de prótons)?

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da câmara de ionização como parte de uma prática pedagógica em sala de aula se mostra 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.

O tema Física Nuclear está envolvido com acontecimentos, descobertas e aplicações de grande importância científica, tecnológica e social no último século. Estes fatos permitem desenvolver a abordagem CTS com certa facilidade. A atividade, fazendo o uso de debates ao longo das aulas, trará contribuições para a abordagem desejada. Assim, as aulas sendo permeadas por atividades que permitam o diálogo, a argumentação e a exposição de ideias, contribuirá para uma abordagem CTS. Assim, é permitido aos alunos a formação de uma opinião crítica a respeito do tema, isto contribui para a formação de cidadãos mais críticos e conscientes a respeito da ciência e tecnologia.

Com o desenvolvimento de uma ação pedagógica contextualizada no enfoque CTS, o professor poderá aperfeiçoar sua prática docente, mas além disso, poderá melhorar as condições para que os alunos se desenvolvam habilidades como capacidade de reflexão, análise crítica a respeito de problemas reais e geração de valores, com isso formando melhores cidadãos.

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.

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.

## 7. REFERÊNCIAS

ABDULLAH, Khairi Mohammad Said. **FUNDAMENTALS IN NUCLEAR PHYSICS**. Duhok: University Of Duhok, 2014. 480 p.

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.

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

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.

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: Ciaiq, 2019. 8 p.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEA. **REGULATÓRIA 3.01/001:2011: CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO, ISENÇÃO E DISPENSADEREQUISITOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**, 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>.

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.

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.

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

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.

KNOLL, Glenn F. **Radiation Detection and Measurement**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2009.

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.

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

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.



## APÊNDICE

### Questionário

1) O que é radiação alfa?

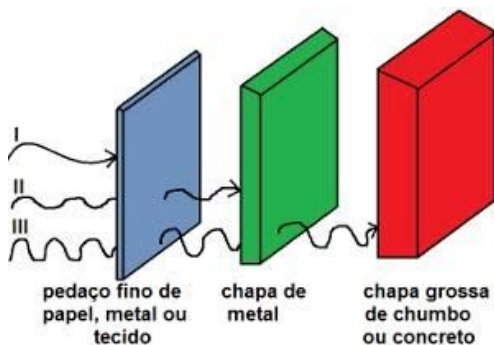
- ( ) uma partícula carregada positivamente
- ( ) radiação eletromagnética como os raios X
- ( ) partículas leves, com carga elétrica negativa e massa desprezível
- ( ) são idênticas aos elétrons e possuem carga elétrica negativa

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.

Sugere-se a aplicação deste questionário de forma digital através do Google Forms<sup>7</sup>, visto que este oferece uma estatística das questões de múltipla escolha.

---

<sup>7</sup> "Formulários Google: crie e analise pesquisas gratuitamente.."

<https://www.google.com/intl/pt-BR/forms/about/>. Acessado em 25 out.. 2020.