

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO – UFRPE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA – DF

A INSERÇÃO DOS TÓPICOS DE RAIOS-X E EFEITO COMPTON NO ENSINO
MÉDIO

Bruno da Silva Ramos

Monografia apresentada à Coordenação do
Curso de Licenciatura em Física da UFRPE,
como requisito parcial à obtenção do título de
Licenciatura plena em Física sob a orientação
da Prof.^a Dr.^a Sara Cristina Pinto Rodrigues.

Recife

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R175i Ramos, Bruno da Silva
A inserção dos tópicos de Raios-X e Efeito Compton no ensino médio / Bruno da Silva Ramos. - 2021.
48 f. : il.
- Orientadora: Sara Cristina Pinto Rodrigues.
Inclui referências e apêndice(s).
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Licenciatura em Física, Recife, 2021.
1. Ensino médio. 2. Efeito Compton. 3. Raios-X. 4. Física moderna. I. Rodrigues, Sara Cristina Pinto,
orient. II. Título

CDD 530

A INSERÇÃO DOS TÓPICOS DE RAIOS-X E EFEITO COMPTON NO ENSINO
MÉDIO

Bruno da Silva Ramos

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Licenciatura em Física da UFRPE, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura plena em Física sob a orientação da Prof.^a Dr.^a Sara Cristina Pinto Rodrigues.

Aprovada por:

Presidente: Prof.^a Dr.^a Sara Cristina Pinto
Rodrigues – DF – UFRPE

Membro: Prof. Dr. Alexandro Cardoso
Tenório – DED – UFRPE

Membro: Prof. Dr. Antônio Carlos da Silva
Miranda – DF – UFRPE

Suplente: Prof. Dr. Carlos André de Carvalho
Bosco – DF – UFRPE

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à minha mãe, que me criou sozinha, e tornou possível que este trabalho fosse feito.

As minhas tias e irmãs, que ajudaram em toda a minha educação e formação, de inúmeras formas.

A professora Sara, que gentilmente aceitou ser minha orientadora neste trabalho e desempenhou essa função de forma exemplar.

E por fim, gostaria de agradecer a todos que por meios diretos e indiretos, contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

A forma como a física é abordada no ensino médio das escolas brasileiras tem um foco quase que totalmente voltado para a física newtoniana, o que acaba causando uma total falta de tato dos alunados com tópicos de física moderna. Em consequência disto, e mantendo em mente que embora esta seja uma área de pesquisa relativamente nova, que surgiu por volta do final do século XIX e início do século XX, os conteúdos da física moderna já estão sendo aplicados em diversos lugares. Este presente trabalho tem como proposta a inserção dos tópicos de Raios-X e efeito Compton na grade curricular do ensino médio, tais tópicos são de grande importância para a física moderna e para a vida cotidiana das pessoas, por exemplo, os Raios-X são usados em larga escala para ajudar a população de várias formas diferentes, entre outras aplicações.

Palavras Chave: Raios-X, Efeito Compton, Ensino Médio.

Sumário

Capítulo 1	Introdução	5
Capítulo 2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Raios-X	7
2.2	Efeito Compton	15
Capítulo 3	Metodologia	18
3.1	Sobre a escola	18
3.2	Perfil dos Professores	19
3.3	Perfil dos Alunos	19
3.4	Plano de Aula	20
3.5	Método Avaliatório	20
Capítulo 4	Resultados	22
4.1	Resultados dos questionários	22
Capítulo 5	Conclusões	28
	Bibliografia	30
	Apêndice I	32
	Apêndice II	46
	Apêndice III	47

Capítulo 1

Introdução

A natureza da luz permaneceu sendo alvo de discussões durante anos, com duas vertentes: a teoria ondulatória e posteriormente a teoria corpuscular (partícula). Durante o século XIX surgiram grandes avanços com a teoria ondulatória, como a formulação do princípio da interferência de Thomas Young, as experiências de Augustin Jean Fresnel, entre outros. Porém no final do XIX e início do século XX, a teoria corpuscular ganhou trabalhos muito relevantes com Planck e a sua distribuição de radiação de corpo negro, Einstein e o conceito de *quanta* de energia (fóton) que mais tarde foi utilizado por Compton em sua famosa experiência chamada de *espalhamento Compton* (Rita, 2016).

O final do século XIX também foi marcado pela descoberta dos Raios-X, que hoje é amplamente utilizado para beneficiar as pessoas, como na radiologia e na radioterapia. Esses fatos não estão tão distantes um do outro, pois o espalhamento Compton, surgiu para explicar um problema que foi notado durante os experimentos de difração dos Raios-X e que será abordado mais à frente.

Por mais que essas descobertas tenham uma grande importância para a história da física, e para a humanidade, elas ficam de fora da grade curricular das escolas brasileiras. É notável que grande parte dos livros didáticos de física, voltados para o ensino médio não apresentam esses conteúdos.

Em uma pesquisa com professores do ensino médio feita por Ferreira (2007), ele apurou que uma grande parte dos professores de física do ensino médio nunca trabalharam com temas de física moderna com os seus alunos, seja por falta de tempo ou pelo grande foco nos assuntos cobrados nos vestibulares.

Dito isto, e frisando que durante todo o ensino médio, na grande maioria das vezes, os alunos só têm contato com os Raios-X e o espalhamento Compton através de oficinas e/ou vêm rapidamente esses conceitos ao final do 3ª ano do ensino médio

(Alvarenga, 2008), onde é abordado alguns assuntos de física moderna, como relatividade e efeito fotoelétrico.

Este presente trabalho, tem como proposta incentivar os professores de física do ensino médio a inserir os tópicos de Raios-X e efeito Compton no ensino médio, sendo um componente extra curricular ou até mesmo, como parte da grade de conteúdos previstos para o ano letivo. Além disso, este trabalho também se destina a graduandos e graduados em licenciatura em Física.

Com tudo isso em mente, no capítulo 2 nós veremos todo o embasamento teórico acerca dos Raios-X e do efeito Compton.

A metodologia utilizada durante a aula será vista no capítulo 3, onde descrevemos a escola ao qual foi ministrada a aula, perfil dos alunos e professores, bem como como os questionários, planos de aula e o material disponibilizado para os alunos.

No capítulo 4 serão discutidos os resultados adquiridos após os alunos responderem aos questionários, impressões dos alunos e professores. Analisaremos o nível de aprendizagem e a criticidade dos alunados.

O capítulo 5 abordará as considerações finais do trabalho.

Capítulo 2

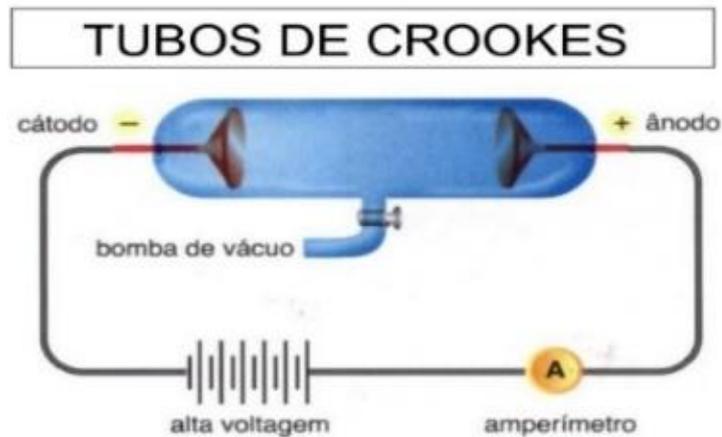
Fundamentação Teórica

Os Raios-X são de grande importância para nós, tendo em vista que eles têm uma vasta aplicabilidade, sendo amplamente utilizados na medicina. Após a descoberta desses raios, observou-se um comportamento estranho no fenômeno de difração. Tal resultado inesperado só foi explicado alguns anos depois, e ficou conhecido como espalhamento Compton (ou efeito Compton). A seguir descreveremos esses dois fenômenos.

2.1 Raios-X

Os Raios-X, nada mais são do que radiação eletromagnética gerada a partir da interação de elétrons acelerados com os átomos de algum material. Eles foram descobertos em 1895 por um físico chamado Wilhelm Conrad Roentgen, de origem alemã. O físico observou a presença dos Raios-X durante uma experiência com o tubo de Crookes (Tipler, 2013). Segundo o seu descobridor, os Raios-X têm um forte poder de penetração, além de queimar filmes fotográficos e excitar telas fluorescentes.

Segundo Fernandes (2018), em um artigo publicado na revista História da Ciência e Ensino, o trabalho de William Crookes (1832 – 1919) foi de suma importância para que o elétron fosse descoberto por Joseph John Thompson (1856 – 1940). A experiência do tubo de Crookes (Figura 2.1) consiste em acelerar os elétrons provenientes do aquecimento de um cátodo localizado em uma das extremidades do tubo, utilizando uma diferença de potencial, esses elétrons por sua vez colidem com um alvo (ânodo) disposto na outra extremidade do tubo, essa interação entre os elétrons acelerados e o alvo acabam gerando os Raios-X (Eisberg, 1979).



11

Figura 2.1: Esquema do tubo de Crookes. (Estudanteradiologico, 2016)

2.1.1 Radiação de *Bremsstrahlung*

Os Raios-X que foram detectados por Roentgen, são gerados a partir da desaceleração dos elétrons devido a interação dos mesmos com os núcleos dos átomos do material alvo. Esse tipo de radiação proveniente da desaceleração de uma carga em movimento, é chamada de radiação de *Bremsstrahlung*, cujo significado desta palavra em alemão é “radiação de frenagem” (Tipler, 2013).

2.1.2 Produção dos Raios-X

Na experiência do tubo de Crookes, os elétrons adquirem uma certa energia cinética K ao serem expostos à uma diferença de potencial alta, essa diferença de potencial precisa ser da ordem de KeV . Ao interagir com os átomos do material alvo, a força Coulumbiana entre o elétron incidente e o núcleo do material alvo, provoca uma desaceleração no elétron que por sua vez perde energia. Como o elétron tem um certo momento associado a ele, a interação com o núcleo transfere parte desse momento para o mesmo. De acordo com a conservação do momento, nós temos que:

$$p_{e,i} = p_n + p_{e,f}, \quad (2.1)$$

onde $p_{e,i}$ corresponde ao momento do elétron antes, $p_{e,f}$ o momento após a colisão e p_n ao momento do núcleo. De acordo com a física clássica nós podemos escrever o momento de um objeto como a multiplicação da sua massa pela a sua velocidade, então a equação (2.1) pode ser reescrita como:

$$m_e v_{e,i} = m_n v_n + m_e v_{e,f}, \quad (2.2)$$

com m_e correspondendo a massa elétron, m_n a massa do núcleo alvo e $v_{e,i}$, v_n e $v_{e,f}$ sendo a velocidade do elétron antes da colisão, a velocidade do núcleo e a velocidade do elétron após a colisão, respectivamente. Da equação (2.2) é possível tirar que v_n será:

$$v_n = \frac{m_e(v_{e,i} - v_{e,f})}{m_n}, \quad (2.3)$$

como a massa do núcleo é muito maior que a massa do elétron ($m_n \gg m_e$), nós podemos considerar que $v_n \approx 0$, ou seja toda a energia transferida para o núcleo pode ser desprezada. Porém, a variação na velocidade do elétron, faz com que o mesmo emita um fóton com energia igual a sua variação de energia cinética, esse fóton é um fóton de Raio-X como podemos ver na Figura (2.2).

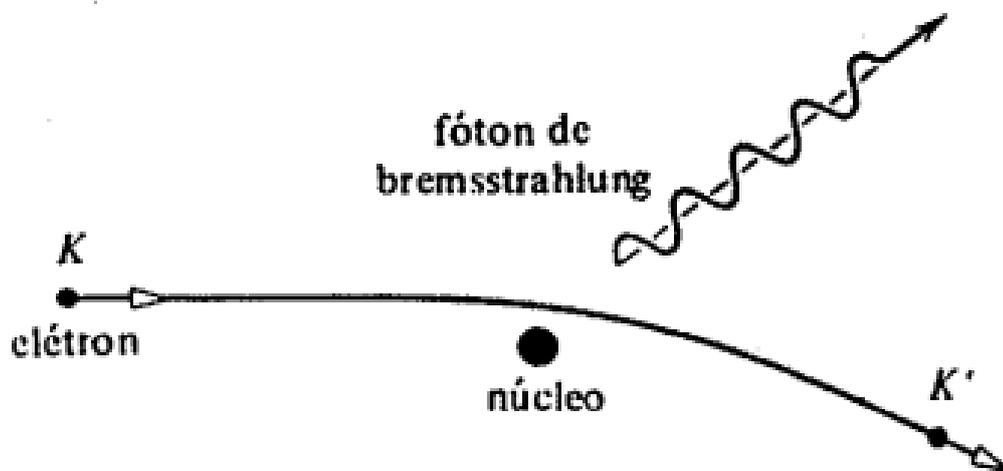


Figura 2.2: Esquema da interação dos elétrons com os átomos do material alvo. (Eisberg, 1979)

Se K é a energia cinética do elétron antes da interação e K' a sua energia cinética após a colisão, nós podemos dizer que a energia do fóton é:

$$K - K' = E_{fóton}, \quad (2.4)$$

porém, a energia de um fóton, segundo Einstein, pode ser calculada a partir de sua frequência com a seguinte equação:

$$E_{fóton} = hf, \quad (2.5)$$

onde h é a constante de Planck ($h = 6,62607004 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$). Com isso, nós podemos reescrever a equação (2.4) como:

$$K - K' = hf, \quad (2.6)$$

como $f = \frac{c}{\lambda}$, onde c é a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo ($c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) e λ é o comprimento de onda do fóton (Eisberg, 1979), a equação anterior pode também pode ser escrita como:

$$K - K' = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2.7)$$

explicitando λ :

$$\lambda = \frac{hc}{K - K'}. \quad (2.8)$$

Analisando a equação (2.8) fica evidente que existe um comprimento de onda mínimo (λ_{min}) que será emitido, esse comprimento de onda mínimo corresponde ao caso onde o elétron perde toda a sua energia cinética ($K' = 0$). A energia que o elétron adquire devido a diferença de potencial é $K = eV$ ($1 \text{ eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Substituindo K e K' em (2.8) nós temos que:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV}. \quad (2.9)$$

Porém na maioria dos casos os elétrons só perdem toda a sua energia cinética após várias interações com os átomos do material alvo, logo os fótons emitidos têm comprimentos de ondas que vão desde λ_{min} até $\lambda \rightarrow \infty$. Formando assim um espectro contínuo de emissão de Raios-X como podemos ver na Figura 2.3 (Eisberg, 1979).

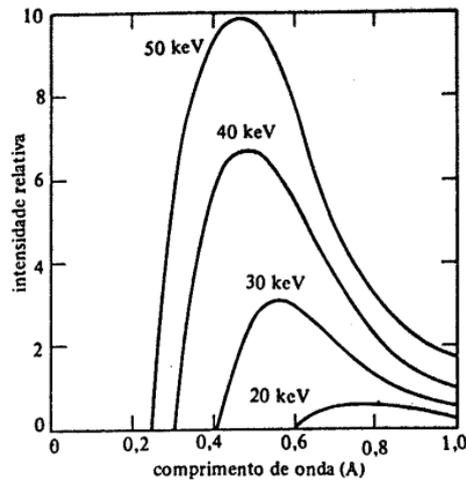


Figura 2.3: Espectro contínuo de Raios-X para diferentes valores de V . (Eisberg, 1979)

A forma desse espectro contínuo depende do material alvo, porém o λ_{min} depende apenas da diferença de potencial V e é o mesmo para todos os materiais. O espectro contínuo não é o único espectro de Raios-X que é emitido durante as interações dos elétrons, existe também um espectro discreto que depende do material alvo, porém esse espectro não será visto detalhadamente neste trabalho (Tipler, 2013).

2.1.3 Padrão de Difração

A difração é um fenômeno associado à natureza ondulatória das ondas eletromagnéticas, nela é possível ver com clareza um padrão de intensidade com um máximo central e vários máximos com intensidades que diminuem à medida que nós afastamos do máximo central (Tipler, 2019).

Os mínimos de intensidade no padrão de difração para uma fenda de largura a , em um anteparo localizado a uma distância L da fenda (Figura 2.4) podem ser facilmente encontrados pela seguinte equação:

$$a \sin \theta_m = m\lambda, \text{ onde } m = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.10)$$

se explicitarmos $\sin \theta$ na equação anterior e pegarmos $m = 1$, nós temos que:

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{a}. \quad (2.11)$$

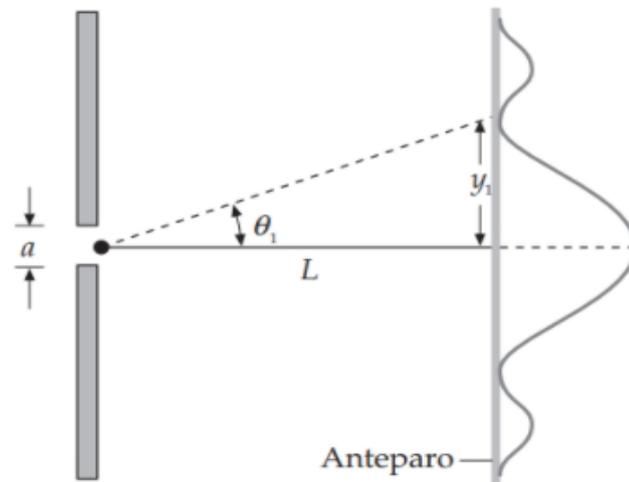


Figura 2.4: Esquema de difração. (Tipler, 2019)

Analisando a equação (2.11), nós observamos que se $a \gg \lambda$ isso implica que $\sin \theta_1 \approx 0$, o que torna impossível de ser observado o padrão de difração, já que o primeiro mínimo da difração estará em $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$. Portanto, chegamos à conclusão que a largura da fenda (a) tem que ser da mesma ordem do comprimento de onda da onda eletromagnética que queremos observar o padrão de difração (Tipler, 2019).

2.1.4 Difração dos Raios-X

Como vimos anteriormente, é necessário que a fenda pelo qual a onda que queremos visualizar o padrão de difração irá passar, seja da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do feixe, o que torna muito difícil a observação do padrão de difração dos Raios-X, tendo em vista que eles têm um comprimento de onda muito pequeno, da ordem de Ångström.

Por ser tão difícil de se conseguir uma fenda que fosse possível observar esse fenômeno, o padrão de difração nos Raios-X só foi observado em 1912 pelo físico

William Lawrence Bragg. Este observou que o comprimento de onda dos Raios-X tinha a mesma ordem de grandeza que a distância dos átomos de um cristal, e que seria possível visualizar a difração se fosse utilizado um cristal como “fenda” (Tipler, 2013).

A proposta de Bragg para esse experimento era pegar planos paralelos de átomos e verificar a diferença de caminho entre os Raios-X que eram difratados pelos planos, como podemos ver na Figura 2.5 (Tipler, 2013).

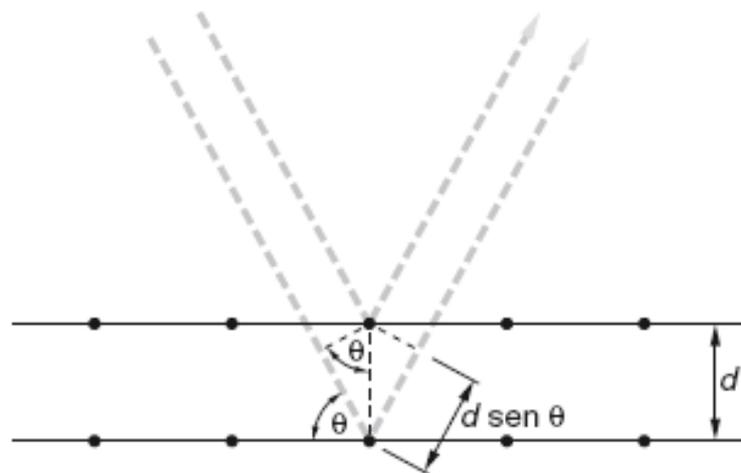


Figura 2.5: Duas famílias de planos paralelos. (Tipler, 2013)

O cristal utilizado por Bragg foi um cristal de NaCl que tem uma estrutura cúbica como podemos ver na Figura 2.6. O experimento, ilustrado na Figura 2.7, apresentou resultados inesperados na visão da física clássica. Os Raios-X difratadas que eram detectados pela câmara de ionização apresentavam comprimento de onda iguais ou maiores que o comprimento de onda do feixe de Raios-X incidente no cristal (Paladi, 2010).

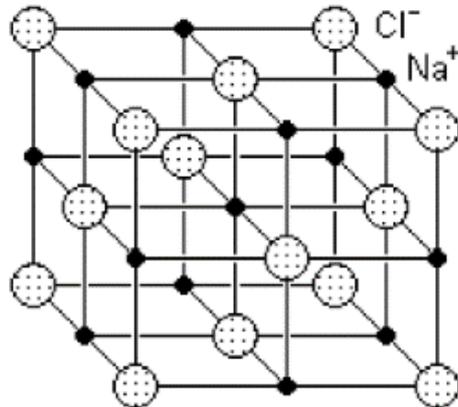


Figura 2.6: Estrutura do cristal de NaCl. (Paladi, 2010)

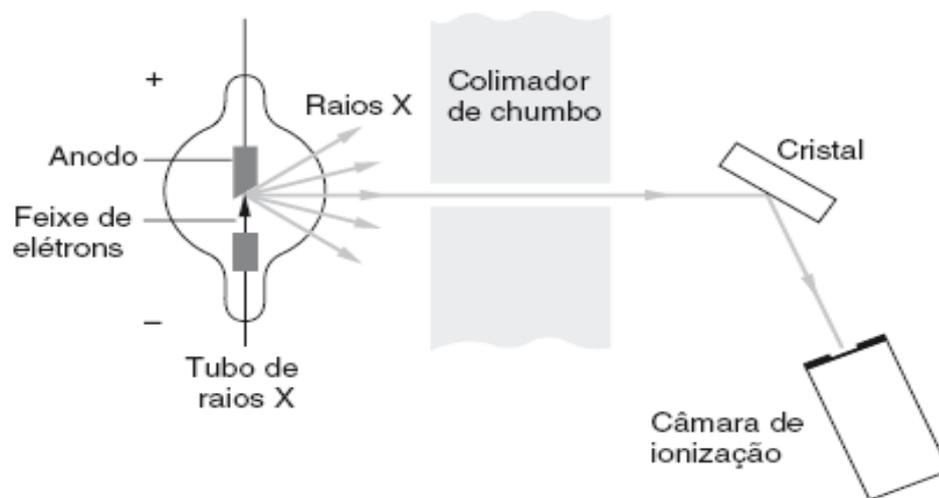


Figura 2.7: Experiência de Bragg para observar a difração dos Raios-X em um cristal de NaCl. (Tipler, 2013)

Esse resultado só foi explicado algum tempo depois pelo físico Arthur Holly Compton (1892 – 1962), com o chamado *espalhamento Compton*, que confirmou a natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas (Tipler, 2013).

2.2 Efeito Compton

Durante a experiência para observar a difração dos Raios-X, uma observação estranha foi feita. Observou-se que os Raios-X difratados tinham comprimentos de ondas que diferiam do comprimento de onda do feixe incidente por um fator de $\Delta\lambda$.

Esse resultado saiu completamente do que se era esperado de acordo com a física clássica, e se tornou um mistério a ser solucionado. Foi em 1923, que Compton não só explicou esse resultado estranho, como também confirmou que as ondas eletromagnéticas apresentavam propriedades corpusculares, utilizando o conceito de fóton, introduzido por Einstein anos antes.

Para explicar a variação do comprimento de onda dos Raios-X difratados, Compton sugeriu que os Raios-X fossem compostos por fóton com energia descrita pela equação (2.5). Esses fótons colidem com os elétrons livres do material alvo e eram espalhados (Figura 2.8), assim como um em jogo de bilhar (Paladi, 2010).

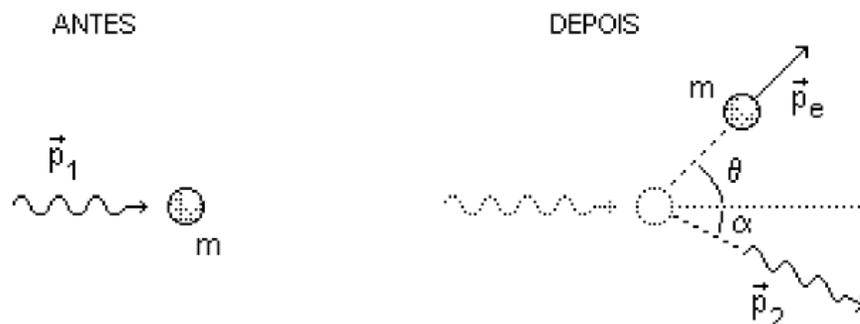


Figura 2.8: Colisão entre o fóton de Raio-X e o elétron livre do material alvo. (Paladi, 2010)

Para chegarmos à conclusão de Compton, precisamos analisar a colisão entre o fóton e o elétron, como ilustrado na Figura 2.8. Um fóton com momento igual a \vec{p}_1 colide com um elétron e ambos são espalhados, o elétron que estava em repouso adquire um momento \vec{p}_e e o fóton agora tem um momento igual a \vec{p}_2 . Como podemos tratar essa colisão como um sistema isolado, o momento do sistema se conserva e nós podemos escrever essa conservação em referência aos eixos coordenados (Eisberg, 1979).

Em x nós teremos:

$$p_1 = p_2 \cos \alpha + p_e \cos \theta, \quad (2.12)$$

e em y:

$$p_2 \sin \alpha = p_e \sin \theta, \quad (2.13)$$

elevando as equações (2.12) e (2.13) ao quadrado nós ficamos com:

$$(p_1 - p_2 \cos \alpha)^2 = p_e^2 \cos^2 \theta \quad \text{e} \quad (2.14)$$

$$p_2^2 \sin^2 \theta = p_e^2 \sin^2 \theta, \quad (2.15)$$

somando essas equações:

$$p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \alpha = p_e^2. \quad (2.16)$$

Como não há forças dissipativas durante a colisão, a energia do sistema se conserva e a energia do elétron tem que ser calculada pela energia relativística (Eisberg, 1979):

$$E_e^2 = c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2, \quad (2.17)$$

onde m_0 é a sua massa de repouso e p é o seu momento. Antes da colisão o elétron está em repouso e portando o seu momento é nulo, logo sua energia antes da colisão é $E_e = m_0 c^2$.

A conservação de energia do sistema nos diz que:

$$E_{f(\text{incidente})} + E_{e(\text{repouso})} = E_{f(\text{espalhado})} + E_e. \quad (2.18)$$

Como o fóton não tem massa de repouso, sua energia é puramente cinética e pode ser obtida pela equação (2.17) se fizermos $m_{0(\text{fóton})} = 0$, o que resulta em:

$$E_f = cp, \quad (2.19)$$

e da equação (2.17), nós tiramos que a energia do elétron após a colisão é $E_e = \sqrt{c^2 p_e^2 + (m_0 c^2)^2}$, com essas informações e assumindo que $E_{f(\text{incidente})} = cp_1$ e $E_{f(\text{espalhado})} = cp_2$, nós podemos reescrever a equação (2.18) da seguinte forma:

$$p_1 c + m_0 c^2 = p_2 c + \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4}, \quad (2.20)$$

arrumando, nós temos:

$$p_1 c - p_2 c + m_0 c^2 = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4}, \quad (2.21)$$

elevando ao quadrado temos:

$$p_1^2 c^2 + p_2^2 c^2 + 2p_1 m_0 c^3 - 2p_1 p_2 c^2 - 2p_2 m_0 c^3 + m_0^2 c^4 = p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4, \quad (2.22)$$

arrumando e dividindo tudo por c^2 chegamos em:

$$p_1^2 + p_2^2 + 2p_1m_0c - 2p_2m_0c - 2p_1p_2 = p_e^2, \quad (2.23)$$

agora substituindo o valor de p_e^2 da expressão anterior em (12), nós ficamos com:

$$p_1^2 + p_2^2 + 2p_1m_0c - 2p_2m_0c - 2p_1p_2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta \quad (2.24)$$

rearranjando:

$$2p_1m_0c - 2p_2m_0c = 2p_1p_2 - 2p_1p_2 \cos \theta, \quad (2.25)$$

Daí dividindo tudo por $2p_1p_2m_0c$ ficamos com:

$$\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{m_0c} (1 - \cos \theta). \quad (2.26)$$

Da equação (2.19) nós podemos escrever o momento do fóton como $p = \frac{E}{c}$, onde $E = hf$ e $f = \frac{c}{\lambda}$, logo o momento também pode ser escrito como $p = \frac{h}{\lambda}$ (Tipler, 2013). Substituindo em (2.26):

$$\frac{1}{\frac{h}{\lambda_2}} - \frac{1}{\frac{h}{\lambda_1}} = \frac{1}{m_0c} (1 - \cos \theta), \quad (2.27)$$

rearranjando:

$$\frac{\lambda_2}{h} - \frac{\lambda_1}{h} = \frac{1}{m_0c} (1 - \cos \theta), \quad (2.28)$$

assim:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta) \text{ ou} \quad (2.29)$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta), \quad (2.30)$$

onde $\Delta\lambda$ que é chamado de *deslocamento de Compton*, depende apenas do ângulo do espalhamento θ . O termo $\frac{h}{m_0c}$ é chamado de *comprimento de onda Compton do elétron* e é igual a 0,00243 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) (Tipler, 2013).

A equação (2.30) é chamada equação de Compton, e é ela quem explica a diferença $\Delta\lambda$ entre os comprimentos de onda do feixe incidente e o comprimento de onda dos raios difratados.

No próximo capítulo apresentaremos a metodologia proposta para este trabalho.

Capítulo 3

Metodologia

Devido ao cenário atual do mundo frente a pandemia do COVID-19, os professores tiveram que se reinventar e achar formas de prender o interesse dos alunos às aulas remotas, e para tal, os mesmos buscaram ferramentas para deixar as aulas mais atrativas, como vídeos, simulações, etc. Com essa perspectiva, neste capítulo será descrita a escola, o perfil dos alunos e professores onde a aula foi ministrada. Também será abordada a metodologia proposta e utilizada nas aulas.

3.1 Sobre a escola

A escola onde foi realizado este trabalho foi o Colégio Militar do Recife (CMR) localizada no bairro da Cidade Universitária, na região metropolitana do Recife. Nela são oferecidos dois níveis de ensino, sendo eles fundamental II e ensino médio, ambos nos turnos da manhã e da tarde. A escola ainda oferece para os alunos do ensino médio um incentivo a projetos de iniciação científica.

Além disso, conta com um quadro de 85 professores sendo que 5 deles são de física. Além disso, o colégio possui um clube de física, onde os alunos desenvolvem vários projetos para serem apresentados em feiras e eventos. A sua estrutura é composta por: quadra poliesportiva, piscina semiolímpica, campo de futebol, 30 salas de aula com computadores, multimídias e acesso à internet para os professores. Podemos ver sua fachada na Figura 3.1.



Figura 3.1. Faixada da escola.

3.2 Perfil dos Professores

Todos os professores de física, que atualmente trabalham na escola são graduados em física, 4 possuem pós-graduação também em física onde 2 são mestres e 2 doutores. Dentre esses professores 2 são militares, um atualmente ainda está na ativa já o outro está na reserva.

Os professores são distribuídos de modo que, os primeiros e os segundos anos do ensino médio tem 1 professor cada, os terceiros anos ficam com 2 professores, sendo um deles para as aulas online e o outro para as aulas presenciais, já que a escola se encontra em modelo de ensino híbrido e o último professor está de licença médica.

3.3 Perfil dos Alunos

Todos os alunos têm acesso à internet e a dispositivos eletrônicos, o que os deixam aptos a acompanhar as atividades remotas ministradas na escola. Alguns dos alunos que fazem parte do clube de física, ao qual o presente autor é orientador de alguns projetos, são muito ligados à física e como consequência disso, acabam desenvolvendo projetos na área, que ajudam no seu processo de aprendizagem de modo geral.

3.4 Plano de Aula

Com o intuito de apresentar para os alunos os conceitos vindos de duas grandes descobertas da física, os Raios-X e efeito Compton, a aula foi estruturada de forma que os conteúdos fossem abordados de forma simples, para que os alunos conseguissem acompanhar sem muitos problemas. Devido a pandemia do COVID-19 e as medidas sanitárias adotadas, as aulas foram ministradas de forma remota através do *Google Meet* durante as aulas do professor da disciplina de Física, com uma duração de 45 minutos cada.

Com auxílio da apostila, slides e vídeo retirados do *Youtube* (os vídeos podem ser vistos no Apêndice III), foram abordados de forma expositiva e dialogada os conteúdos a seguir:

- Descoberta dos Raios-X
- Ondas eletromagnéticas
- Radiação de *Bremsstrahlung*
- Difração
- Difração de Bragg
- Contextualização histórica da discussão dualidade onda-partícula
- Teoria corpuscular da luz
- Efeito Compton.

Uma apostila foi criada pelo autor deste trabalho (ver Apêndice I) e foi disponibilizada para os alunos como forma de material de apoio.

3.5 Método Avaliatório

Como forma de avaliação da aprendizagem dos conceitos abordados na aula, foi preparado um questionário, que pode ser visto no Apêndice II, utilizando o *Google*

Formulário. Os alunos tiveram que responder perguntas sobre os assuntos abordados, antes e após à aula, para que pudéssemos ter um comparativo entre os conceitos absorvidos.

A seguir descreveremos os resultados obtidos.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo apresentaremos os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta, onde analisaremos as respostas dadas nos questionários aplicados.

4.1 Resultados dos questionários

A aula com os conteúdos de Raios-X e efeito Compton, foi ministrada para duas turmas do CMR, uma que é focada para a carreira militar (CAMIL) que contou com a presença de 12 alunos, já a outra é voltada para a carreira acadêmica (CAUNI) composta por 32 alunos presentes na aula totalizando 44 alunos (podemos ver parte desta aula na Figura 4.1). Como a grade curricular das turmas são compartilhadas, ambas serão analisadas de forma conjunta neste trabalho.

DIFRAÇÃO DE BRAGG

$\lambda = 1 \text{ \AA}$

$2d \sin(\theta) = m\lambda \text{ onde } m = 1, 2, 3 \dots$

Bruno Silva

Figura 4.1. Aula online ministrada para a turma do CAMIL.

Como forma de verificar a carga de conhecimento dos alunos antes de serem expostos a aula, foi pedido que eles respondessem o questionário sem qualquer forma de consulta, e que como parte da verificação de aprendizagem que eles respondessem o mesmo questionário após a aula.

No questionário, as respostas consideradas corretas foram as que estavam em plena concordância com o material didático disponibilizado para os alunos, as parcialmente corretas apresentavam informações incompletas, e as respostas consideradas erradas foram as que estavam em branco ou em total divergência com a literatura.

Questão 1 – “O que são os Raios-X? Cite algumas de suas aplicações.”

Tabela 4.1 Resultados percentuais da Questão 1.

Antes da Aula			Após a Aula		
Certas	Parcialmente Certas	Erradas	Certas	Parcialmente Certas	Erradas
71,24%	23,80%	4,76%	88%	12%	0%

Segue alguns exemplos de respostas para esta questão:

Resposta correta: “Radiação eletromagnética fora do espectro de luz visível. É amplamente aplicado na medicina, seja para tratamento de câncer até identificação de fraturas nos ossos.”

Resposta parcialmente correta: “Ondas, com aplicações na indústria, em laboratórios e na medicina.”. Nesta resposta, quando o aluno fala somente “ondas”, ele engloba também as ondas mecânicas o que torna a resposta divergente do se é sabido sobre os Raios-X.

Resposta errada: Para esta questão não houveram respostas que divergiram totalmente da literatura, portanto só foi considerado como resposta errada as que estavam em branco.

A primeira questão que aborda o tema dos Raios-X, teve uma grande taxa de respostas corretas no questionário, como podemos ver na Tabela 4.1, isto se deve ao fato de que os alunos participaram de uma oficina de Raios-X ministrada cerca de 2 semanas antes da aula sobre Raios-X e efeito Compton por um dos estagiários da escola, logo já era esperado que eles acertassem esta questão.

Questão 2 – “Porque era tão difícil de ser observada a difração dos Raios-X?”

Tabela 4.2 Resultados percentuais da Questão 2.

Antes da Aula			Após a Aula		
Certas	Parcialmente Certas	Erradas	Certas	Parcialmente Certas	Erradas
4,76%	14,28%	80,95%	80%	12%	4%

Segue alguns exemplos de respostas para esta questão:

Resposta correta: “Por que o tamanho da fenda necessária pra difração era muito pequena, não podendo ser produzida por ser na escala de angstrons.”

Resposta parcialmente correta: “Pois os comprimentos de onda são muito pequenos.”. Esta resposta está incompleta, pois não foi nem ao menos citado que o a fenda para ser observado o fenômeno de difração tem que ser da mesma ordem de grandeza dos Raios-X.

Resposta errada: “Por que a distancia entre a fenda e parede tinha que ser muito pequena.”

A questão 2 trata de um fenômeno de ondas eletromagnéticas, e é notório pela Tabela 4.2 que os alunos não souberam responder de forma correta esta questão sem antes terem assistido a aula. Porém, após a explicação apresentada em aula, os alunos conseguiram entender o proposto e obtiveram uma boa taxa de sucesso ao responder esta questão.

Durante a aula, um aluno em específico conseguiu ligar a difração dos Raios-X (difração de Bragg) à uma questão que o mesmo havia visto no Exame Nacional do

Ensino Médio (ENEM), o que é uma grande vitória, pois podemos concluir que eles entenderam o conteúdo e ainda conseguiram relacionar com algo já visto antes.

Questão 3 – “Qual foi a hipótese de Compton para explicar a diferença no comprimento de onda observado nos Raios-X difratados?”

Tabela 4.3 Resultados percentuais da questão 3.

Antes da Aula			Após a Aula		
Certas	Parcialmente Certas	Erradas	Certas	Parcialmente Certas	Erradas
0	9,52%	90,48%	92%	8%	0%

Segue alguns exemplos de respostas para esta questão:

Resposta correta: “Os raios x poderiam ser vistos como sendo formado por partículas e estas partículas colidiam com os átomos da rede de difração, assim como uma bola colide com outra bola e as duas vão para direções diferentes.”

Resposta parcialmente correta: “Que as ondas eletromagnéticas também poderiam ser enxergadas como partículas se colidindo.”

Resposta errada: Para esta questão, as respostas consideradas erradas foram somente as que estavam em branco.

O efeito Compton foi abordado nesta terceira questão e como era esperado, os alunos não souberam responder, como podemos ver na Tabela 4.3 não houve nenhum acerto antes da aula, o que nos diz que eles nunca tiveram contato com o tema. Já no questionário disponibilizado após a aula, os alunos souberam responder de forma coesa o que era pedido, chegando a obterem 0 respostas erradas.

Questão 4 – “O deslocamento de Compton depende do comprimento de onda do feixe de Raios-X incidente?”

Tabela 4.4 Resultados percentuais da questão 4.

Antes da Aula			Após a Aula		
Certas	Parcialmente Certas	Erradas	Certas	Parcialmente Certas	Erradas
23,80%	0%	76,19%	96%	0%	4%

Para esta questão, como não foi pedido que os alunos justificassem, só foram obtidas respostas “sim” e “não”, sendo “sim” a resposta considerada errada e “não” a resposta considerada correta.

Como verificado na Tabela 4.4, a taxa de respostas corretas antes da aula, para a questão 4 foi de 23,80%. Um resultado que não era esperado, já que os alunos não tiveram contato com o conteúdo durante o ano letivo, e é possível que tenham apenas dito qualquer resposta que tenha vindo à mente, já que na questão não se pede uma justificativa. Porém, as respostas consideradas corretas obtiveram um salto enorme no questionário após a aula, com um aumento de 72,2%.

Questão 5 – “Qual é deslocamento Compton para um ângulo de espalhamento de 90° ? Dados: $h = 6,62607004 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$, $m_o = 9,10938356 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ e $c = 300\,000\,000 \text{ m/s}$ ”.

Tabela 4.5 Resultados percentuais da questão 5 antes da aula.

Antes da Aula			Após a Aula		
Certas	Parcialmente Certas	Erradas	Certas	Parcialmente Certas	Erradas
0%	0%	100%	36%	16%	48%

Segue alguns exemplos de respostas para esta questão:

Resposta correta: “ $2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ ”

Resposta parcialmente correta: " $2,4 * 10^{-12} \text{ nm.}$ "

Resposta errada: " $2,19554 * 10^{22}.$ "

Já que esta questão 5 requer um melhor conhecimento do espalhamento Compton e da famosa equação de Compton, nós vemos pela Tabela 4.5 que houve 0% de taxa de acertos antes da aula. Porém após a aula, a taxa de acertos subiu para 36% e se considerarmos as respostas parcialmente certas, a taxa sobe para 52%, isto é um indicativo que os alunos estavam no caminho certo.

Dos 44 alunos que assistiram a aula, apenas 21 deles responderam ao questionário disponibilizado antes da aula e 25 responderam o questionário após a aula.

De forma geral, podemos observar que a aplicação da proposta aos alunos teve bons resultados e estes foram capazes de compreender o conteúdo. As discussões foram proveitosas e os alunos se interessaram pelos temas, fazendo perguntas e até fazendo ligações entre o tema da aula e sua bagagem de conhecimento. O professor destes alunos aprovou a metodologia empregada e todo o material foi repassado ao mesmo para uso futuro. Tudo isso foi fundamental para a construção do processo-aprendizagem mais enriquecedor e crítico.

No próximo capítulo apresentaremos as conclusões.

Capítulo 5

Conclusões

Visto que o ensino da física nas escolas é quase que completamente voltado para o ensino da física newtoniana, os alunos acabam passando todo o ensino médio sem ter um bom contato com a física moderna. Um dos empecilhos para a inserção de tópicos de física moderna no ensino médio das escolas, é que os professores e até mesmo os alunos têm uma impressão que os temas são extremamente complicados e os conceitos difíceis demais para serem aprendidos no âmbito escolar.

Após os resultados aferidos neste trabalho, é notório que é possível abordar temas mais complexos de uma forma que os alunos consigam entender conceitos que estão tão presentes no cotidiano das pessoas, como os Raios-X, por exemplo, que são amplamente utilizados na medicina para ajudar toda a população. Outro tema bastante “esquecido” é o efeito Compton (ou espalhamento Compton), que é um avanço imenso na teoria corpuscular da luz e contribuiu para o entendimento da luz.

Durante as aulas, tanto os alunos quanto o professor que estava presente demonstraram que gostaram dos temas propostos. Em particular, os alunos interagiram e conseguiram ligar os tópicos com outros assuntos, aperfeiçoando o processo de construção do conhecimento.

Assim, a proposta deste trabalho é de fato, encorajar os professores a abordarem esses temas no ensino médio, seja por meio de aulas, palestras, oficinas, jogos, simuladores, etc.

Uma forma de melhorar este trabalho e as informações contidas nele, seria aumentar o tamanho do questionário, o que nos daria um pouco mais de informação sobre a compreensão dos alunos acerca dos assuntos abordados na aula. O uso de simuladores para o efeito Compton e até para a produção de Raios-X, também é uma ótima forma de aperfeiçoamento, já que deixaria os assuntos um pouco menos abstrato. Infelizmente os simuladores existentes estão em inglês o que pode gerar

uma dificuldade a mais para os alunos, como por exemplo o simulador a seguir:
<https://demonstrations.wolfram.com/ComptonEffect/>.

Outra forma de aprendizagem que vem ganhando muita força ultimamente é a gamificação, onde os professores procuram ensinar conceitos através de jogos, isso seria uma ótima forma de abordar assuntos mais complexos com os alunos, como os temas apresentados aqui.

Com tudo isto em mente, chegamos à conclusão que existem várias formas de se abordar tópicos de física moderna no ensino médio, e que os alunos se interessam e conseguem construir um processo de aprendizagem significativa.

Bibliografia

[Alvarenga, 2008] ALVARENGA, Luciano. Introdução à Física Moderna no Ensino Médio Através da Discussão do Dualismo Onda-Partícula. Porto Alegre – RS. 2008. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/19103>. Acesso em: 09 de nov. 2021.

[Eisberg, 1979] EISBERG, Robert; REISNICK, Robert. Física Quântica. Tradução de Paulo Costa Ribeiro, Enio Frota da Silveira de Marta Feijó Barroso, Rio de Janeiro: Elsevier, 1979 – 28ª reimpressão.

[Estudanteradiologico, 2016] Estudanteradiologico. Disponível em: <http://estudanteradiologico.blogspot.com/>. Acesso em 06 de outubro de 2021.

[Ferreira, 2007] FERREIRA, Fábio, MIRANDA, Deise, SCOFANO, Reuber. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 29, n. 3, p. 447-454, 2007.

[Martins, 1998] MARTINS, Roberto. A Descoberta dos Raios X: Primeiro Comunicado de Röntgen. Revista Brasileira de Ensino de Física, volume 20, páginas 373-91. 1998.

[Palandi, 2010] PALANDI, Joecir, BALDEZ, Dartanhan, CARLOS, João, ROBERTO, Paulo. Física Moderna. Santa Maria – RS. 2010.

[Rita, 2016] RITA, Ana, COELHO, Luis, BERTOLAMI, Orfeu, ANDRÉ, Ricardo. Luz: História, Natureza e Aplicações. Gazeta de Física, Lisboa – Portugal, Vol. 39, n. 1/2, p. 7-13, julho, 2016.

[Tipler, 2019] TIPLER, Paul; MOSCA, Gene. Física para Cientistas e Engenheiros, vol. 2: Eletricidade, magnetismo e óptica. 6ª edição; Tradução e revisão técnica Naira Maria Balzaretta, Rio de Janeiro: LTC, 2019.

[Tipler, 2013] TIPLER, Paul. LLEWELLYN, Ralph. Física Moderna. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Apêndice I

Apostila de Raios-X e Efeito Compton

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

Raios-X e Efeito Compton

Bruno da Silva Ramos

Recife

2021

Sumário

Introdução.....	2
Raios X	3
Descoberta dos Raios X	3
O que são os Raios X?	4
Difração dos Raios-X.....	6
Efeito Compton	7
Experiência de Compton	7
Referências.....	11

Introdução

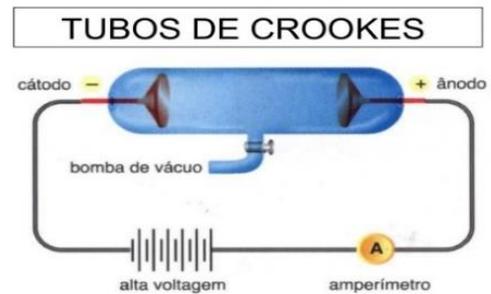
Durante muito tempo existia uma dúvida sobre a natureza das ondas eletromagnéticas, já que ela apresentava propriedades tanto de partículas como de ondas. Essa discussão perdurou durante anos, até que em 1895, um físico descobriu um novo espectro eletromagnético, os Raios-X. Espectro esse que é deveras importante, já que com ele é possível realizar radiologias, radioterapia, etc.

A descoberta dos Raios-X trouxe consigo diversas observações um tanto quanto inusitadas, uma delas foi que os Raios-X difratados tinham menor poder de penetração do que os feixes incidentes, essa observação deu margem para várias ideias e explicações, porém, foi Compton quem conseguiu explicar esse fenômeno que até então, a física clássica não conseguia. Compton, não só conseguiu explicar o que era observado na difração dos Raios-X, como também conseguiu provar com maestria, a natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas, através de experimentos. Isto ficou conhecido como efeito Compton (Tipler, 2013).

Raios X

Descoberta dos Raios X

Foi o físico alemão Wilhelm C. Roentgen, em 1895, quem descobriu os Raios X, durante umas das suas experiências com o tubo de Crookes, onde elétrons eram acelerados devido a uma grande diferença de potencial aplicado ao tubo, como podemos ver na Figura 1. Esses elétrons acelerados se chocavam com algum material colocado em sua extremidade ou com o próprio vidro do tubo.



11

Figura 1: Esquema do Tubo de Crookes, ao qual foi utilizado para a descoberta dos Raios-X. (Estudanteradiologic, 2016).

Roentgen observou que alguns raios eram produzidos devido às colisões dos elétrons. Esses raios não sofriam quaisquer alterações vinda de campos magnéticos, atravessavam alguns materiais, causavam fluorescência, e queimavam filmes fotográficos. Por conta dessas propriedades estranhas, o físico deu aos raios o nome que conhecemos até hoje, os Raios-X. Outro fato estranho sobre estes recém descobertos Raios-X, foi que Roentgen não conseguiu observar refração ou interferência, que são fenômenos associados as ondas.

Em uma entrevista que Roentgen participou na época da descoberta, ele afirmou não saber muito a respeito dos raios. Ele apenas sabia que era algo nunca visto antes, e estava decidido a estudar mais sobre eles (Martins, 1998). Durante as pesquisas, ele notou que os raios encontravam certa dificuldade para atravessar materiais que eram compostos por substâncias de átomos mais pesados. Foi desta observação que as radiografias que nós temos hoje em dia vieram, sendo o próprio Roentgen a pessoa quem fez a primeira radiografia da história. Ele pediu para que sua esposa colocasse a mão entre a fonte dos Raios-X e um anteparo, e o resultado disso nós podemos ver na Figura 2, que mostra a radiografia dos ossos da mão da sua esposa, com uma mancha em um dos dedos devido ao anel que ela usava. A radiografia não foi a única forma de uso dos Raios-X para ajudar as pessoas, uma outra forma de usá-los foi com a radioterapia, onde com o uso destes raios, é possível tratar pessoas com câncer.

Os Raios-X não demoraram para ser utilizados para ajudar as pessoas, na verdade, essa foi a descoberta que teve o tempo mais curto entre a descoberta e a sua aplicação. Você pode aprender mais sobre esse ocorrido no vídeo do Ciência Todo Dia, onde é amplamente detalhado este assunto.



Figura 2: Radiografia da mão da esposa de Roentgen. (Estudanteradiologic)

O que são os Raios X?

Os Raios X são ondas eletromagnéticas, e como outros tipos, estes pertencem ao espectro eletromagnético (Figura 3). Geralmente eles têm um comprimento de onda (λ) na faixa de $0,01 \sim 0,1 \text{ nm}$ ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) e por isto está entre os raios gama e o ultravioleta no espectro (Tipler, 2013).

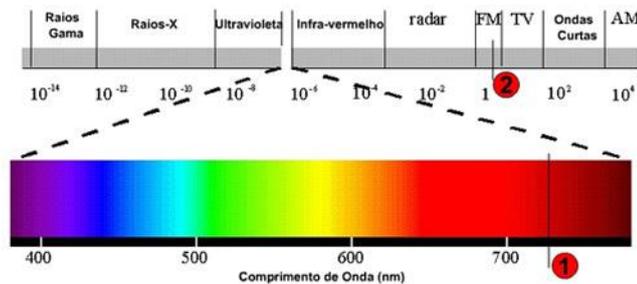


Figura 3: Espectro Eletromagnético (Cbioinfo, 2021)

Por ser uma onda, os Raios X têm, além de um comprimento de onda associado a ele, uma frequência (f). Além disso, se propagam em linha reta assim como a luz visível e tem uma amplitude de vibração (A). Podemos ver o gráfico de uma onda na Figura 4.

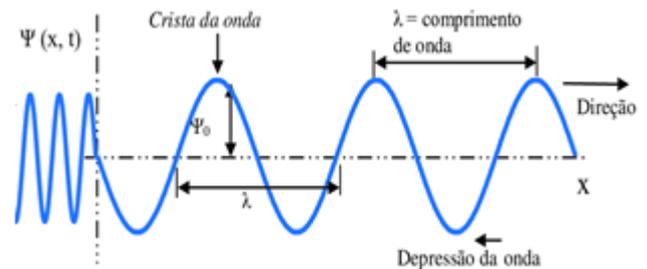


Figura 4: Características de uma onda (Alberto, 2017)

Mas como os Raios-X surgem? Eles são produzidos pela desaceleração dos elétrons ao colidirem com algum material. Esse tipo de radiação é chamado de radiação de *Bremsstrahlung*, onde a própria palavra de origem alemã nos diz que é uma radiação devida à desaceleração de uma partícula carregada já que *Brems*, do alemão quer dizer frear e *Strahlung*, radiação (Tipler, 2013).

Os elétrons dentro do tubo são acelerados devido a diferença de potencial aplicada ao mesmo, essa diferença é da ordem de KeV ($1 \text{ eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Quando os elétrons interagem com os átomos da matéria ao qual colidem, a força Coulombiana surge e causa uma força resultante no elétron. Essa força de repulsão provoca uma desaceleração no elétron, e por consequência disto, ele emite um fóton (Figura 5).

Como a massa do núcleo é muito maior que a massa do elétron incidente, a energia que o núcleo absorve durante a

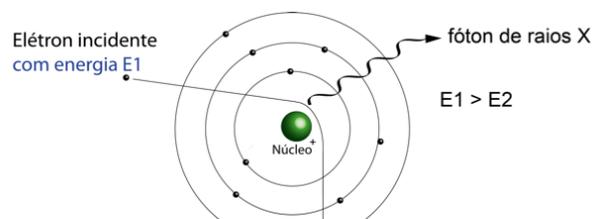


Figura 5: Esquema da irradiação de Raios-X. (Estudanteradiologico, 2016)

“colisão” pode ser desprezada, logo, a energia do fóton emitido vai ser igual a variação de energia cinética do elétron.

Seja K a energia cinética do elétron antes da interação e K' , a energia cinética após a colisão, então temos (Eisberg, 1979):

$$K - K' = E_{fóton}. \quad (1)$$

A energia do fóton, segundo Einstein, pode ser obtida através da sua frequência:

$$E_{fóton} = hf, \quad (2)$$

onde, h é a constante de Planck e f é a sua frequência, porém, a frequência de uma onda também pode ser escrita em função do seu comprimento de onda, como $f = \frac{c}{\lambda}$, onde c é a velocidade da onda (no caso das ondas eletromagnéticas, é a velocidade da luz de aproximadamente $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ no vácuo). Usando a equação (2) na equação (1) e substituindo a frequência, a equação (1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$K - K' = hf \text{ ou} \\ K - K' = \frac{hc}{\lambda}. \quad (3)$$

Explicitando λ em (3):

$$\lambda = \frac{hc}{K - K'}, \quad (4)$$

podemos notar que existe um comprimento de onda mínimo que é emitido durante as colisões. Esse comprimento corresponde ao caso onde o elétron perde toda a sua energia cinética ($K' = 0$) após a colisão:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{K}. \quad (5)$$

Exemplo 1.1: Determine a constante de Planck \hbar sabendo que o comprimento de onda mínimo irradiado é $3,11 \cdot 10^{-11} m$, quando os elétrons estão sendo acelerados por uma diferença de potencial de $40,0 KeV$.

De (5), nós tiramos que:

$h = \frac{\lambda_{min}K}{c}$, como K é a energia adquirida pelo elétron, devido a diferença de potencial, nós podemos escrever como $K = eV$. Logo, $h = \frac{\lambda_{min}eV}{c}$.

Como nós queremos \hbar , basta dividirmos h por 2π . Então, $\hbar = \frac{\lambda_{min}eV}{c2\pi}$.

$$\hbar = \frac{3,11 \cdot 10^{-11} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \cdot 4,00 \cdot 10^4}{3,00 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 3,14} \\ \hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} J \cdot s.$$

Vale lembrar, que o elétron na maioria dos casos só irá parar (perder toda sua energia cinética) após várias colisões. Isso quer dizer que os Raios-X que são emitidos não tem um comprimento de onda específico. Logo, são emitidos raios com comprimento de onda que variam de λ_{min} até infinito. Esse é o chamado espectro contínuo de emissão dos Raios-X, já que se é observado um número infinito de comprimentos de ondas no Raio-X emitido.

O espectro contínuo dos Raios-X provenientes da frenagem dos elétrons, não é o único espectro emitido. Existe, também, um espectro discreto que é emitido junto com o contínuo, porém, o espectro discreto depende do material com qual os elétrons estão colidindo. O espectro discreto não será tratado nesta apostila.

Difração dos Raios-X

A difração é um fenômeno associado às ondas. Nela, é possível ver um máximo central de intensidade e vários máximos secundários, de intensidade cada vez menor à medida que se afasta do centro. Na Figura 6, podemos ver que assim como na interferência, na difração também é possível ver os mínimos causados pela interferência totalmente destrutiva. Os mínimos no padrão de difração são vistos em pontos específicos, dados pela seguinte equação (Tipler, 2013):

$$\text{sen}(\theta_m) = m \frac{\lambda}{a}, \text{ onde } m = 1, 2, 3, 4, \dots, \quad (6)$$

onde, a é a abertura da fenda, θ é o ângulo associado ao mínimo em questão e λ é o comprimento de onda da onda incidente na fenda.

Observe que se fizermos $a \gg \lambda$ na equação (6), o ângulo $\theta \rightarrow 0$, o que torna difícil de se visualizar o fenômeno de difração, já que os Raios-X tem um comprimento de onda da ordem de 1 \AA (10^{-10} m). Logo, para obter o padrão de difração dos Raios-X é preciso que a fenda pelo qual os feixes irão passar seja dessa mesma ordem de grandeza, este fato foi o complicador para a observação de tal fenômeno.

Algum tempo depois da descoberta dos Raios-X, W. L. Bragg observou que o comprimento de onda dos Raios-X era da mesma ordem de grandeza do espaçamento dos átomos dos cristais. Foi então que ele propôs o estudo da difração dos Raios-X utilizando os cristais como uma rede de difração.

O experimento de Bragg, Figura 7, foi o seguinte: ele incidiu um feixe de Raios-X, provenientes de um tubo de raios catódicos, em um cristal. Os Raios-X difratados eram, por sua vez, detectados por uma câmara de ionização.

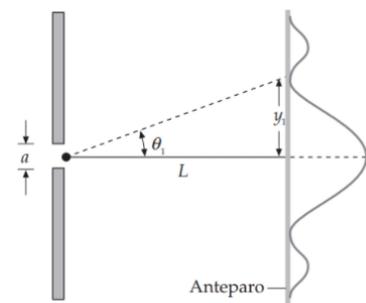


Figura 6: Esquema para a difração de ondas (Tipler, 2013)

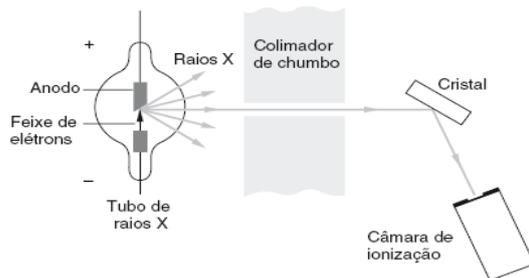


Figura 7: Esquema da experiência de Bragg para observar a difração dos Raios-X. (Tipler, 2013)

Na experiência de Bragg, realizada em um cristal de NaCl (Figura 8), existem planos de átomos. Ele supôs que os raios que fossem difratados com um mesmo ângulo de incidência, pelos átomos de planos paralelos, como podemos ver na Figura 9, só estariam em fase (interferência construtiva) se a diferença de distância percorrida pelos dois raios fossem um múltiplo inteiro do comprimento de onda do raio incidente (Tipler, 2013):

$$2d \sin(\theta) = m\lambda \text{ onde } m = 1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

Efeito Compton

Experiência de Compton

Na difração dos Raios-X foi observado um resultado que fugia do que era esperado pela física clássica. Era previsto, que o elétron excitado por um feixe, somente iria emitir ondas com intensidade correspondente ao comprimento de onda do feixe incidente (λ), o que não correspondia às observações experimentais. Durante o experimento que comprovou a natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas, Compton observou que a radiação que era irradiada pelos elétrons excitados tinha dois comprimentos de ondas predominantes, um era igual ao comprimento de onda incidente λ , e o outro era maior por um fator de $\Delta\lambda$ ($\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$).

Esse fenômeno não podia ser explicado pela teoria de ondas eletromagnéticas utilizada até então, e para poder explicá-lo, Compton considerou que o feixe não era uma onda, mas sim, um conjunto de fótons (partículas), cada um deles com uma energia determinada ($E = hf$).

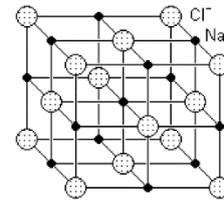


Figura 8: Estrutura de um cristal de NaCl. (Paladi, 2010)

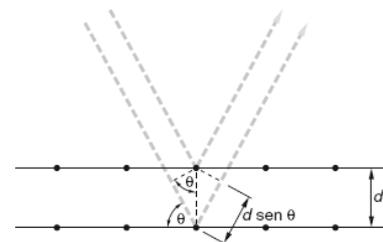


Figura 7: Difração dos Raios-X pelos planos paralelos dos cristais de NaCl. (Tipler, 2013)

A hipótese foi que os fótons colidem com os elétrons livres do material alvo, assim como em um jogo de bilhar as bolas colidem umas com as outras. No efeito Compton, o fóton colide com o elétron, transferindo parte de sua energia para ele e depois sendo espalhado com um ângulo de espalhamento θ (Figura 10). Como resultado foi observado que esse fóton espalhado tem um comprimento de onda maior, ou igual ao comprimento de onda dos fótons incidentes.

Como não existe forças externas atuando na colisão (ou elas são desprezíveis), o momento se conserva. Seja p_1 o momento do fóton antes da colisão, p_2 o momento após a colisão e p_e o momento do elétron após a colisão, nós podemos escrever as equações de conservação do momento relação ao eixo x e ao eixo y respectivamente como (Eisberg, 1979):

$$p_1 = p_2 \cos \theta + p_e \cos \phi \quad \text{e} \quad (8)$$

$$p_2 \sin \theta = p_e \sin \phi, \quad (9)$$

elevando ao quadrado, chegamos em:

$$(p_1 - p_2 \cos \theta)^2 = p_e^2 \cos^2 \phi \quad \text{e} \quad (10)$$

$$p_2^2 \sin^2 \theta = p_e^2 \sin^2 \phi, \quad (11)$$

somando

$$p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta = p_e^2. \quad (12)$$

Como não há forças dissipativas a energia do sistema se conserva. A energia do elétron tem que ser calculada pela energia relativística (Eisberg, 1979):

$$E_e^2 = c^2p^2 + (m_0c^2)^2, \quad (13)$$

onde m_0 é a sua massa de repouso e p é o seu momento. Antes da colisão o elétron está em repouso e portando o seu momento é nulo, logo sua energia antes da colisão é $E_e = m_0c^2$.

A conservação de energia do sistema nos diz que:

$$E_{f(incidente)} + E_{e(repouso)} = E_{f(espalhado)} + E_e. \quad (14)$$

Como o fóton não tem massa de repouso, sua energia é puramente cinética e pode ser obtida pela equação (13) se fizermos $m_{0(fóton)} = 0$, o que resulta em:

$$E_f = cp, \quad (15)$$

e da equação (13), nós tiramos que a energia do elétron após a colisão é $E_e = \sqrt{c^2p_e^2 + (m_0c^2)^2}$, com essas informações e tomando que $E_{f(incidente)} = cp_1$, $E_{f(espalhado)} = cp_2$, nós podemos reescrever a equação (14) da seguinte forma:

$$p_1c + m_0c^2 = p_2c + \sqrt{p_e^2c^2 + m_0^2c^4}, \quad (16)$$

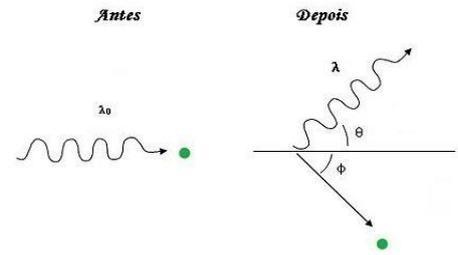


Figura 8: Efeito de espalhamento do fóton, antes e depois da colisão com o elétron. (Wikipédia, 2021)

arrumando, nós temos:

$$p_1c - p_2c + m_0c^2 = \sqrt{p_e^2c^2 + m_0^2c^4}, \quad (17)$$

elevando ao quadrado temos:

$$p_1^2c^2 + p_2^2c^2 + 2p_1m_0c^3 - 2p_1p_2c^2 - 2p_2m_0c^3 + m_0^2c^4 = p_e^2c^2 + m_0^2c^4, \quad (18)$$

arrumando e dividindo tudo por c^2 chegamos em:

$$p_1^2 + p_2^2 + 2p_1m_0c - 2p_2m_0c - 2p_1p_2 = p_e^2, \quad (19)$$

agora substituindo o valor de p_e^2 da expressão anterior em (12), nós ficamos com:

$$p_1^2 + p_2^2 + 2p_1m_0c - 2p_2m_0c - 2p_1p_2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta \quad (20)$$

rearranjando:

$$2p_1m_0c - 2p_2m_0c = 2p_1p_2 - 2p_1p_2 \cos \theta, \quad (21)$$

Daí dividindo tudo por $2p_1p_2m_0c$ ficamos com:

$$\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{m_0c} (1 - \cos \theta). \quad (22)$$

Dá equação (15) nós podemos escrever o momento do fóton como $p = \frac{E}{c}$, onde $E = hf$ e $f = \frac{c}{\lambda}$, logo o momento também pode ser escrito como $p = \frac{h}{\lambda}$ (Tipler, 2013). Substituindo em (22):

$$\frac{1}{\frac{h}{\lambda_2}} - \frac{1}{\frac{h}{\lambda_1}} = \frac{1}{m_0c} (1 - \cos \theta), \quad (23)$$

rearranjando:

$$\frac{\lambda_2}{h} - \frac{\lambda_1}{h} = \frac{1}{m_0c} (1 - \cos \theta), \quad (24)$$

assim:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta) \text{ ou} \quad (25)$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta), \quad (26)$$

onde $\Delta\lambda$ que é chamado de *deslocamento de Compton*, depende apenas do ângulo do espalhamento θ . O h é a constante de Planck. O termo $\frac{h}{m_0c}$ É chamado de *comprimento de onda Compton do elétron* e é igual a 0,00243 nm (Tipler, 2013).

Exemplo 2.1: Em um certo experimento de espalhamento de Compton, observa-se que o comprimento de onda λ_1 da radiação incidente sofre um deslocamento de 1,5% para um ângulo de espalhamento $\theta = 120^\circ$. A) Qual é o valor de λ_1 ? B) Qual é o comprimento de onda λ_2 do fóton espalhado para um ângulo de espalhamento de 75° ?

A) Como o comprimento de onda λ_1 sofre um deslocamento de 1,5%, nós podemos escrever a seguinte relação:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = 0,015, \text{ onde } \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos 180^\circ).$$

Logo,

$$\frac{\frac{h}{m_0c} (1 - \cos 180^\circ)}{\lambda_1} = 0,015$$

Substituindo o comprimento de onda Compton para o elétron pelo seu valor de 0,00243 nm.

$$\frac{0,00243(1 - \cos 180^\circ)}{\lambda_1} = 0,015$$

Explicitando λ_1 , nós chegamos a:

$$\lambda_1 = 0,243 \text{ nm}$$

B) Da equação de Compton, nós temos que:

$$\lambda_2 = \lambda_1 + 0,00243(1 - \cos 75^\circ)$$

Substituindo o valor de $\lambda_1 = 0,243 \text{ nm}$, nós chegamos a $\lambda_2 = 0,245 \text{ nm}$.

Referências

[Alberto, 2017] ALBERTO, Juan. **Ondas**. Researchgate. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Representacao-esquemática-da-voz-por-uma-onda-mecânica-sonora-mostrando-suas-principais_fig3_318277075. Acesso em 06 de outubro de 2021.

[Ccbioinfo, 2021] CC BIOINFO. **Espectro Eletromagnéticos**. Bioinfo – Casa da Ciência. Disponível em: <https://bioinformaticacc.wordpress.com/2012/05/31/espectro-eletromagnetico/>. Acesso em 06 de outubro de 2021.

[Dias, 2019] DIAS, Fabiana. "**Difração**"; *Educa Mais Brasil*. Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/difracao>. Acesso em 30 de setembro de 2021.

[Eisberg, 1979] EISBERG, Robert, REISNICK, Robert. **Física Quântica**. Tradução de Paulo Costa Ribeiro, Enio frota da Silveira de Marta Feijó Barroso, Rio de Janeiro: Elsevier, 1979 – 28ª reimpressão.

[Estudanteradiologico, 2016] Estudanteradiologico. Disponível em: <http://estudanteradiologico.blogspot.com/>. Acesso em 06 de outubro de 2021.

[Júnior, 2021] JÚNIOR, Joab Silas da Silva. "**O que são fótons?**"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-sao-fotons.htm>. Acesso em 30 de setembro de 2021.

[Martins, 1998] MARTINS, Roberto. **A Descoberta dos Raios X: Primeiro Comunicado de Röntgen**. Revista Brasileira de Ensino de Física, volume 20, páginas 373-91. 1998.

[Palandi, 2010] PALANDI, Joecir, BALDEZ, Dartanhan, CARLOS, João, ROBERTO, Paulo. **Física Moderna**. Santa Maria – RS. 2010.

[Tipler, 2013] TIPLER, Paul. LLEWELLYN, Ralph. **Física Moderna**. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

[Wikipédia, 2021] Wikipédia, Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Compton. Acesso em 06 de outubro de 2021.

Apêndice II

Questionário

Questões

Instruções:

- 1- Dedique um tempo para responder as questões.
- 2- Não copie as respostas dos seus colegas.
- 3- Se não souber a questão deixe-a em branco.

O que são os Raios-X? Cite algumas de suas aplicações.

Sua resposta _____

Porquê era tão difícil de ser observada a difração dos Raios-X?

Sua resposta _____

Qual foi a hipótese de Compton para explicar a diferença no comprimento de onda observado nos Raios-X difratados?

Sua resposta _____

O deslocamento de Compton depende do comprimento de onda do feixe de Raios-X incidente? Justifique.

Sua resposta _____

Qual é deslocamento Compton para um ângulo de espalhamento de 90° ?
Dados: $h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$, $m_0 = 9.10938356(11) \times 10^{-31} \text{ kg}$ e $c = 300\,000\,000 \text{ m/s}$

Sua resposta _____

Apêndice III

Vídeos Utilizados na Apostila

Vídeo retirado do canal do *Youtube* chamado “Ciência Todo Dia”. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=WJwiBpX1QnQ&t=5s>

Vídeo retirado do canal do *Youtube* chamado “TecRadio Estudos em Radiologia”. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=lsTHClvBybU>