



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA



A LINGUAGEM E O ENSINO CONCEITUAL DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO MÉDIO

Rafael Filgueira Pimentel

Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho

MNPEF

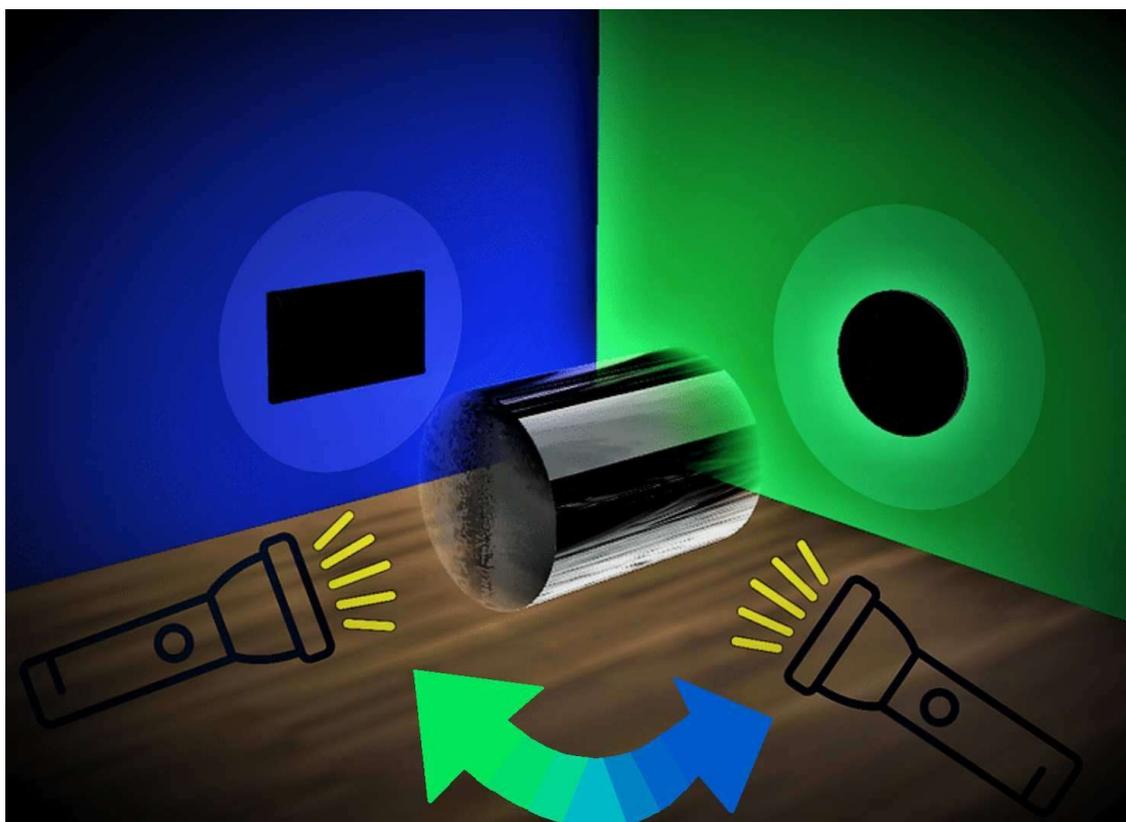
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



É livre a reprodução exclusivamente para fins não comerciais, desde que a fonte seja citada.

**A LINGUAGEM E O ENSINO CONCEITUAL DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA
NO ENSINO MÉDIO**

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL



RAFAEL FILGUEIRA PIMENTEL

**A LINGUAGEM E O ENSINO CONCEITUAL DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA
NO ENSINO MÉDIO**

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL

Produto educacional apresentado à Universidade Federal de Viçosa e a Sociedade Brasileira de Física como parte das exigências do Programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

Orientador: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho

VIÇOSA - MINAS GERAIS

2022

SUMÁRIO

Apêndice A	04
Produto Educacional	04
A.1 Primeira aula	05
A.2 Segunda aula	12
A.3 Atividades Propostas	17
A.4 Analogia mecânica à interpretação Dualista Realista	19

Apêndice A

Produto Educacional

Prezado(a) Professor(a).

Esse é um produto educacional desenvolvido como parte das exigências do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. Apresentaremos uma sequência didática que contém uma introdução aos conceitos do ensino da Física Quântica para o terceiro ano do Ensino Médio. A abordagem didática utilizada neste produto educacional busca delinear o conceito dual onda-partícula a partir de sua evolução histórica e de argumentos fenomenológicos, exibir as duas facetas do fóton e do elétron, conduzindo uma argumentação no sentido de estimular a discussão em torno dos objetos clássicos (onda, partícula), e de objetos quânticos (fótons, elétrons) e possibilitar a desativação da contradição lógica associada a natureza dual do objeto quântico, uma vez que, o ensino da Física Quântica usando-se uma abordagem dual (tal como o conceito “dualidade onda-partícula”) suscita uma inconsistência lógica capaz de dificultar a construção conceitual do objeto quântico pois, envolve a ideia de unir em uma única entidade dois objetos clássicos distintos e dispares, onda e partícula.

Esta sequência didática tem seu suporte pedagógico alicerçado na teoria da mediação de Vygotsky, que considera a linguagem um instrumento capaz de exercer influência no construção do pensamento por meio da interiorização do diálogo que o indivíduo estabelece com o meio. (VYGOTSKY, 2001; VYGOTSKY, 2007). Na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, em que o indivíduo organiza o conhecimento de forma ordenada e hierarquizada, formando uma rede conceitual em sua mente, onde para atribuir significados a novos conhecimentos, ele parte de conceitos já estabelecidos em sua estrutura cognitiva. (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980). E está estruturada nos momentos pedagógicos desenvolvidos por Delizoicov e Angotti (problematização inicial, organização do conhecimento, aplicação do conhecimento).

(DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994).

O produto educacional está composto de uma sequência didática dividida em duas aulas de 50 minutos cada, desenvolvidas na linguagem multimídia, em torno de experimentos exibidos em vídeos de curta duração, imagens, animações e simulações computacionais. Todo o material está disponibilizado em uma página na internet no seguinte endereço eletrônico:

<<https://rafaelpimentell.wixsite.com/website>>

A.1 Primeira aula

Tempo previsto:

Uma aula de 50 minutos.

Objetivos:

Ao final desta aula, o aluno deverá ser capaz de:

- Analisar e interpretar experimentos Físicos;
- Conhecer os argumentos de Newton e Huygens para os comportamentos da luz;
- Relembrar o experimento de dupla fenda de Young;
- Conhecer o formalismo básico que descrevem as ondas eletromagnéticas;
- Compreender o funcionamento do Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder - IVMZ;
- Compreender o efeito fotoelétrico;
- Compreender o efeito Compton;
- Perceber o desenvolvimento histórico da ciência com respeito a construção do conceito da “dualidade onda-partícula”;
- Compreender o problema gerador ao conceito dual onda-partícula.

Desenvolvimento:

A sequência didática está dividida em três momentos: problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. A primeira aula será quase que inteiramente

dedicada ao primeiro momento, mas possuirá também elementos que possibilitem organizar o conhecimento. Desse modo, uma transição suave para a segunda aula será natural, construindo-se os segundo e o terceiro momentos.

A problematização inicial terá como foco a construção do problema gerador ao conceito da “dualidade onda-partícula”, fazendo-se recortes de seguimentos históricos do seu desenvolvimento. A construção desse problema gerador se dará ao longo de toda a primeira aula à medida que argumentos e experimentos forem sendo apresentados e discutidos. Esse primeiro momento tem por objetivo chamar a atenção do aluno ao tema, despertar curiosidades e gerar pequenos debates entre os pares da turma sobre as argumentações levantadas.

Inicia-se a discussão histórica com os estudos da óptica entre o final do século XVII e início do século XVIII pautado pelas teorias de Isaac Newton (1642-1727) e de Christiaan Huygens (1629-1695) que, na perspectiva da mecânica clássica, defenderam teorias distintas com respeito as propriedades da luz. Ambas exitosas em escrever os fenômenos de reflexão e da refração para a luz. Nesse ponto, o professor pode gerar uma discussão inicial para identificar quais alunos são mais adeptos aos argumentos de Newton e quais mais inclinados aos argumentos de Huygens, e assim, guiar um debate entre as ideias para que os alunos defendam seus pontos de vista. Enfatizando que as teorias corpuscular e ondulatória atribuídas, respectivamente, a Newton e a Huygens, ficou a cargo de seus seguidores ao longo das décadas posteriores às publicações das ideias destes pensadores, e não um embate das teorias entre eles efetivamente.

Na sequência, numa abordagem para se consolidar o problema gerador, apresentam-se outros acontecimentos da história da ciência, como, resultados experimentais da interferência luminosa num aparato de dupla fenda, inicialmente realizado por Thomas Young (1773-1829), e o experimento de interferência da luz por fendas circulares, inicialmente realizado por Augustin Jean Fresnel (1788-1827). A partir daí, o aluno será levado a argumentos que beneficiaram uma interpretação ondulatória para a luz. Com uma breve discussão sobre o formalismo para as ondas eletromagnéticas organizados por James Clerk Maxwell (1831 - 1879) o aluno terá ainda mais evidências que corroboram um tratamento ondulatório para a luz.

Elaboramos um vídeo com o experimento de interferência da luz por fenda circular, onde utilizamos um laser, um suporte de isopor, uma chapa metálica com um pequeno furo circular e uma parede branca como anteparo de observação. O experimento consiste em fixar o laser e a chapa metálica usando a placa de isopor como suporte, colocar este aparato disposto uma certa distância da tela de observação e fazer incidir a luz do laser sobre o furo circular na chapa

Figura 33 – Seleção de alguns Slides que compõem a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Newton e Huygens

- No século XVII o estudo da óptica foi pautado pelas teorias de Isaac Newton (1642-1727-Inglaterra) e de Christiaan Huygens (1629-1695-Holanda) que defenderam teorias distintas com respeito as propriedades da luz. Ambas conseguiram descrever os fenômenos de reflexão e da refração para a luz.
- Seguidores de Newton defendiam um caráter **CORPUSCULAR** para a luz:

“Que a luz é um corpo, aparece de sua reflexão, refração, composição, divisão, e seu movimento no tempo; mas especialmente por ser propagada em linhas retas, e por ser parada por um obstáculo (o quão fino for, se não transparente), o que mostra que ela não pode ser uma ação sobre o meio, que seria propagada além de um obstáculo, como no caso do som”. [1]
- Seguidores de Huygens defendiam um caráter **ONDULATORIO** para a luz:

“Baseando-se em sua concepção de luz como pulsos não periódicos propagados pelo éter, Huygens foi hábil em construir explicações bastante sofisticadas sobre a refração e a reflexão. Por meio do “princípio de Huygens” (um pulso luminoso gera pulsos secundários à medida que ele se propaga), ele conseguiu derivar o comportamento dos raios de luz nestes dois fenômenos, explicando-os de maneira coerente do ponto de vista geométrico”. [1]

[1] Moura, B.A., Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 111-141, abr. 2016.

UFV – DPF – MNPEF

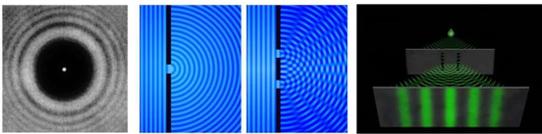
Newton e Huygens

- Se a luz fosse feita de corpúsculos, como essas partículas se cruzariam no ar sem uma atrapalhar o movimento da outra? Isso não poderia estar de acordo com os fenômenos naturais. Podemos enxergar um objeto mesmo com a luz proveniente de inúmeros outros se cruzando pelo ar à nossa frente.
- As ondas na água que passam margeando um obstáculo grande se curvam em direção às águas paradas do outro lado do obstáculo, mas as estrelas fixas deixam de ser vistas quando um planeta fica entre elas e a Terra. Como a luz poderia ser uma onda no éter se ela não contorna os obstáculos como o som e como as ondas na água?

UFV – DPF – MNPEF

Young e Fresnel

- No início do século XIX, os experimentos de interferência da luz em fendas duplas, realizados por Young, ofereceram sustentação à teoria ondulatória da luz.
- Outros experimentos de difração da luz, realizados por Fresnel, também corroboraram uma visão ondulatória da luz.
- Assim, as observações experimentais dos fenômenos de interferência e difração da luz consolidam dentro da comunidade científica da época o modelo ondulatório para a luz.



UFV – DPF – MNPEF

James Maxwell e as ondas luminosas

- Maxwell organizou as relações e leis que descrevem os fenômenos elétricos e magnéticos e, associando argumentos de simetria, formulou um conjunto de equações que levaram o seu nome e que revolucionaram a física, dando surgimento a era do eletromagnetismo.

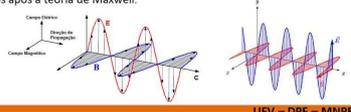
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{a}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$$

- Maxwell foi ainda capaz de demonstrar teoricamente que **A LUZ É UMA ONDA ELETROMAGNÉTICA** que viaja no vácuo com uma velocidade de aproximadamente $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s. A verificação experimental foi realizada por Hertz em 1888, 15 anos após a teoria de Maxwell.



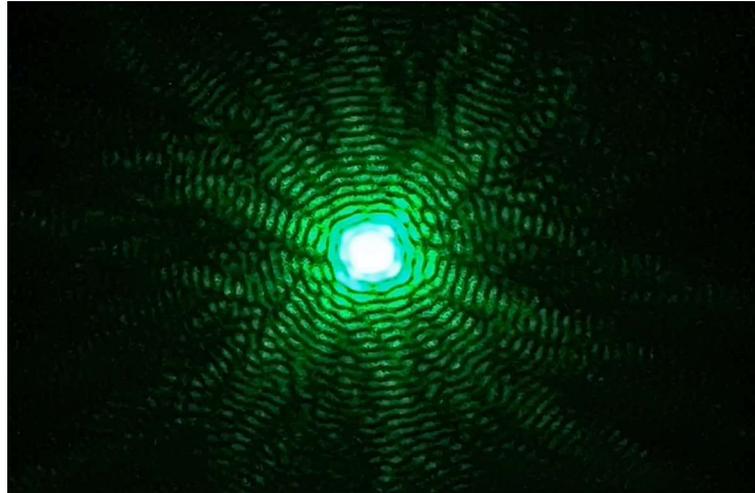
UFV – DPF – MNPEF

Fonte: Elaborada pelo autor.

metálica, de modo a ser projetada luz na parede. Observa-se um padrão de interferência com franjas circulares claras e escuras como mostra a figura 34, uma vez que, o comprimento de onda do laser utilizado é compatível às dimensões do furo na chapa metálica. Um fator relevante para a figura observada é o fato do furo não ser perfeitamente circular e possuir ranhuras devido ao seu processo de fabricação. Cada ranhura contribui com novos padrões de interferência que interferem entre si provocando uma figura resultante de interferência um tanto quanto peculiar, e interessante. A figura 33 apresenta um compilado das ideias tratadas até este ponto.

Uma ferramenta muito útil nas aulas será o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ), uma simulação computacional. O IVMZ permite montar diversos arranjos para estudar fenômenos ópticos, e será um valioso suporte para explorar vários resultados experimentais e testar argumentos teóricos. A simulação é constituída por um par de anteparos, espelhos e divisores de feixe (ou semi-espelhos) além de uma fonte emissora que estão dispostos sobre uma mesa óptica. É possível alterar a visibilidade dos padrões de interferência nos anteparos de observação fazendo ajustes nos parâmetros dos divisores de feixe (modificando-se os coeficientes de reflexão - parâmetros R_1 e R_2 na simulação), e é possível alterar a intensidade luminosa da fonte desde a condição de produzir um feixes contínuo de fótons (laser - regime clássico) até o nível de baixíssima intensidade (emissão de fótons únicos - regime quântico). A figura 35 mostra uma visão geral do IVMZ, além de um arranjo com a máxima intensidade do feixe incidente

Figura 34 – Resultado experimental mostrando um padrão de interferência devido a difração da luz numa fenda circular.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento pode ser consultado em:

<<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>>.

(um laser) sendo possível reproduzir uma figura de interferência análoga a obtida em um experimento de dupla fenda como o realizado por Young, possibilitando a discussão de fenômenos ondulatórios.

Figura 35 – Seleção de alguns Slides que compõem a apresentação da sequência didática apresentando o IVMZ. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

UFV – DPF – MNPEF

Interferência da luz no Interferômetro de Mach-Zehnder

• Análogo a Dupla Fenda:

UFV – DPF – MNPEF

Diferença de caminho óptico

UFV – DPF – MNPEF

Padrão de Interferência

- Os padrões nos anteparos 1 e 2 são complementares entre si. Observe a linha central e compare os dois anteparos;
- Quando ocorre interferência construtiva em uma posição num anteparo, na posição equivalente no outro anteparo ocorre interferência destrutiva, e vice-versa;
- Note que basta uma análise ou abordagem puramente ondulatória para explicar este fenômeno;

UFV – DPF – MNPEF

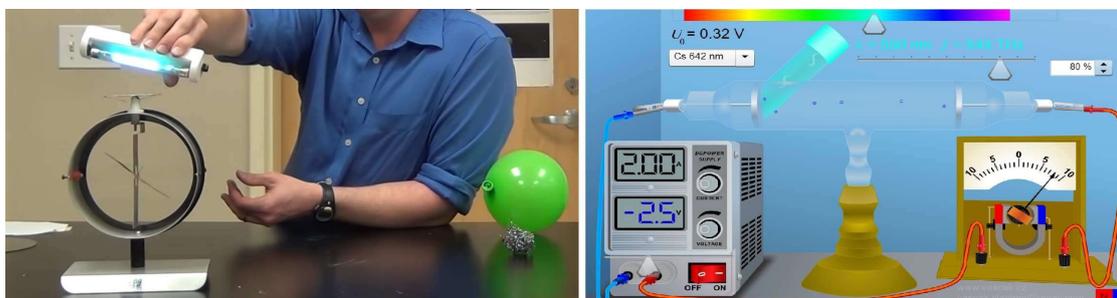
Fonte: Elaborada pelo autor. A simulação computacional do IVMZ está disponível em:

<<http://www.lief.if.ufrgs.br/~cjhc/vmzi.html>>.

Em contraste aos argumentos colocados até então, novas ideias são evidenciadas com a observação experimental por Hertz em 1890 do efeito fotoelétrico, que levou este nome após ser

modelado por Einstein em 1905. Esse efeito é a emissão de elétrons de uma superfície metálica devido à incidência de luz sobre ela. Um vídeo e uma simulação computacional (figura 36) nos auxiliam nessa etapa. O vídeo apresenta um experimento de efeito fotoelétrico onde é utilizado um eletroscópio, uma chapa de zinco, uma lâmpada ultravioleta e materiais para eletrização. Inicialmente acopla-se a placa metálica de zinco ao eletroscópio e na sequência eletriza-se esse sistema, de modo que, por repulsão coulombiana a agulha do eletroscópio é defletida. Então, aproxima-se a luz ultravioleta da superfície da placa de zinco e observa-se que a agulha do eletroscópio volta a sua posição de equilíbrio. Podemos concluir que a radiação incidente foi capaz de provocar a ejeção de elétrons no zinco. Num outro momento do experimento, eletriza-se novamente o sistema com uma fonte de carga diferente, de modo que, a agulha possa defletir. Logo em seguida aproxima-se a luz, porém, agora nada acontece com a agulha que permanece sofrendo ação da repulsão coulombiana. Podemos nesse caso concluir que dessa vez o sistema estava eletrizado positivamente de modo que mesmo que elétrons fossem ejetados do sistema por efeito fotoelétrico, simplesmente, estaria aumentando-se a quantidade de carga positiva no sistema, e por isso a agulha não volta a sua posição de equilíbrio inicial.

Figura 36 – Efeito fotoelétrico.



Fonte: Esquerda: vídeo - <<https://www.youtube.com/watch?v=z-3XaXCvjZw>>. Direita: simulação computacional - <https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=opt_fotoefekt&l=pt>.

A simulação computacional apresenta um conjunto bem completo de arranjos para conduzirmos experimentos sobre o efeito fotoelétrico. Ela permite variar comprimento de onda e amplitude da luz incidente e diferença de potencial entre os terminais do circuito. Permite escolher ainda vários tipos de metais e também a medir uma corrente proveniente da ejeção de elétrons do metal. Com essa simulação é possível analisar que o efeito fotoelétrico não depende da intensidade da luz incidente mas sim do comprimento de onda λ utilizado. Para tal, basta escolher uma configuração, por exemplo, metal césio: para comprimentos de onda maiores que 642 nm, não importa a intensidade do feixe, não ocorre ejeção de elétrons do material, ou seja,

fótons com essa energia ($E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$) não são capazes de vencer a função trabalho ($\varphi = E - K_{max}$) do metal. Mas para valores menores que 642 nm o efeito fotoelétrico ocorre, e nesse caso, uma maior intensidade da luz promove mais ejeções de elétrons, pois, tem-se mais fótons atingindo o material por unidade de tempo, cada um com energia que é suficiente para provocar a ejeção de um elétron.

A simulação também permite analisar que a energia cinética máxima (K_{max}) dos elétrons ejetados da superfície do metal depende exclusivamente do comprimento de onda da radiação incidente. Para isto, devemos variar a diferença de potencial (ddp) no circuito. Por exemplo, metal céσιο, $\lambda = 490$ nm e 100% de intensidade: registra uma corrente nula no amperímetro quando aplicamos 0,7 V nas extremidades do circuito, ou seja, uma ddp de 0,7 V foi capaz de desacelerar os elétrons mais energéticos ejetados do metal. Agora nessa ultima configuração se alteramos o comprimento de onda para 471 nm ou menor surge uma corrente no amperímetro, ou seja, os elétrons ficaram mais energéticos. De todos os experimentos feitos nessa simulação, os resultados levam ao argumento de que a energia radiante é quantizada, transferida em pacotes concentrados e de forma abrupta. Ou seja, a luz é composta de Fótons que são pacotes de energia indivisíveis, não transferem energia aos poucos de forma contínua mas sim aos pacotes, abruptamente.

Figura 37 – Seleção de alguns Slides que compões a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Efeito fotoelétrico

- Em 1905, Einstein ao tentar explicar o efeito fotoelétrico propôs que a energia radiante era quantizada, transferida em pacotes concentrados, que mais tarde vieram a ser chamados **fótons**.



O **FÓTON** entrega energia como fosse uma partícula!?!

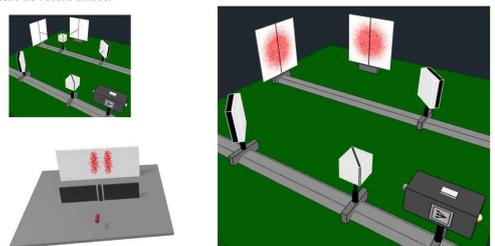
$K_{max} = E - W_0$
 $E = hf = eV_0 + W_0$

https://www.vascak.cz/data/android/physicsschool/template.php?opt_fotoefekt&l=pt

UFV – DPF – MNPEF

Detecção de Fótons

- Emissão de Fótons únicos:

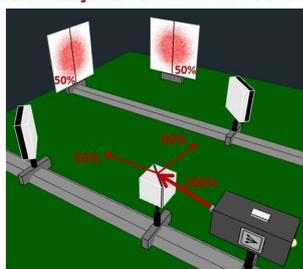


UFV – DPF – MNPEF

Distribuições Pontuais dos Fótons

- Um fóton está inicialmente localizado em um pequeno volume, e permanece localizado à medida que se afasta da fonte com velocidade c ;
- Quando um fóton passa pelo divisor de feixe ele tem 50% de probabilidade de ir para um dos lados;
- Fótons são indivisíveis;

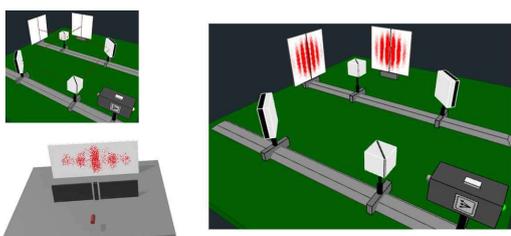
Um Fóton carrega uma quantidade de energia:
 $E = h \cdot f$



UFV – DPF – MNPEF

Interferência e difração de Fótons

- Análogo a Dupla Fenda. Emissão de Fótons únicos:



UFV – DPF – MNPEF

Fonte: Elaborada pelo autor.

Mais uma vez o IVMZ pode ser utilizado para nos auxiliar. A figura 37 apresenta algumas

configurações onde podemos obter uma distribuição aleatória de fótons na tela de observação. Ao utilizarmos um feixe de baixa intensidade, é possível discutir a teoria dos quanta de energia abordados no efeito fotoelétrico. O feixe ao incidir no semi-espelho, 50% dos fótons seguem numa direção e 50% em outra, uma vez que, são indivisíveis. Quando acoplamos os dois semi-espelhos na montagem surge um padrão de interferência nos anteparos de observação que se complementam, ou seja, quando ocorre detecção em uma posição num anteparo, na posição equivalente no outro anteparo não ocorre detecção, e vice-versa. As regiões com maior probabilidade de detecção em cada anteparo formam um ponto de máximo e os de menor detecção pontos de mínimo, que são equivalentes a zonas de interferência, respectivamente, construtiva e destrutiva em figuras de interferência típicas de fenômenos ondulatórios. Com o IVMZ o professor pode instigar os alunos a interpretar os fenômenos observados com relação aos argumentos tratados, como, por exemplo, explicar a formação de um padrão de interferência ou a distribuição aleatória de fótons num anteparo de observação e correlacionar cada um desses com sua respectiva modelagem teórica.

Figura 38 – Seleção de alguns slides que compõem a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Padrão de complementaridade

Efeito Compton (1923)

UFV – DPF – MNPEF **UFV – DPF – MNPEF**

Concepção corpuscular da luz - Efeito Compton

* Em 1923, Compton observa experimentalmente o espalhamento de raios-x por um alvo de grafite. Para explicar esse fenômeno foi preciso ir além do formalismo ondulatório para a radiação eletromagnética. O fenômeno ficou conhecido como efeito Compton.

$E = h\nu$

$P = h/\lambda$

* No artigo "Uma teoria Quântica para o Espalhamento de raios X por elementos leves" Compton escreveu: "A presente teoria depende essencialmente da suposição de que cada elétron que participa do processo espalha um quantum completo (fóton). Isto envolve também a hipótese de que os quanta de radiação vêm de direções definidas e são espalhados em direções definidas. O apoio experimental da teoria indica de forma bastante convincente que um quantum de radiação carrega tanto momento quanto energia".

Efeito Compton

[https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531#:~:text=The%20Compton%20Effect%20model%20simulates,\(photon%2Delectron\)%20scattering.&text=The%20Compton%20Effect%20model%20was,Simulations%20\(EJS\)%20modeling%20tool](https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531#:~:text=The%20Compton%20Effect%20model%20simulates,(photon%2Delectron)%20scattering.&text=The%20Compton%20Effect%20model%20was,Simulations%20(EJS)%20modeling%20tool)

UFV – DPF – MNPEF **UFV – DPF – MNPEF**

Fonte: Elaborada pelo autor. A simulação computacional sobre o efeito Compton pode ser acessada em:

<<https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531#:~:>

[text=The%20Compton%20Effect%20model%20simulates,\(photon%2Delectron\)%20scattering.&text=The%20Compton%20Effect%20model%20was,Simulations%20\(EJS\)%20modeling%20tool](https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=10531#:~:)>.

Pela última montagem no IVMZ temos que os fótons seguem um ou outro caminho até a tela de observação totalizando ao final 100% somados os Fótons de ambos anteparos, sendo que

cada um só pode ser detectado uma única vez. Os fótons pela forma como entregam energia quando interagem com a matéria e não sendo observado meio fóton nos remetem à uma ideia corpuscular. Fica assim, um “gancho” para finalizar a primeira aula, apresentando-se o efeito Compton que fornece sustentação à uma interpretação corpuscular para a luz. Na figura 38 é apresentado um compilado dessas ideias. O experimento de efeito Compton consiste no espalhamento de raios-x por um alvo como, por exemplo, grafite. Uma simulação computacional pode nos ajudar na compreensão e visualização do fenômeno. Nessa simulação pode-se observar que variando o ângulo de detecção da radiação espalhada pelo alvo, o comprimento de onda espalhado não coincide com o comprimento de onda incidente, o que viola a conservação de energia quando considerado a radiação incidente como ondulatória. Porém, entendendo que fótons possuem além de energia, também momento, pode-se imaginar a colisão entre os fótons incidentes e elétrons do alvo como uma colisão entre bolas de bilhar. Dessa forma, a conservação do momento permite compreender o surgimento de um comprimento de onda espalhado que difere do incidente, uma vez que, o fóton perde energia para o elétron na colisão.

Neste ponto o problema gerador ao conceito “dualidade onda-partícula” está completo. A partir de então o professor pode gerar uma discussão com os alunos sobre, por exemplo, o que então é a luz - uma onda? uma partícula? O “gancho” para a próxima aula ficará estabelecido: como abordar, modelar e classificar fenômenos luminosos? O que é a luz?

A.2 Segunda aula

Tempo previsto:

Uma aula de 50 minutos.

Objetivos:

Ao final desta aula, o aluno deverá ser capaz de compreender:

- A necessidade da construção de um formalismo capaz de resolver o problema em questão
 - descrever em sua totalidade o comportamento da luz;
- O conceito de um objeto quântico - o “comportamento dual” não é exclusivo à luz;
- O fenômeno da difração de elétrons;

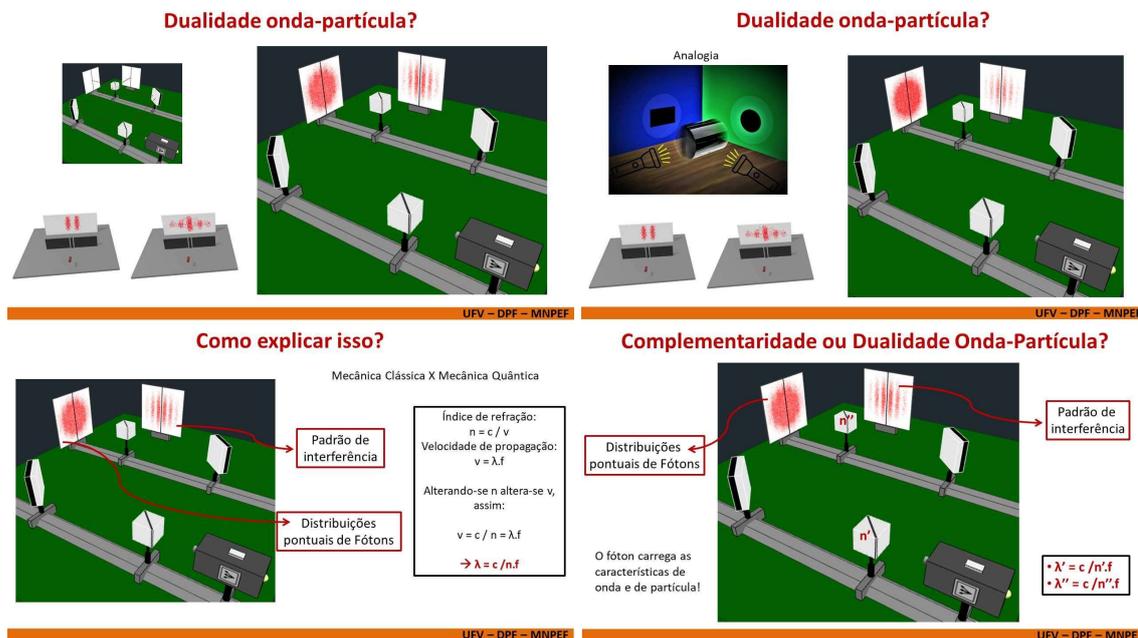
- As características e propriedades de feixes de fótons e feixes de elétrons de baixíssima intensidade;
- Uma abordagem linguística distinta à “dualidade onda-partícula” - *wavicle*, *quantom*, *micropartículas*, dentre outros;
- Algumas interpretações da Física Quântica para a “dualidade onda-partícula”;
- Uma analogia mecânica para a interpretação dualista realista.

Desenvolvimento:

Na segunda aula da sequência didática, é dada continuidade para a organização do conhecimento. Num primeiro momento dessa segunda aula recapitula-se elementos centrais da aula anterior. A apresentação de resultados experimentais do IVMZ em conjunto com uma analogia (figura 39) possibilita fomentar questionamentos acerca da dualidade tal como entendida a partir da mecânica clássica, e questionar os alunos sobre como explicar este resultado tendo em mente inicialmente os argumentos clássicos ondulatórios e corpusculares trabalhados até então. Um objeto clássico não pode ser uma onda e uma partícula. Aborda-se na sequência a ideia da necessidade da construção de um novo formalismo para explicar as observações experimentais em sua totalidade. Assim, um contraste entre a mecânica clássica e o surgimento da teoria quântica para modelar as observações da natureza é apresentado, consolidando a sedimentação dos conceitos e ideias-chaves em análise. Se inicialmente algo se mostra para nós no mundo macroscópico como onda ou partícula é o que se toma como natural por ser intuitivo, pois, é o que se conhece por já ter sido compreendido e modelado pela ciência no nível macroscópico. Ao explorar-se novas escalas percebe-se que as coisas podem fugir a este natural. Pode-se então se questionar que o observado antes poderia ser apenas um caso particular de algo mais geral? ou não? Tais questionamentos levam a despertar ainda mais a curiosidade dos alunos, e corrobora para facilitar a desconstrução de possíveis contradições ou inconsistências lógicas como assumir entidades duais.

O professor pode ainda, iniciar uma discussão sobre o resultado apresentado na figura 39 citando o princípio da complementaridade de Bohr, e então explicar sobre fenômenos intermediários onde os caracteres de onda e de partícula se apresentam simultaneamente, mas de forma parcial, salientando como os padrões observados induzem a uma falsa violação ao princípio da complementaridade. Pois note, por mais que o experimento esteja montado sobre uma mesma

Figura 39 – Seleção de alguns Slides que compõem a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

bancada os resultados experimentais são distintos, em telas de observações distintas, respeitando o princípio da complementaridade - eles não ocorrem simultaneamente numa mesma tela de observação. E ainda a complementaridade proposta por Bohr representa uma situação extrema, onde um caráter ou outro se apresenta plenamente, e não simultaneamente. Assim, a discussão segue para que os estudantes compreendam que fótons carregam consigo aspectos de onda e de partícula, podendo ser nomeados objetos quânticos que possuem propriedades e características a sua maneira que diferem dos objetos clássicos.

Aborda-se em seguida a difração de elétrons e, para tal, elaboramos um vídeo (figura 40), onde é apresentado um experimento deste fenômeno. Este consiste basicamente em gerar um feixe de elétrons que será acelerado para colidir com uma grade de grafite. Nesse processo, os elétrons serão espalhados e numa tela de observação sensível, que é iluminada quando detecta elétrons, forma-se uma figura de interferência com padrões circulares. Como explicar que elétrons espalhados formam um padrão de interferência? Louis de Broglie sugere que elétrons possuem associado a eles uma onda que governa seu movimento. Assim, a figura de interferência tem origem pela difração das ondas que estão associadas aos elétrons na rede cristalina de grafite.

Após a observação e discussão sobre o experimento da difração de elétrons o aluno perceberá que as características e propriedades ondulatórias e corpusculares até então tratadas apenas

Figura 40 – Imagem de um vídeo sobre a difração de elétrons. Esquerda: Montagem do aparato experimental; Direita: resultado experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento pode ser consultado em:
<<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>>.

para a luz não são exclusivas a esta. O professor pode ampliar aqui um debate sobre escalas de grandeza e lançar o questionamento aos alunos se estas propriedades e características podem ou não ser naturais a todos os corpos ou apenas à escala microcós mica.

A partir de então, entendemos que existe uma nova classe de observações que não se enquadram dentro de uma teoria puramente clássica que descrevem uma onda ou uma partícula. Na figura 41 é apresentado fenômenos para fótons e elétrons em feixe de baixíssima intensidade. Os elétrons e os fótons apresentam comportamento ondulatório, mas não são ondas clássicas visto que um único elétron ou um único fóton não gera uma figura de interferência completa, mas produz somente uma marca sobre a tela fotográfica, como fosse uma partícula clássica. Entretanto esta marca estará em uma região da figura de interferência resultante da incidência de vários elétrons ou de vários fótons. Assim elétrons e fótons apresentam características de partículas e de ondas clássicas, entretanto não são nenhuma coisa nem outra. Denominar essa nova classe de entidade pelo termo “dualidade onda-partícula” não é o melhor caminho didático para abordar o tema, uma vez que este termo pode provocar uma inconsistência lógica na mente do aluno que pode resultar num obstáculo pedagógico. Alguns autores propõem denominações alternativas como *quantom*, *micropartículas*, *objetos quânticos*, *wavicles*, dentre outros.

Para finalizar, abordando o terceiro momento pedagógico, a aplicação do conhecimento. Apresenta-se uma discussão sobre as interpretações da Física Quântica acerca de toda problematização até então. Trazemos quatro interpretações apenas: ondulatória, corpuscular, dualista realista e interpretação da complementaridade, como mostrado na figura 41. O professor deve salientar que ainda não há um consenso entre os físicos sobre uma interpretação única padrão. Essa discussão fica assim mais restrita ao campo da filosofia da ciência. Entretanto, deve-se cha-

Figura 41 – Seleção de alguns Slides que compõem a apresentação da sequência didática. Imagem orientada na página, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Interferência de feixes de baixíssima intensidade

• Elétrons

TONOMURA, A. et al. American Journal of Physics. v. 57, n. 2, p. 117–120 (1989).

• Fótons

PESIC, P. American Scientist. v. 90, n. 3, p. 262–267 (2002).

UFV – DPF – MNPEF

Como pode algo ser considerado ONDA e PARTÍCULA?

- Onda é um ente que uma vez emitido, propaga-se preenchendo todo o espaço. Troca energia suavemente.
- Partícula é um ente material concentrado, pontual no espaço. Troca energia de forma abrupta.

} Ambos possuem características e propriedades muito distintas.

- Os elétrons e os fótons apresentam comportamento ondulatório, mas não são ondas clássicas visto que um único elétron ou um único fóton não gera uma figura de interferência completa, mas produz somente uma marca sobre a tela fotográfica, como fosse uma partícula clássica. Entretanto esta marca estará em uma região da figura de interferência resultante da incidência de vários elétrons ou de vários fótons. Assim elétrons e fótons apresentam características de partículas e de ondas clássicas, entretanto **NÃO SÃO** nenhuma coisa nem outra.
- O conceito de **Wavicle** foi introduzido em 1928 por Arthur Stanley Eddington, em seu trabalho "The Nature of the Physical World. London: MacMillan, 1928".
Ex.:

UFV – DPF – MNPEF

Algumas Interpretações da dualidade onda-partícula

- **Interpretação Ondulatória** - Apoiada por Erwin Schrödinger e John von Neumann. Consiste em argumentar que num experimento quântico um objeto propaga-se como uma onda antes de ser detectado e após sua detecção torna-se localizado, semelhante uma partícula. Cunha-se então o termo colapso da função de onda, que permite tratar um objeto quântico como uma onda bem distribuída no espaço antes da detecção, sendo que esta sofrerá um colapso ao ser detectada tornando-se mais ou menos localizada como uma partícula. Porém, não há a existência de ambos ao mesmo tempo.
- **Interpretação Corpuscular** - Apoiada por Alfred Landé e Leslie Ballentine. Consiste em argumentar que objetos quânticos como fótons e elétrons são corpúsculos. Descartam-se hipóteses de ondas associadas aos objetos. A explicação para a observação de padrões de interferência em experimentos deve ser dada a partir das interações entre os objetos e os instrumentos de medida.
- **Interpretação Dualista Realista** - Apoiada por Louis de Broglie e David Bohm. Consiste em argumentar que objetos quânticos dividem-se em duas partes, uma onda-piloto ou associada e uma partícula. A onda associada governa o movimento da partícula que possui uma trajetória bem definida, mas desconhecida. A observação dos padrões de interferência em um experimento é explicada pela superposição das amplitudes das ondas associadas aos objetos.
- **Interpretação da Complementaridade** - Apoiada e desenvolvida por Niels Bohr. Consiste em argumentar que objetos quânticos são ondas. Descarta-se a ideia de partícula uma vez que não é possível determinar o percurso do objeto anterior à sua detecção. A manifestação do aspecto corpuscular num experimento se dá por causa da forma intrinsecamente descontínua do ato de uma medição, como por exemplo, a ionização de um átomo.

UFV – DPF – MNPEF

Analogia - interpretação Dualista Realista

UFV – DPF – MNPEF

Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento da analogia pode ser consultado em: <https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>.

mar a atenção que a interpretação de uma dada teoria é o panorama da realidade traçado com base na teoria. E que o princípio da complementaridade é o conceito central da interpretação de Copenhague da Física Quântica, hegemônica dentre outras.

Com relação à interpretação dualista realista elaboramos um vídeo (figuras 42 e 43) com um experimento que fornece uma analogia mecânica à esta interpretação. De modo que, chama a atenção e desperta a curiosidade do aluno, além de, lhe ajudar a compreender e visualizar as ideias por traz da interpretação. A analogia se dá pela ligação visual de uma gotícula de fluido que oscila sobre o restante desse fluido, tendo associada a ela uma onda devido à vibração do sistema. A construção desse experimento será descrito na seção A.4. Esta parte da aplicação do conhecimento tem a finalidade de incitar uma discussão com os alunos para se observar a percepção deles quanto se o experimento revelava um objeto quântico ou não. Uma vez que o vídeo apresenta um análogo mecânico, com estruturas macroscópicas, espera-se que os alunos concluam que o sistema não apresenta nenhum objeto quântico. Para enriquecer a aula sugerimos ainda a apresentação de outros vídeos, como segue:

Watch the bouncing droplet:

<<https://www.youtube.com/watch?v=pbGzInjqhXU>>;

Pilot-Wave Hydrodynamics: Supplemental Video 1:

<<https://www.youtube.com/watch?v=50zJvQ43iTM>>;

Through the Wormhole - Wave/Particle - Silicon Droplets:

<<https://www.youtube.com/watch?v=fnUBaBdl0Aw>>;

Tunnel effect of walking droplet trapped in a square box:

<<https://www.youtube.com/watch?v=72DA4fgamPE>>.

A.3 Atividades propostas

1. Dentre as características da luz listadas abaixo, qual NÃO foi revelada pelo efeito fotoelétrico?
 - (a) A luz transfere energia abruptamente, como fosse uma partícula.
 - (b) A energia luminosa é transferida em porções discretas, pacotes.
 - (c) A energia entregue pela luz depende de sua frequência de oscilação.
 - (d) A velocidade da luz é independente do movimento do observador.
 2. Qual das afirmativas abaixo NÃO é verdadeira?
 - (a) O efeito fotoelétrico evidenciou o caráter ondulatório da luz.
 - (b) O efeito Compton evidenciou o caráter corpuscular da luz.
 - (c) O efeito de difração evidenciou o caráter ondulatório da luz.
 3. Fundamentado nos resultados dos experimentos de difração e interferência da luz é CORRETO afirmar que a luz se propaga:
 - (a) em linha reta.
 - (b) no vácuo com velocidade constante.
 - (c) como uma onda.
 - (d) como uma partícula.
 4. O experimentos de difração e interferência da luz juntamente com os experimentos de efeito Compton e fotoelétrico ofereceram evidencias que a luz é um ente:
 - (a) igual a uma partícula.
-

- (b) igual a uma onda.
 - (c) que ao mesmo tempo, é uma partícula e uma onda.
 - (d) que possui uma natureza dual, com aspectos de partícula e onda.
5. Uma partícula é um ente altamente localizado no espaço e que troca energia abruptamente. De outro lado, uma onda é dispersa pelo espaço e troca energia suavemente. Sendo conhecedor destas características das ondas e das partículas é possível afirmar que entes como os fótons, elétrons, entre outros, SÃO:
- (a) entes que, ao mesmo tempo, são onda e partícula.
 - (b) outros entes, que apresentam características de onda e de partículas.
 - (c) partículas.
 - (d) ondas.
6. O termo “natureza dual da luz” quer dizer que a luz:
- (a) é uma onda e uma partícula, ao mesmo tempo.
 - (b) hora é uma onda, hora é uma partícula.
 - (c) pode apresentar características de onda ou de partícula.
7. O fóton é uma partícula?
- (a) verdadeiro
 - (b) falso
8. Os experimentos de difração de elétrons consolidaram a ideia de que estes entes:
- (a) são partículas.
 - (b) são ondas.
 - (c) revelaram que os elétrons apresentam características de partículas.
 - (d) revelaram que os elétrons apresentam características de ondas.
9. É confortável para você entender a “natureza dual” dos fótons, dos elétrons, entre outros entes quânticos, como resultante da superposição de onda e partículas? É esta a concepção transmitida nas duas últimas aulas de física moderna?
-

- (a) Sim. Sim.
- (b) Não. Não.
- (c) Sim. Não.
- (d) Não. Sim.

10. O elétron é uma partícula?

- (a) verdadeiro
- (b) falso

Gabarito das atividades propostas

1. (d)	6. (c)
2. (a)	7. (b)
3. (c)	8. (d)
4. (d)	9. Resposta pessoal
5. (b)	10. (b)

A.4 Analogia mecânica à interpretação Dualista Realista

Para a construção do aparato experimental semelhante ao apresentado na figura 42 será necessário obter os seguintes materiais:

- Um alto falante;
- Uma base de montagem;
- Um circuito modulador com alimentação USB;
- Um carregador de celular com estrada USB;
- Um fone de ouvido com fios;
- Fios para conexões;
- Ferro de solda e estanho;
- Uma placa cilíndrica como recipiente para líquido;

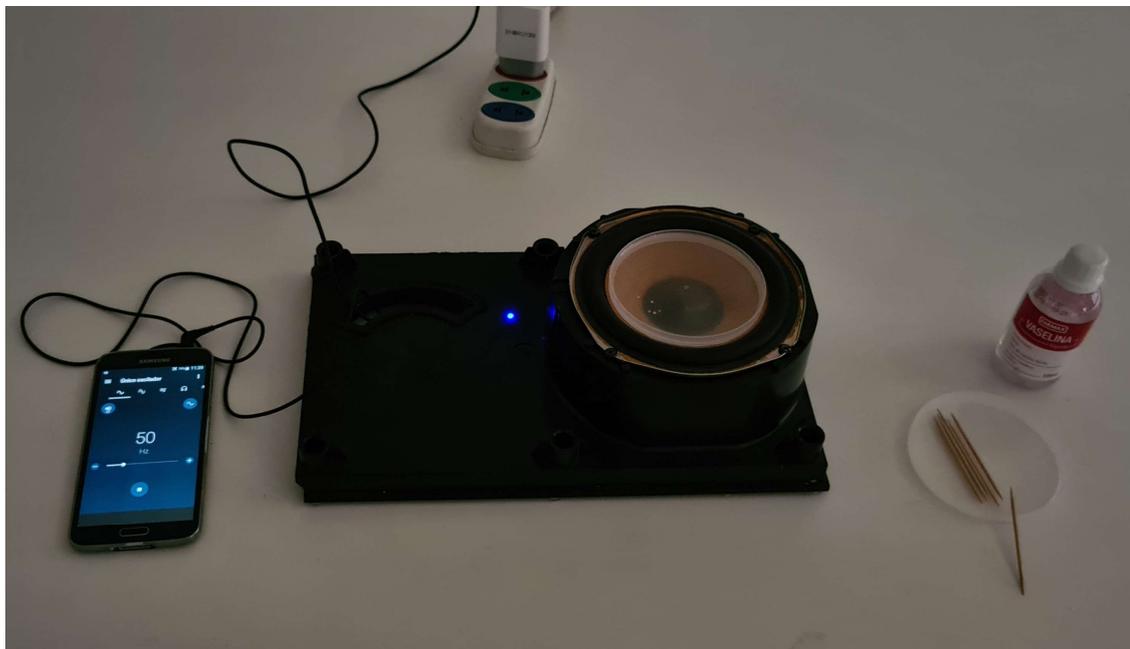
- Um gerador de frequência ajustável;
- Líquido com viscosidade cinemática entre (10 - 100) cSt (por exemplo, óleo de silicone ou vaselina);

A montagem do experimento é simples, deve-se conectar o alto falante ao gerador de frequência ligando-os ao circuito modulador com o auxílio do fone de ouvido. Para tal use um ferro de solda e estanho para fazer as devidas ligações dos componentes. Vejamos passo-a-passo:

- Primeiro: o circuito modulador pode ser obtido de uma caixinha de som antiga de Desktop com entrada de alimentação USB. Abra a caixinha de som e remova o circuito interno preservando a entrada de alimentação elétrica e tomando cuidado para identificar quais as entradas e saídas de áudio;
- Segundo: escolha um fone de ouvido com entrada compatível ao seu gerador de frequência (em nosso caso foi escolhido o formato P2). Remova as cabeças dos fones e ligue os fios de uma delas na entrada de áudio do circuito modulados;
- Terceiro: monte o alto falante e o circuito modulador à base de montagem;
- Quarto: conecte a saída de áudio do circuito modulador ao auto falante;
- Quinto: conecte a entrada do fone de ouvido ao gerador de frequência. Esse gerador pode ser um Smartphone com um aplicativo dedicado. Utilizamos em nossos experimentos o seguinte aplicativo: <<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.boedec.hoel.frequencygenerator>>;
- Sexto: conecte o circuito modulados à rede elétrica através do carregador de celular para ligar o alto falante e então teste se está tudo funcionando ligando o gerador de frequência entre (20 - 150) Hz.

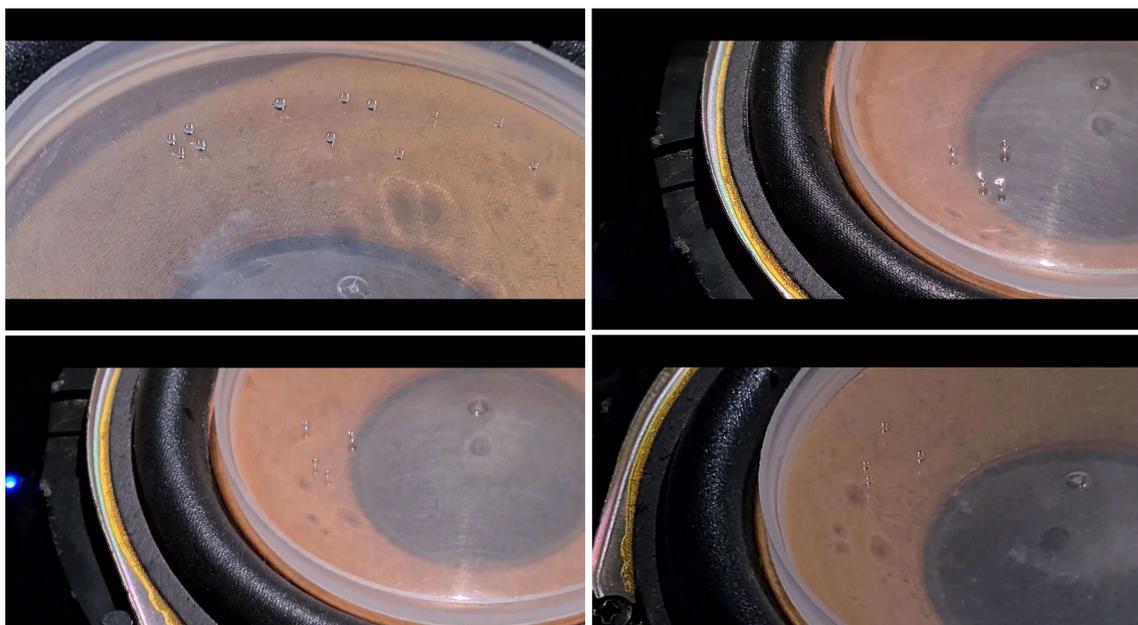
Para a execução do experimento coloque uma quantidade do líquido no recipiente cilíndrico que seja suficiente para preencher todo fundo. Em seguida posicione este recipiente sobre o alto falante de modo que o líquido fique distribuído o mais uniformemente possível no recipiente. Agora ligue o alto falante e o gerador de frequência (sendo para a vaselina uma frequência de 50 Hz). Então com o auxílio de um objeto pontiagudo perturbe o sistema suavemente a fim de produzir pequenas bolinhas do líquido que ficarão saltitando sobre a superfície deste líquido.

Figura 42 – Montagem experimental da analogia mecânica para a interpretação dualista-realista da Física Quântica.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento pode ser consultado em:
<<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>>.

Figura 43 – Detalhes do resultado experimental da analogia mecânica para a interpretação dualista-realista da Física Quântica.



Fonte: Elaborada pelo autor. O vídeo do experimento pode ser consultado em:
<<https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website>>.