



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

**UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA O ENSINO DE DUALIDADE
ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO MÉDIO.**

João Gabriel Manzollilo

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de João Gabriel Manzollilo, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora:

Lúcia Helena Coutinho

Rio de Janeiro
Novembro de 2024

Sumário:

Capítulo 1	Introdução	5
Capítulo 2	Referencial teórico	10
Capítulo 3	Metodologia experimental	16
Capítulo 4	Sequência didática	23
	Referencial bibliográfico	27
	Anexo:	29
	Material do aluno	30

Lista de figuras

Figura 2.1: Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Onda chegando no mar, pingo em uma água parada, cordas do violão e símbolo de volume..	9
Figura 2.2: A esquerda onda grande no mar e a direita onda pequena no mar.	10
Figura 2.3: A esquerda ondas na corda com comprimentos diferentes e a direita tabela de tons musicais a partir de seu comprimento de onda..	11
Figura 2.4: Ondas circulares se encontrando na água.	11
Figura 2.5: Bolas de bilhar em uma mesa..	12
Figura 3.1: Foto da esquerda: O laser verde sobre um anteparo, foto da direita: suas características.	15
Figura 3.2: a) Laser vermelho de alta potência. b) Laser vermelho de baixa potência. c) Ambos os lasers vermelhos em comparação. d) Características do laser vermelho de alta potência (comprimento de onda 650 ± 10 nm)	16
Figura 3.3: Luz branca utilizada a partir de uma lanterna	17
Figura 3.4: Base de papelão para o fio de cabelo.	17
Figura 3.5: a) Aparato experimental com o multímetro conectado ao LED verde. b) Testagem do LED verde usando a bateria. c) Testagem do LED vermelho usando a bateria..	18
Figura 3.6: Foto da esquerda: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz verde. Foto da direita: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz vermelha.	19

Figura 3.7: a) emissão de luz branca no LED verde; b) emissão de luz verde no LED verde; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED verde; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED verde..20

Figura 3.8: a) emissão de luz branca no LED vermelho; b) emissão de luz verde no LED vermelho; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED vermelho; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED vermelho..21

Capítulo 1

Introdução

A física ensinada tradicionalmente no Ensino Médio não dialoga com o mundo vivido pelos alunos. Os estudos de física moderna e contemporânea realizados a partir do século XX, necessários para o entendimento de parte significativa das tecnologias que usamos atualmente, não estão presentes na maioria das escolas brasileiras, como Moreira (2017) explicita: “o ensino da Física estimula a aprendizagem mecânica de conteúdos desatualizados. Estamos no século XXI, mas a Física ensinada não passa do século XIX” (Moreira, pg 2, 2017).

Além disso, estes conteúdos não são necessários para o ingresso dos alunos a universidades públicas, visto que o mesmo não se encontra na Matriz de Referência do ENEM (Brasil, 2024). Sendo portanto desvalorizados e postos de lado por diversos colégios que procuram unicamente preparar os alunos para esta prova. Com isso, os alunos do Ensino Médio brasileiro ficam defasados em 2 séculos na física por eles estudada. Justificando assim resultados como os de Vogt (2003) onde, em sua pesquisa “Percepção Pública da Ciência”, o professor, perguntando para estudantes quanto ao seu interesse nas disciplinas das ciências da natureza tais como física, química e biologia, recebeu mais de 78% das respostas classificando-as como “muito chatas no cenário escolar” (Vogt, 2003).

A partir destes dados, diversos professores e pesquisadores têm se voltado à tentativa de aproximar os alunos das aulas de física. Entre as soluções mais discutidas está a diminuição desse espaço temporal entre a física estudada e o mundo vivido pelo aluno. Levando assim a um aumento significativo dos estudos sobre a inserção de física moderna no Ensino Médio, como afirma Pietrocola: “As investigações que abordam a temática da inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio vem avançando nas últimas décadas. Hoje, é uma linha de pesquisa consolidada na área de Ensino de Ciências.” (Pietrocola, pg 2, 2018)

Para então inserir a física moderna no Ensino Médio existem diversos caminhos e métodos com características individuais que os tornam próprios para determinadas turmas e propostas pedagógicas de cada colégio. Neste trabalho, procura-se uma introdução à física moderna a partir da experimentação, onde os alunos analisam resultados experimentais destoantes da

física clássica, levando-os a discussões de possibilidades que solucionem este contraste entre a expectativa gerada a partir dos conceitos teóricos e os resultados práticos observáveis.

Essa dinâmica é pensada para os alunos compreenderem diretamente no contato com este estudo, as necessidades das mudanças radicais no modelo científico utilizado que ocorreram no século XX. Compreendendo que a física moderna não surge de maneira instantânea, mas a partir de uma necessidade, vista a incapacidade da física clássica de explicar e prever determinados resultados observáveis.

Não obstante, entre as características almejadas por este trabalho está também a acessibilidade, tanto matemática, quanto financeira e laboratorial. Este foco em uma acessibilidade matemática se baseia na fala de Pietrocola afirmando que a complexidade matemática da física moderna é uma das dificuldades enfrentadas por professores para incluí-la no Ensino Médio. “entendemos que o professor por ter passado muito tempo inserido em uma perspectiva que enfatiza o conteúdo, principalmente aquele focado no formalismo matemático, cria representações e concepções de que não é possível ensinar a Física Moderna e Contemporânea, devido ao alto grau de sofisticação matemática”. (Pietrocola, pg 4, 2018).

Enquanto a procura por uma acessibilidade financeira e de manuseio se baseiam no alto custo de equipamentos e materiais, além da complexidade das técnicas laboratoriais para reprodução dos principais experimentos característicos da física moderna. Considerando a notória falta de recurso financeiro das escolas, especialmente públicas, do país, além da ausência de laboratórios de ciências em 56% das escolas brasileiras de acordo com o Censo Escolar de 2018. (Brasil, 2022)

A partir de ambas as considerações, propõe-se uma atividade de baixo valor de mercado utilizando itens de fácil acesso para compra e fácil manuseio como o multímetro, lasers e LEDs. Que também se baseie em discussões teóricas fundamentadas nos conceitos bases da ondulatória clássica, não necessitando assim de uma extensiva matematização.

A proposta realizada é, então, introduzir o conceito de dualidade onda-partícula no Ensino Médio, a partir de uma sequência de experimentos acompanhados por discussões entre os alunos mediadas pelo professor pré e pós experimentos. Estes experimentos são divididos em 3 etapas: a difração e interferência da luz; o efeito fotovoltaico com uma luz única; o efeito fotovoltaico com diferentes fontes de luz.

Para sua boa aplicação, espera-se que seja desenvolvida com alunos do segundo ou terceiro ano do Ensino Médio após o seu estudo, no mínimo, de ondulatória concluído. O tempo esperado para a boa aplicação é de pelo menos uma hora e quarenta minutos. Isto é, dois tempos médios dentro do cronograma escolar brasileiro.

Inicialmente, é sugerida uma conversa com os alunos recapitulando as características principais de ondas e de partículas, separando-as em dois grupos visivelmente distintos com interações próprias e exemplos claros. O papel do professor como condutor desta recapitulação é essencial para enfatizar respostas que podem indicar caminhos interessantes de diálogos e intervir, caso necessário, com alguns complementos como os fenômenos ondulatórios característicos, caso nenhum aluno os comente. Então, é perguntado em qual grupo a luz se encontra, levando resposta natural dos alunos afirmando a caracterização da luz como um fenômeno ondulatório. A partir daí, passa-se para os experimentos a fim de confirmar ou contrariar essa hipótese.

O primeiro experimento é o de difração e interferência da luz, inspirado na experiência da dupla fenda de Thomas Young (Young, 1801). Este experimento consiste na incidência de um feixe de laser sobre um fio de cabelo, levando à difração da luz. A partir desta, a luz difratada segue em direção a parede da sala que serve como anteparo, no entanto, neste movimento até a parede ocorre a interferência entre segmentos da luz difratada. Obtendo assim o resultado de pontos de máximo e mínimo na parede igualmente espaçados que caracterizam o comportamento ondulatório.

O experimento é realizado tanto com o laser verde quanto com o laser vermelho, medindo com a régua as distâncias entre os máximos subsequentes em cada um deles. Esta distância auxiliará os alunos a reconhecerem as distinções conceituais entre as cores a partir da física clássica. Após as discussões quanto ao experimento e seus resultados em relação à natureza da luz, apresenta-se o segundo experimento: o efeito fotovoltaico.

Comumente, se utiliza do efeito fotoelétrico para introduzir o estudo da dualidade onda partícula, como afirma Stephen Klassen “O efeito fotoelétrico é constantemente utilizado em livros didáticos para confirmar a existência dos quanta de luz ou fótons, sendo essa uma das suas principais importâncias didáticas.” (Klassen, pág 2, 2009, Tradução livre). Entretanto, sua reprodução historicamente acurada depende de um aparato experimental de alto custo e difícil acesso. Portanto, é proposta a utilização do efeito fotovoltaico a partir dos LEDs, que apresenta resultados igualmente relevantes para a discussão da natureza ondulatória, porém é consideravelmente mais acessível.

Este efeito é produzido a partir da emissão do laser verde sobre um LED verde desligado, dentro de um ambiente de baixa iluminação mas conectado a um multímetro. Quando a radiação luminosa for recebida pelo LED, os fótons irão ser absorvidos pelos elétrons semi-livres que estão em sua banda de valência, promovendo-os para um nível de energia mais alto, semelhante ao efeito fotoelétrico. O diferencial é que, ao invés dos elétrons serem

retirados da superfície metálica e conduzidos para uma placa coletora a partir de uma diferença de potencial externa, neste caso o fóton absorvido fará com que um par elétron-buraco da junção pn seja separado, com o elétron sendo promovido para a banda de condução do material tipo n, e o buraco para a banda de valência do material tipo p. Gerando assim uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades do LED.

Este experimento, isoladamente, não tem contradição alguma com a teoria ondulatória da luz, assim como a existência do efeito fotoelétrico também não contradiz a física clássica. No entanto, os resultados obtidos tanto no efeito fotoelétrico, quanto no fotovoltaico, em determinadas frequências abaixo da frequência limite, que são inexplicáveis por esta teoria do século XIX.

Após o entendimento do experimento então pelos alunos e a discussão quanto aos resultados do mesmo, são propostas as variações para análise de resultados. Neste momento, o LED verde é iluminado por luzes vermelhas de diferentes potências levando todas, independente da potência, a uma diferença de potencial nula no voltímetro. Este resultado inesperado pela física clássica é apresentado aos alunos, que são desafiados a tentar justificá-lo de alguma forma. A única solução sem falhas é então apresentada pelo professor: a física que até então foi estudada tem um limite e fora desse limite é necessário um novo modelo científico.

A dualidade onda-partícula é, então, apresentada e discutida entre o professor e os alunos. Outras variações do efeito fotovoltaico são realizadas e em meio a esta prática os alunos individualmente anotam, em momentos específicos, os resultados por eles observados, suas interpretações dos mesmos e, principalmente, suas expectativas de resultados anteriores a cada experimento. Essa construção de hipóteses pré-experimento é essencial para levar o aluno à quebra de expectativa ao final da prática. Auxiliando, assim, na compreensão da necessidade de desenvolvimento de uma física distinta da física clássica.

Outra particularidade interessante desta atividade é a possibilidade de explicação do funcionamento das placas fotovoltaicas, os populares painéis solares. Apesar destas placas utilizarem a emissão de luz do sol policromática e neste experimento serem utilizadas luzes laser monocromáticas, o funcionamento deste método de obtenção de energia se explica a partir do efeito fotovoltaico. Demonstrando assim uma aplicação prática concreta aos alunos do estudo realizado nesta atividade.

Nas diferentes ocasiões que esta proposta foi aplicada, as respostas dos alunos mostraram resultados positivos. Como em duas turmas de um Colégio Estadual do Rio de Janeiro, com somados 49 alunos participando da atividade, onde 77,6% destes responderam a pergunta final

quanto à natureza da luz, afirmando que esta não poderia ser definida nem como onda nem como partícula.

A utilização de experimentos os quais os resultados destoam das hipóteses concebidas a partir da física clássica auxiliam o aluno a compreender como estruturou-se a física moderna e identificar parte das características que a tornam tão distante das suas teorias anteriores. O diálogo quanto aos resultados e, em especial, a criação de hipóteses e comparação entre as hipóteses geradas e os dados obtidos, são ótimos exercícios que auxiliam o aluno não somente a compreender melhor a física moderna e os limites da física clássica, mas também a própria produção de conhecimento científico.

Como afirmam Pérez e Solbes: “O ensino de ciências está dando aos alunos uma visão incorreta e simplista da imagem da ciência. Essa é marcada pelo empirismo, mas com a ausência de relevantes aspectos como a formação de hipóteses e a construção experimental.” (Perez e Solbes, pág 1, 1993, Tradução livre). Mesmo ocorrendo adaptações e variações a partir das individualidades de cada professor e particularidades de cada turma e colégio, é indispensável quando aplica-se esta atividade, a utilização da mesma como oportunidade para o aluno discutir, gerar hipóteses, observar resultados e perceber contradições entre diferentes modelos científicos a partir da condução do professor.

Capítulo 2

Referencial teórico

Tal experimento baseia-se em uma reformulação da distinção entre partículas materiais e ondas. Portanto, é de extrema importância que se revisem tais definições. Inicialmente, ao pensarmos em ondas, a primeira associação feita é sempre com as ondas do mar. E, de fato, parte das características principais das ondas são facilmente contempladas na análise dessa onda em específico. No entanto, podemos usar também para tal estudo as ondas nas cordas do violão, as ondas consequentes de algum pequeno corpo (normalmente um pingo) caindo em uma água parada e as ondas sonoras, que para nós são invisíveis, mas ainda assim perceptíveis e analisáveis.

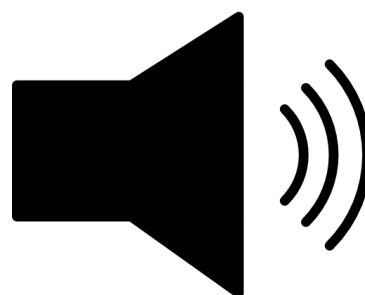


Figura 2.1: Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Onda chegando no mar, pingo em uma água parada, cordas do violão e símbolo de volume. Disponíveis respectivamente em: <https://surfguru.com.br/conteudo/a-influencia-das-aguas-rasas-nas-ondas-que-chegam-a-uma-praia-2017-01-19-15329.html>, <http://eientretenimentoinformacao.blogspot.com/2012/06/tenha-um-pingo-de-consciencia-economize.html>, <https://www.youtube.com/watch?v=51CHZjnxgTs>, https://www.flaticon.com/br/icone-gratis/alto-falante-com-contorno-de-ondas-sonoras_28601 (Acesso em 17 de setembro de 2024)

Ao procurar características em comum entre tais ondas percebemos inicialmente uma não-pontualidade. Todas as ondas da figura se encontram em diversos locais ao mesmo

tempo, a onda do mar encontra a praia em toda a sua extensão assim como a onda do som é escutada por todos até uma certa distância de sua fonte. Podemos definir em algumas uma localidade de formação mas em nenhuma pode ser definido um ponto localizado único atingido pela onda ou então um único caminho que ela percorreu. Ondas também não são quantizadas discretamente, sendo impossível se reduzir uma onda a sua parte mínima, suas variações se realizam em contínuos constantes e não inteiros.

Diferenciando agora ondas de mesma natureza a partir de suas singularidades podemos, ao comparar duas ondas distintas no mar, perceber facilmente qual fará possivelmente mais estrago ao chegar na costa, a partir de uma distinção clara: sua altura. Ondas mais altas são consideradas mais fortes e ondas mais baixas, mais fracas. A esta altura damos o nome de amplitude, e a esta “força” associada à sua amplitude, damos o nome de intensidade. Outro exemplo dessa diferença de intensidade é na onda sonora, onde se percebe uma variação de volume direta à variação de amplitude.

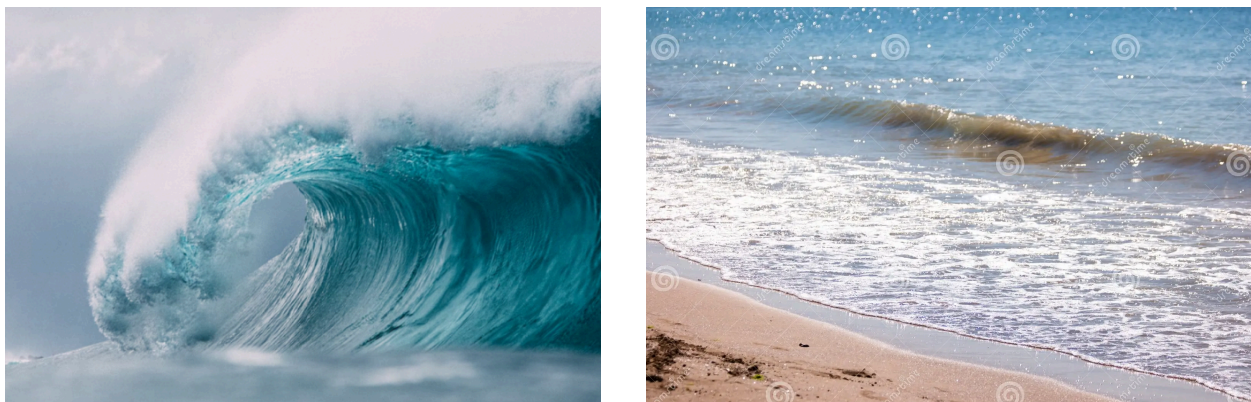


Figura 2.2: A esquerda onda grande no mar e a direita onda pequena no mar. Disponíveis respectivamente em: <https://www.correiobraziliense.com.br/mundo/2022/12/5059937-onda-gigante-atinge-praia-na-africa-do-sul-e-pr-ovoca-tres-mortes.html>, <https://thumbs.dreamstime.com/z/onda-pequena-na-costa-81377697.jpg> (Acesso 17 de novembro de 2024)

Outra característica que caracteriza as ondas é seu comprimento de onda, sendo esse o tamanho longitudinal de uma oscilação. Comprimentos distintos são facilmente diferenciados em movimentos de cordas mas seu grande destaque se encontra nas ondas sonoras onde diferentes comprimentos levam a diferentes tons musicais. A distinção entre uma nota Lá e uma nota Dó, tocadas em um mesmo violão, é a variação de comprimento entre elas. Percebe-se que essa distinção não se relaciona a diferença de amplitudes, visto que ondas sonoras podem ter volume alto ou baixo independente de seus tons.

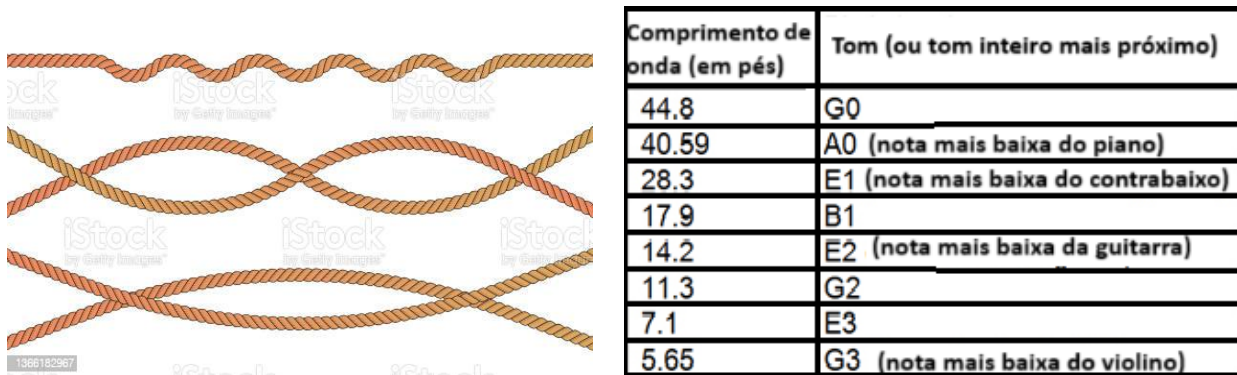


Figura 2.3: A esquerda ondas na corda com comprimentos diferentes e a direita tabela de tons musicais a partir de seu comprimento da onda no vácuo. Respectivamente disponível em <https://www.istockphoto.com/br/vetor/cordas-de-quadro-diferente-gm868491116-144528509>, e adaptado de <https://www.prosoundweb.com/the-long-and-short-of-it-acoustic-wavelengths> (Acesso 17 de novembro de 2024)

Por fim, discute-se a interação entre ondas. Ao fenômeno de sobreposição das ondas damos o nome de interferência, onde essa pode ser construtiva, quando as ondas se reforçam levando a uma onda resultante de maior amplitude que as originais, ou destrutiva, quando as ondas se anulam, chegando possivelmente a um ponto de amplitude zero.

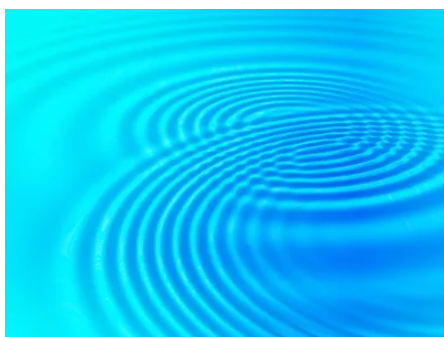


Figura 2.4: Ondas circulares se encontrando na água. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/interferencia-ondas.htm> (Acesso 17 de novembro de 2024)

Por outro lado, as partículas têm características completamente opostas nestes quesitos. Sua localidade é pontual e muito bem definida. Como consequência, quando observamos uma partícula material chegando a um certo ponto, definimos de forma clara um caminho por ela percorrido. Suas singularidades são também mais claras, como a massa e velocidade, que definem quanta energia a partícula terá em seu movimento. Sua quantização também é bem definida e discreta, onde existem quantidades naturais de corpos sem valores contínuos, que não pertencem aos números inteiros. Tomando como exemplo as bolas de bilhar, podemos dizer que na mesa existem uma, duas, três ou quatro bolas, mas nunca uma quantidade não

natural como 5,7 bolas. Por fim, o choque entre partículas é caracterizado pelo princípio da impenetrabilidade da matéria, que afirma ser impossível dois corpos materiais distintos ocuparem o mesmo lugar no espaço ao mesmo tempo, as bolas de bilhar também servem como um bom exemplo para essa colisão.

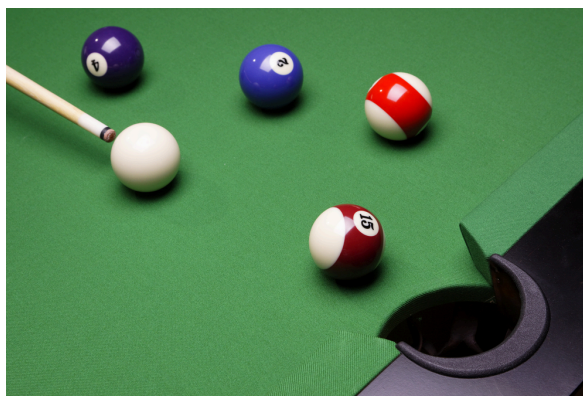


Figura 2.5: Bolas de bilhar em uma mesa. Disponível em: <https://www.livescience.com/46278-kinetic-energy.html> (Acesso em 17 de novembro de 2024)

Para grande parte dos elementos de nosso meio, como a bola de bilhar ou o som, é trivial a compreensão de qual dos dois grupos o elemento participa. No entanto, a luz foi uma exceção a essa regra durante muito tempo. Ao longo do século XVII, a discussão quanto à natureza da luz recebeu destaque na ciência, com Newton e Huygens acreditando na teoria corpuscular e ondulatória da luz, respectivamente. Esse confronto se manteve significativamente presente até 1801, quando Young, a partir do experimento de dupla fenda, chega a resultados de uma luz ondulatória, que passam a ser aceitos como coerentes pela comunidade científica e perduram por mais de um século.

No século XX, entretanto, com o nascimento da física moderna a partir de Einstein e Planck, surgem novos experimentos e evidências que retomam a discussão da natureza da luz. Tais experimentos comprovam uma quantização da luz, sendo ela composta por pequenas quantidades de energia como pacotes que são quantizados e discretos, a esta quantidade mínima de energia da luz damos o nome de fótons. Esses fótons, observados em determinados experimentos com comportamentos característicos de partículas, levam a uma quebra da teoria ondulatória clássica da luz. Todavia, também não pode ser desconsiderada a presença de fenômenos classicamente ondulatórios, como a interferência, na composição da natureza da luz.

Portanto, em determinados experimentos podemos perceber características da luz que levam a considerá-la como onda, e em outros destacam-se características da mesma que são

relacionadas às partículas. Esse não pertencimento em nenhuma das duas naturezas clássicas é o que estudaremos a seguir, sendo tal estranheza denominada de dualidade onda-partícula. Entre os experimentos do século XX que vão de encontro à teoria ondulatória clássica da luz, está o efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons de uma superfície metálica devido à incidência de luz sobre ela; o que o torna significativo para nossa discussão é sua disparidade em relação aos resultados esperados pela física clássica. Pela teoria ondulatória, espera-se uma relação direta entre intensidade da onda e energia. Logo, no efeito fotoelétrico, a energia cinética máxima deveria ser obtida quando a amplitude é máxima. Para além, na teoria ondulatória a frequência não deveria variar algo mais que características externas da onda (no caso da luz, a cor) e o experimento deveria funcionar para toda e qualquer frequência. Todavia, quando realiza-se tal experimento, percebe-se que a energia cinética dos elétrons retirados depende diretamente da frequência da luz, e não necessariamente de sua amplitude, sendo inclusive necessária uma frequência mínima para a ejeção dos elétrons em cada material. Estando abaixo dessa frequência limite o efeito não ocorre, independente da intensidade de luz emitida, logo tal experimento não é contemplado por uma teoria clássica de luz ondulatória.

O experimento do efeito fotoelétrico que resulta em uma natureza da luz não ondulatória, será neste roteiro substituído por uma variação do mesmo de maior acessibilidade, mas com resultados finais muito similares, o efeito fotovoltaico. Tal adaptação consiste na incidência de luzes de diferentes frequências em LEDs de diferentes cores, desligados. Para bem compreender tais resultados, é importante compreender antes o que são os LEDs. Na natureza temos condutores, isolantes e semicondutores, sendo os condutores materiais como os metais, onde os elétrons transitam entre níveis energéticos com facilidade, gerando assim facilmente um campo elétrico e, em contrapartida, sendo os isolantes aqueles com um grande espaço entre seus níveis energéticos, dificultando o movimento dos elétrons e a geração de um campo elétrico, como por exemplo a borracha. Os semicondutores são, como esperado, um meio termo entre esses dois, onde existe uma distância considerável entre os níveis energéticos, possibilitando um movimento dos elétrons somente na presença de um campo elétrico externo, ou seja, quando energiza-se de alguma forma tal material. O LED é um desses semicondutores, onde os elétrons conseguem migrar de um nível energético para outro a partir da aplicação de uma energia externa sobre eles. Nessa transição de nível, o elétron libera sua energia na forma de radiação eletromagnética, ou seja, de luz. A cor da luz depende do tamanho desse gap entre os níveis energéticos, que definirá quanto de energia será necessária para o elétron transitar de um nível para o outro e, conseqüentemente, quanta energia ele

emitirá na forma de radiação eletromagnética ao migrar. Esse funcionamento consegue justificar a natureza não ondulatória da luz na física moderna, pois a energia emitida pelo elétron irá definir a cor do LED e não sua intensidade, levando a uma relação direta entre energia e frequência, e não energia e amplitude.

Em nosso experimento, no entanto, iremos fazer um processo inverso para bem conseguir visualizar essa distinta natureza. Emitindo uma luz diretamente no LED, iremos energizar seus elétrons fazendo-os migrar de nível energético, o que produzirá uma diferença de potencial. A ocorrência dessa transição, no entanto, está condicionada à quantidade de energia recebida pelos elétrons, e logo, relaciona-se à frequência da luz incidida. Tal experimento poderá nos auxiliar a compreender a dualidade onda partícula da luz, pois segundo a física clássica, a voltagem resultante da emissão de luz diretamente no LED, dependeria somente da intensidade da luz emitida e não de sua frequência ou cor.

Capítulo 3

Metodologia experimental

Tanto para a montagem do primeiro processo experimental inspirado na dupla fenda de Young, quanto nos dois processos experimentais do efeito fotovoltaico, foram necessários materiais próprios específicos consideravelmente acessíveis. Esses materiais são: uma fonte de laser verde de cerca de 550 nm, dois lasers vermelhos de comprimento de onda aproximado de 650 nm com potenciais visivelmente diferentes, uma fonte de luz branca, um fio de cabelo, uma base para o fio, fita adesiva, uma régua, uma caixa pequena como base para o LED, um LED verde, um LED vermelho, um voltímetro, uma bateria pequena tipo botão e cabos com pontas de garra popularmente conhecidos como cabos jacaré.

A começar pela fonte de luz verde, essa tem como potência mínima necessária um valor que seja suficiente para a percepção da diferença de potencial pelo voltímetro utilizado no efeito fotovoltaico. Além de ser necessariamente vista de maneira clara quando emitida na parede a uma curta distância, de forma a ser possível observar os padrões de interferência no primeiro experimento. Para as aplicações foi usada uma fonte de 1 mW de 532 ± 10 nm de comprimento de onda e classe I.

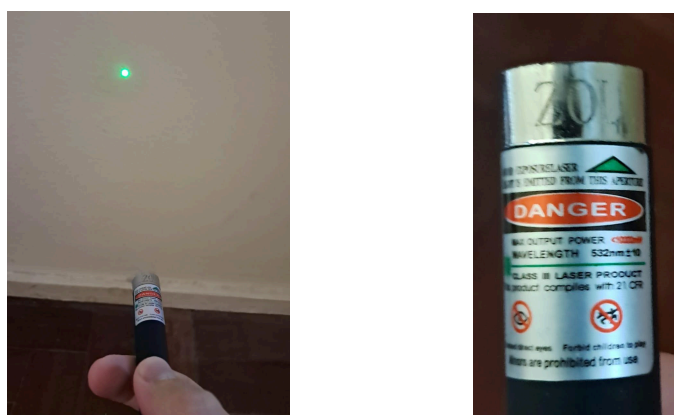


Figura 3.1: Foto da esquerda: O laser verde sobre um anteparo, foto da direita: suas características (comprimento de onda de 532 ± 10 nm)

Em contrapartida, os lasers vermelhos são necessários para estudar tanto a diferença entre frequências distintas em cada experimento, quanto as alterações que ocorrem pela variação de intensidade (de maneira especial no efeito fotovoltaico). As potências necessitam ser visualmente diferentes, como apresentado na figura 3.2, para os alunos gerarem expectativas

associadas à relação da física clássica entre intensidade da luz e energia. Para as aplicações foram utilizadas duas fontes laser de 650 ± 10 nm sendo a mais fraca de classe I e a mais forte de classe II.

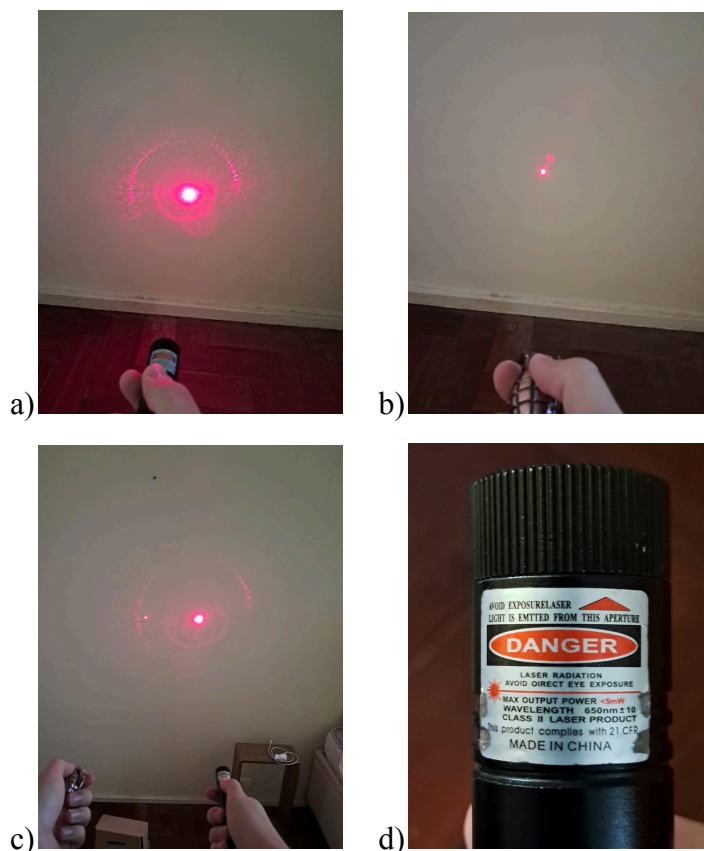


Figura 3.2: a) Laser vermelho de alta potência. b) Laser vermelho de baixa potência. c) Ambos os lasers vermelhos em comparação. d) Características do laser vermelho de alta potência (comprimento de onda 650 ± 10 nm)

A fonte de luz branca, em contrapartida, não necessita de uma intensidade específica, sendo seu papel unicamente para auxiliar os alunos a testar possíveis diferentes situações no efeito fotovoltaico. A presença de uma luz policromática gerando voltagem em qualquer LED pode gerar outras diversas discussões. Além de impedir pensamentos incorretos, como a expectativa de alguns alunos em somente o laser verde gerar uma voltagem no LED verde e justificar essa voltagem pela coincidência de suas cores. Novamente, sua intensidade precisa ter um valor mínimo de modo a ser visto mas sem uma potência própria necessária.

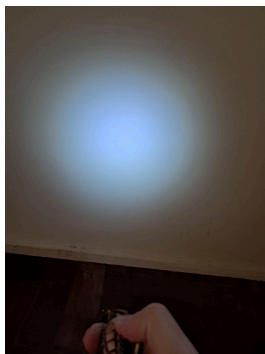


Figura 3.3: Luz branca utilizada a partir de uma lanterna.

A base para o fio de cabelo no primeiro momento pode ser composta de material reciclável, como apresenta-se a figura 3.4. Para apoiar o fio de cabelo foi realizado um corte retangular na tampa de uma caixa de papelão pequena, prendendo neste corte o fio e apoiando as abas da tampa nas laterais da caixa para esta ficar em pé.



Figura 3.4: Base de papelão para o fio de cabelo

Quanto aos componentes finais, os LEDs não precisam ter intensidades específicas, mas é importante checar se são LEDs da própria cor ou são produzidos pela combinação de outras cores, o que pode influenciar no resultado do experimento. Ressaltando, porém, que LEDs amarelos e azuis são comumente produzidos a partir da combinação de outras cores, mas raramente LEDs verdes e vermelhos não são produzidos pela cor natural. O voltímetro não precisa de uma precisão muito elevada,, podendo ser utilizado um multímetro digital portátil de baixo custo como o da imagem 3.13, capaz de ler diferenças de potencial entre 0 e 2 V.. A bateria, por fim, tem a função de ligar facilmente o LED e demonstrar para os alunos as cores de cada um que será utilizado no experimento. Logo, qualquer voltagem é válida, desde que seja suficiente para uma clara iluminação como mostram as figuras 3.5 (b) e 3.5 ©. Nas aplicações realizadas foi utilizada uma bateria de 3V.

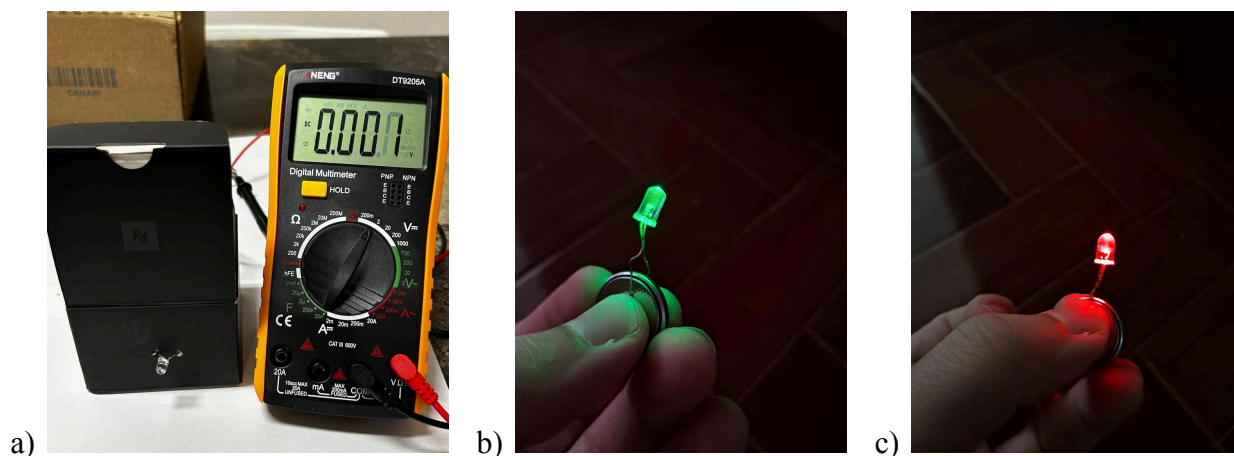


Figura 3.5: a) Aparato experimental com o multímetro conectado ao LED verde. b) Testagem do LED verde usando a bateria. c) Testagem do LED vermelho usando a bateria.

Para a primeira sequência experimental, utiliza-se somente o laser verde, um dos lasers vermelhos (o que for melhor para observar o padrão de interferência na parede), o fio de cabelo, sua base e a régua. Entre os principais cuidados necessários em sua montagem está a precaução com a medição das distâncias entre os máximos subsequentes do laser verde e os máximos subsequentes da fonte vermelha. Tal distinção não é possível a olho nú, sendo portanto necessária a régua.

Nas aplicações realizadas em específico as distâncias entre os máximos consecutivos com o laser verde e o laser vermelho, respectivamente, foram de 6 mm e 8 mm. No entanto, estes valores não necessariamente se repetirão em outras aplicações pois além de dependerem do comprimento de onda do laser utilizado dependem da distância entre a parede e o fio de cabelo e do diâmetro do fio.

Para as medições, assim como na figura 3.6, destacarem de fato a diferença entre o comprimento de onda do verde e do vermelho pela física clássica, é necessário que a distância entre o fio de cabelo e a parede seja a mesma em ambos os exercícios. Não obstante, mesmo sem um valor físico, é interessante que as luzes sejam postas em um ponto também de distancia comum para os aluno interpretarem como de fato situações análogas e não associarem a diferença de medição entre os máximos subsequentes a fatores externos como a distância entre a fonte de luz e o fio de cabelo. Destaca-se também a preocupação com a iluminação da sala. Uma sala de claridade muito elevada impossibilita a boa percepção do padrão de interferência na parede. Por outro lado, uma sala totalmente escura impossibilita a leitura dos valores medidos pela régua.

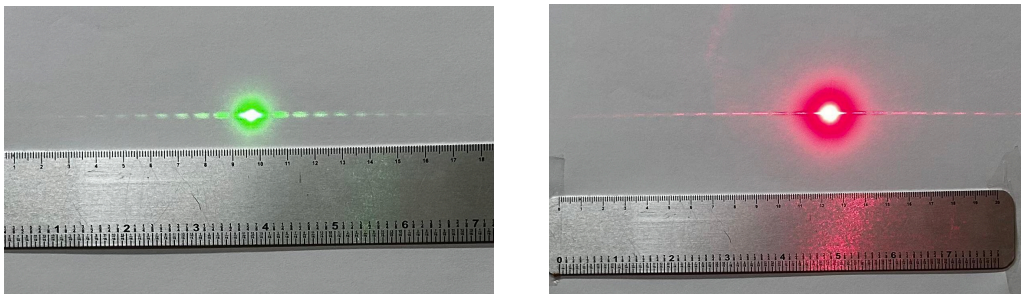


Figura 3.6: Foto da esquerda: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz verde. Foto da direita: Medição da distância entre 2 máximos consecutivos para a luz vermelha.

Seguindo então para os experimentos de efeito fotovoltaico, neles serão utilizados os dois LEDs, as quatro fontes de luz, o multímetro, a bateria e os cabos jacarés. Inicialmente é importante mostrar para os alunos a cor de cada LED utilizando a bateria, assim como nas figuras 3.5 (b) e (c). Então conecta-se o LED verde com o multímetro a partir dos cabos jacaré e ilumina-se o LED com a fonte de luz laser verde, levando à aparição de uma voltagem registrada pelo voltímetro, como mostra a figura 3.7(a).

Um cuidado importante para não influenciar negativamente o raciocínio dos alunos é não realizar contato direto entre a fonte luminosa e o laser. Pois apesar de não existir uma diferença física no caso com ou sem esse contato, o mesmo pode gerar interpretações dúbias dos alunos. Não é necessária uma grande distância, no entanto, para prevenir pensamentos incorretos dos estudantes é interessante mostrar claramente um afastamento mínimo entre a fonte luminosa e o LED.

Após os resultados do efeito fotovoltaico especificamente com tanto o laser quanto o LED verde, os resultados são discutidos com a turma, anotados pelos estudantes e o professor faz a apresentação desse novo fenômeno físico. A partir desse momento, o professor pede aos alunos que pensem em hipóteses para os possíveis resultados com lasers de diferentes cores e potências, e LEDs de diferentes cores. Após os alunos escreverem suas propostas de resultados é realizado o mesmo experimento com a luz vermelha de baixa potência, a luz vermelha de alta potência e a luz branca, todos incidindo no LED verde, assim como mostra a figura 3.7.

Depois os experimentos se repetem sendo utilizado agora o LED vermelho. As quatro fontes de luz são repetidas como mostra a figura 3.8, e novamente os alunos anotam os resultados. Depois destes dados obtidos, é incentivada a conversa para os alunos compararem

suas expectativas pré-experimento com o real resultado obtido, e sugerirem hipóteses para a justificativa destes resultados. Em meio a este diálogo, o professor pode, no momento que considerar propício, conduzir para a possibilidade de uma nova teoria física, introduzindo assim a dualidade onda-partícula e, conseqüentemente, a física moderna no ensino regular.

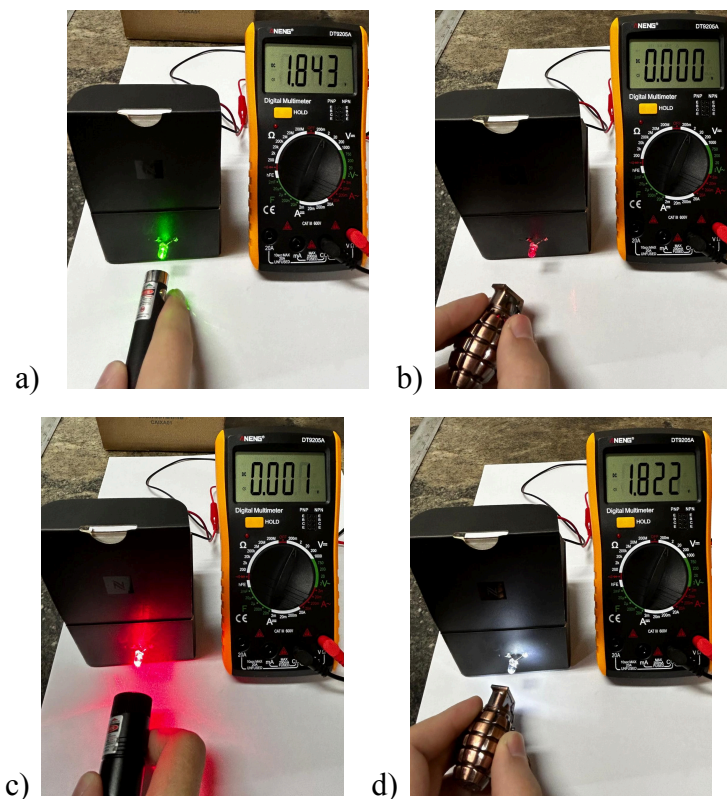


Figura 3.7: a) emissão de luz verde no LED verde; b) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED verde; c) emissão de luz vermelha de alta potência no LED verde; d) emissão de luz branca no LED verde.

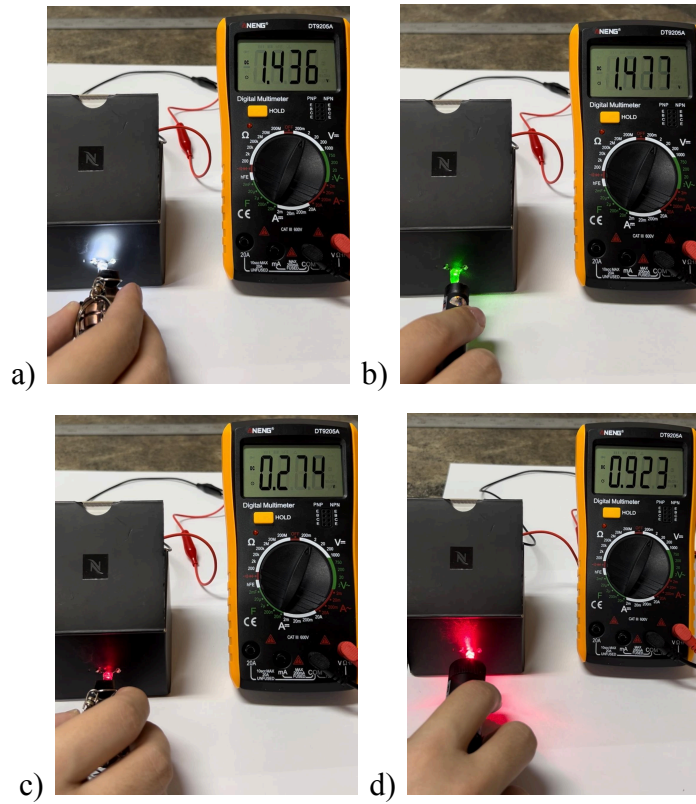


Figura 3.8: a) emissão de luz branca no LED vermelho; b) emissão de luz verde no LED vermelho; c) emissão de luz vermelha de baixa potência no LED vermelho; d) emissão de luz vermelha de alta potência no LED vermelho.

Capítulo 4

Sequência didática

Como observado à frente, a atividade está dividida em três momentos experimentais com debates, diálogos e perguntas para os alunos, anteriores e posteriores a cada um desses 3 momentos. Neste capítulo, explica-se de maneira mais detalhada a sequência didática dos experimentos e das intervenções do professor anteriores e posteriores a cada momento experimental.

Inicialmente, é proposta uma recapitulação dos conceitos de onda e partícula junto aos alunos. O professor pede para os alunos citarem características particulares das ondas e das partículas com exemplos, anotando-os no quadro. O objetivo é especialmente auxiliar os alunos a retomar essas diferenças drásticas da física clássica. Caso nenhum aluno destaque os fenômenos ondulatórios, o professor pode intervir ressaltando-os e lembrando-os, de maneira especial a difração e a interferência. Para realizar o devido contraste com a física das partículas, o professor pode ainda destacar o choque que ocorre no encontro entre duas partículas corpusculares como uma característica própria, destoando-o da interferência que ocorre quando há o encontro de duas ondas.

Após essa recapitulação, o professor se volta para a introdução do material pedagógico, lecionando sobre a história da discussão de natureza da luz. Esta parte pode servir tanto na forma de leitura da introdução do material, como uma explicação própria do professor da mesma introdução. Ao finalizá-la, o professor informa aos alunos a proposta principal da atividade: a definição e confirmação da natureza da luz.

A começar pelo experimento de difração e interferência, que confirma a natureza ondulatória da luz a partir da óptica clássica, o professor explica o que ocorrerá para os alunos responderem a primeira sequência de perguntas, o pré experimento. Explica-se que na sequência será emitida uma luz na parede sem um obstáculo no meio, depois irá se adicionar um obstáculo, sendo ele um fio de cabelo apoiado em uma base. Por fim, irá se alterar a fonte de luz, mudando a cor de luz incidida, para estudar se existe alguma diferença entre uma cor e outra. Após os alunos responderem as 3 perguntas no tempo estimado pelo professor, ocorrem os experimentos. Dependendo do tamanho da sala e da quantidade de alunos, pode ser interessante pedir para os estudantes que levantem e se aproximem do aparato, para visualizar melhor os resultados.

Primeiro, com a luz sem nenhum obstáculo emitida na parede não ocorrerá nenhuma peculiaridade, no entanto, quando o fio de cabelo é inserido entre a fonte e o anteparo, surge um padrão de interferência. Alinhar o laser emitido com o fio de cabelo pode ser complicado, por isso a base para o fio pode auxiliar nessa tarefa. Enquanto o professor controla o laser para se manter de maneira clara o padrão de interferência, ele pode pedir a um aluno com uma régua para medir a distância entre dois máximos consecutivos para essa fonte. Depois da medição e dos alunos anotarem o valor, o professor deve alterar a fonte para outro comprimento de onda, e pedir novamente para algum aluno medir a distância entre os máximos consecutivos e para os alunos anotarem esta resposta.

Este processo é necessário para os alunos visualizarem fenômenos classicamente ondulatórios na luz, e ainda associarem a diferença entre cores com a diferença de comprimento da onda da luz. Em seguida o professor pede que os alunos respondam em conjunto qual imaginam ser a natureza da luz após esse experimento, e por quê. Também é solicitado que os alunos respondam qual a diferença por eles observadas entre as fontes de cores diferentes. Após o diálogo entre os alunos, mediado pelo professor, o mesmo pede que todos se sentem para responder as perguntas sobre a análise dos dados.

Após o tempo determinado pelo professor, volta-se para a segunda etapa, o efeito fotovoltaico. O professor novamente faz uma introdução histórica, podendo ser lida ou explicada com suas palavras, agora quanto a uma descrição do início do século XX de Albert Einstein para fenômenos com resultados inesperados, que retoma a discussão quanto à natureza da luz.

Novamente, o professor explica o que ocorrerá experimentalmente, neste caso, que irá incidir uma fonte de luz laser verde sobre um LED também verde desligado, mas conectado a um voltímetro. Neste momento de explicação, o professor aproveita e testa o material mostrando para os alunos o LED conectado à bateria para confirmar sua cor e a voltagem lida pelo voltímetro sem a emissão de luz. Os alunos então respondem ao segundo pré-experimento, demonstrando suas expectativas de resultados.

Após as anotações, o professor novamente convida os alunos a levantarem e observarem o experimento. O voltímetro conectado ao LED desligado irá apontar uma voltagem nula, no entanto, ao incidir luz no LED a voltagem irá subir e se manter em valores expressivos, após um pequeno tempo de flutuações. O professor pede então que os alunos discutam o que ocorreu e como ocorreu.

Nesta discussão é possível que o professor tenha que realizar mais intervenções, chegando, no final, a trazer à tona o efeito fotovoltaico e explicar seu funcionamento. Para não utilizar

termos complexos e que atrapalhem o entendimento dos alunos, o professor pode explicar o fenômeno através do conceito de energia, justificando a aparição de voltagem como uma transmissão de energia da fonte luminosa para o LED. Este momento também pode ser interessante para exemplificar onde ocorre este mesmo efeito em momentos do cotidiano, explicando sobre as placas fotovoltaicas da energia solar. Pelas aplicações já realizadas, trazer esta aplicação prática intensifica significativamente o interesse dos alunos na prática como um todo. Após a discussão, os alunos são convidados a novamente se sentarem e responderem a segunda análise de dados.

Além de uma análise do resultado do experimento observado, este grupo de perguntas também servirá como pré-experimento para o último momento da atividade. Questionando aos alunos os acontecimentos, caso a fonte de luz ou o LED sejam trocados, já propõe-se a criação de hipóteses quanto à terceira etapa experimental da atividade. Esta então é explicada, e novamente os lasers e LEDs são testados.

O professor então refaz o experimento, agora, no entanto, emitindo a luz branca policromática sobre o LED verde, emitindo os lasers vermelhos de alta e baixa potência, e depois repetindo o experimento com as 4 fontes para o LED vermelho. A partir das práticas já realizadas, é destacável a surpresa dos alunos com a ausência de voltagem quando a luz vermelha de alta potência ilumina o LED verde e igualmente com a presença de voltagem quando a luz verde ilumina o LED vermelho.

Este momento é então definitivo, pois após os resultados experimentais, o professor pede para os alunos explicarem o que observaram e em diálogo procurarem justificativas para tais resultados. A grande discussão deve se pautar na ideia de que, a partir do conhecimento até então gerado nas aulas anteriores, e na própria atividade, o comprimento de uma onda (e consequentemente a cor da luz) não deveria intervir em sua energia, sendo somente sua amplitude definitiva para isso. De forma ainda mais inesperada, a luz laser verde pode levar a geração de energia quando emitida sobre um LED vermelho, e a luz laser vermelha de maior potência não leva a energia alguma quando emitida sobre um LED verde.

É improvável que sozinhos os alunos cheguem à conclusão de existir um erro na teoria física e afirmarem uma nova teoria válida para a natureza da luz. Entretanto, é importante que o professor preserve e promova esse diálogo ao máximo, para incentivar os alunos em suas gerações de hipóteses e construções de modelos. Em certo momento, porém, o professor muito provavelmente terá de intervir e lecionar sobre a dualidade onda -partícula para a sala.

Com esse momento de aprendizado, o professor pede que os alunos respondam a terceira e última análise dos dados levando ao fim da atividade. Existem pequenas variações possíveis a

partir dos contextos da turma e do colégio, sendo uma possibilidade o fim da atividade questionando se a mesma dualidade pode ocorrer em outros conceitos da física além da luz. Levando a possibilidade de estudo na aula seguinte da dualidade no elétron e no nêutron, caso estas façam parte do cronograma pensado pelo professor para o ano. Independentemente destas pequenas variações, o importante é que os alunos nesta atividade tenham possibilidade de gerarem hipóteses, discutirem resultados e ainda, a partir deles, compreenderem o que é a dualidade onda-partícula.

No anexo está o material proposto para utilização do professor ao desenvolver a atividade. Propõe-se que cada aluno tenha sua própria cópia deste material e a utilize tanto para responder quanto para acompanhar os procedimentos realizados ao longo do processo experimental. Destaca-se o papel do professor de, além de conduzir a aula seguindo este material, sugerir momentos de discussões, comentários e respostas públicas dos alunos ao longo da atividade. Especialmente nos momentos de pré-experimento, ocasionando assim diálogos saudáveis e construtivos entre a turma.

Referencial Bibliográfico:

Alves, A Uma abordagem para o ensino de dispositivos LED no ensino médio. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF). Instituto de física, UFGD. Dourados, MS, 2017

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acesso em: 12 de agosto de 2024

BRASIL. Ministério da Educação. Matriz de Referência ENEM Brasília, 2023. Disponível em: http://download.inep.gov.br/download/enem/matriz_referencia.pdf Acesso em: 17 de setembro, 2024.

Brockington, G, A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio. Dissertação Mestrado em Ensino de Ciências. Instituto de Física, ao Instituto de Química e Faculdade de Educação, USP, São Paulo, SP, 2005

Gil, D e Solbes, J, The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science, Department de Didàctica de les Ciències Experimentals, Universitat de Valencia, Spain, 1993

Gomes, C. Efeito da diabetes na visão como motivadora para ensino da Lei de Refração. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física. Instituto de Física. UFRJ. Rio de Janeiro, 2020.

Klassen, S, The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom, Sci & Educ, 20:719–731, 2011

Ostermann, F; Moreira, M. Uma Revisão Bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. *Investigações em Ensino de Ciências* – V5(1), pp. 23-48, 2000

Pontes, R. Ondas, Partículas e Luz: Uma Abordagem Fenomenológica. Dissertação Mestrado Profissional em Ensino de Física. Instituto de Física. UFRJ. Rio de Janeiro, 2019.

Siqueira, M; Montanha, L; Batista, C; Pietrocola, M. Obstáculos didáticos na inserção da Física Moderna e Contemporânea: um olhar a partir da formação de professores. *Revista Tecné, Episteme y Didaxis*. Bogotá, 2018.

Anexo

Material do aluno

A natureza da luz

Nome da escola: _____

Data: _____

Aluno: _____

Turma: _____ Professor: _____

1 Primeiro experimento: A Difração da luz

1.1. Introdução

Neste experimento, estudaremos uma questão central para a física durante os séculos XVII e XVIII: Qual a natureza da luz. Isaac Newton e Christiaan Huygens foram grandes físicos, que ao longo do século XVII tiveram um forte embate quanto à natureza da luz, se esta seria uma partícula corpuscular ou se sua natureza é ondulatória. Isaac Newton defendia que a luz teria uma natureza corpuscular, ou seja, seria feita de pequenos corpos materiais, enquanto Christiaan Huygens acreditava que o comportamento da luz seria similar ao de ondas como o som. Em 1801, ocorreu um dos grandes marcos desta discussão: O experimento de dupla fenda de Thomas Young.

Inspirados então neste experimento de Young, nesta atividade iremos testar as características da luz a partir da física clássica e, conseqüentemente, tentar defini-la como um fenômeno ondulatório ou um objeto corpuscular. Analisaremos as projeções de feixes lasers de diferentes cores em uma parede lisa em duas distintas situações. Sem um obstáculo e com um obstáculo no meio (um fio de cabelo), ambas a partir de uma mesma distância. Estudaremos a possibilidade de tanto o obstáculo quanto a mudança da cor levar a alguma alteração do resultado.

Caso ocorra alguma alteração, iremos medi-la para chegar a conclusões não somente quanto à natureza da luz, mas também a afirmações sobre suas características empíricas e quais grandezas físicas as definem.

1.2 Pré-experimento

1) O que você espera ver na parede sem o fio de cabelo no meio?

2) E com ele, como deve ficar?

3) Existirá alguma diferença se usarmos a luz verde ou a luz vermelha?

1.3. Procedimento experimental:

Material:

- . Ponteiro Laser Vermelho
- . Ponteiro Laser Verde
- . Um fio de cabelo comprido
- . Fita Adesiva
- . Base para o fio de cabelo
- . Régua

Procedimento:

1. Ligue o ponteiro Laser vermelho e aponte para uma parede lisa
2. Depois repita o procedimento com o fio de cabelo no meio do caminho em um ponto específico onde sua base esteja fixa (fixe a base onde está o fio de cabelo a uma distância aproximada de 1 m da parede).
3. Com a régua, marque a distância entre o máximo central e o logo seguinte na parede, e anote o valor obtido.
4. Repita então o processo usando agora o ponteiro laser verde, utilizando o mesmo apoio para o fio na mesma posição fixa.
5. Caso tenha alguma dificuldade de visualização, tente aproximar os ponteiros da parede deixando o padrão mais forte, no entanto caso seja necessária tal aproximação lembre-se de aproximar igualmente os dois lasers e anotar as distâncias dos máximos novamente.

1.4. Análise dos dados:

- 1) Os resultados foram próximos do que você esperava?

--

- 2) O fio de cabelo interferiu no experimento?

--

3) A partir do que foi observado neste experimento, você diria que a luz se comporta como uma onda ou como uma partícula?

4) Qual a distância encontrada entre o máximo central e o máximo seguinte com a fonte de luz vermelha? E com a fonte de luz verde?

5) Houve alguma alteração com a mudança da cor do laser do verde para o vermelho? Se sim, qual característica da luz levou a isto? O que define a "cor" da luz?

2 Segundo experimento: O efeito fotoelétrico

2.1. Introdução

Séculos após a discussão de Newton e Huygens ressurgiu a discussão quanto à natureza da luz a partir do surgimento da física moderna. Com os experimentos de Einstein e Planck percebem-se inesperados limites nas afirmações da física clássica e a natureza da luz é redefinida de forma surpreendente. Tal experimento propõe estudarmos e compreendermos esta nova definição a partir de peculiaridades de um

resultado surpreendente descoberto por Becquerel em 1839, e descrito por Albert Einstein no início do século seguinte.

Em nosso experimento, iluminaremos um LED desligado com luzes de diferentes cores e intensidades, conectando a esse LED um voltímetro. Observaremos se essa emissão de luz levará a alguma alteração na diferença de potencial elétrico medida pelo voltímetro nestes diferentes casos, objetificando identificar quais relações existem entre características da luz emitida e a diferença de potencial detectada.

2.2. Procedimento experimental para a luz verde:

Material:

LED Verde

Ponteiro Laser Verde

Multímetro

Cabo com Garra jacaré

Procedimentos:

1. Conectar o LED ao multímetro utilizando os cabos com garra jacaré e observar a medição da voltagem pelo multímetro.
2. Emitir o Laser verde em sua intensidade máxima diretamente no LED e observar o valor obtido de diferença de potencial medida pelo multímetro.

2.3. Análise dos dados para a luz verde:

- 1) A emissão de luz em cima do LED desligado mudou o valor de tensão aferida pelo multímetro?

--

2) Se mudarmos a amplitude (intensidade) da luz que incide sobre o LED, o que você acha que ocorrerá de diferente no experimento?

3) Se mudarmos o comprimento de onda (cor) da luz emitida, o que você acha que ocorrerá de diferente no experimento?

2.4. Procedimento experimental para mais fontes de luz:

Material:

LED Verde

LED Vermelho

Ponteiro Laser Verde

Ponteiro Laser Vermelho forte

Ponteiro Laser Vermelho fraco

Lanterna de luz branca

Multímetro

Cabo com Garra jacaré

Procedimentos:

3. Emitir o Laser vermelho de baixa intensidade no LED e observar o valor obtido de voltagem medida pelo multímetro.

3. Emitir o Laser vermelho de alta intensidade no LED e observar o valor obtido de voltagem medida pelo multímetro.

4. Emitir agora a lanterna branca diretamente no LED e observar o valor obtido de diferença de potencial medida pelo multímetro.

5. Trocar o LED verde por um LED vermelho e repetir o processo para as 4 luzes (verde, vermelha de alta intensidade, vermelha de baixa intensidade e branca).

2.5. Análise dos dados para mais fontes de luz:

1) Os resultados foram próximos do que você esperava?

2) A intensidade da luz interferiu no valor da voltagem? E o comprimento de onda (cor)?

3) O que podemos dizer sobre a natureza da luz a partir desse experimento?

4) Compare os resultados obtidos neste experimento com os obtidos no experimento passado. O que eles juntos dizem sobre a natureza da luz?