

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS**

JACKSON KAMPHORST LEAL DA SILVA

**UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A INTRODUÇÃO À MECÂNICA
QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO SOB A ÓTICA DE BACHELARD.**

**Bagé
Agosto, 2015.**

JACKSON KAMPHORST LEAL DA SILVA

UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA A INTRODUÇÃO À MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO SOB A ÓTICA DE BACHELARD.

Produção educacional apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ensino de Ciências da Fundação Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre Profissional em Ensino de Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Luiz Nedel.

**Bagé
Agosto, 2015.**

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	3
1 INTRODUÇÃO.....	5
2 ATIVIDADES.....	7
2.1 ATIVIDADES DE REVISÃO.....	9
2.2 REALISMO E ANTIRREALISMO NA FÍSICA QUÂNTICA.....	10
2.3 INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA ATRAVÉS DO EFEITO FOTOELÉTRICO.....	15
2.4 EXPERIMENTO MENTAL DA FENDA DUPLA COM ESFERAS. ATIVIDADE EXPERIMENTAL CONCRETA COM A “TÁBUA DE GALTON. EXPERIMENTO MENTAL OU CONCRETO COM ONDAS CIRCULARES NA CUBA DE ONDAS.....	23
2.5 EXPERIMENTOS CONCRETO DEMONSTRATIVO E MENTAL DA DUPLA FENDA COM A LUZ. EXPERIMENTOS DA DUPLA FENDA COM ELÉTRONS NÃO LOCALIZADOS E COM ELÉTRONS LOCALIZADOS.....	28
2.6 INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER.....	37
2.7 AVALIAÇÃO DAS ATIVIDADES ANTERIORES.....	54
3 CONCLUSÃO.....	61
4 REFERÊNCIAS.....	63
4.1 REFERÊNCIA UTILIZADA NESSE INSTRUMENTO EDUCACIONAL.....	63
4.2 REFERÊNCIAS UTILIZADAS NA DISSERTAÇÃO.....	63
APÊNDICE A –Texto de apoio sobre realismo e antirrealismo.....	68
APÊNDICE B – Texto de apoio sobre a interação entre a radiação e a matéria.....	72
APÊNDICE C – Texto de apoio para o estudo sobre dualidade onda-partícula.....	80
APÊNDICE D - Questões do teste de avaliação da aprendizagem.....	104
ANEXO A - Roteiro exploratório para o Interferômetro de Mach-Zehnder virtual.....	108

APRESENTAÇÃO

Essa sequência didática é consequência direta da dissertação de mestrado profissional, **UMA PROPOSTA DE ENSINO DE TÓPICOS DE MECÂNICA QUÂNTICA SOB A ÓTICA DE BACHELARD**, em ENSINO DE CIÊNCIAS da UNIVERSIDADE FEDERAL do PAMPA.

Aqui pretendemos transcrever a proposta educacional de nossa dissertação de uma forma mais sistemática e sucinta, de modo a possibilitar a sua replicação por professores do ensino médio sem a obrigatoriedade de uma leitura prévia da respectiva dissertação, embora, para um maior aprofundamento, sugerimos tal leitura.

Destacamos que nossa proposta, muito longe de se apresentar como uma receita é aberta às novas ideias e à criatividade dos professores que vierem a replicar essa sequência didática.

A sequência didática proposta está fundamentada na epistemologia histórica de Bachelard, onde se destacam os conceitos de obstáculos epistemológicos e racionalismo aplicado.

Salientamos que essa produção educacional foi precedida de uma pesquisa, feita por um grupo de pesquisa orientado pelo Professor Doutor Daniel Nedel na Universidade do Pampa (Unipampa), Campus Bagé/RS, que buscou identificar possíveis obstáculos epistemológicos presentes nos textos de Mecânica Quântica nos livros didáticos do Plano Nacional do Livro Didático (PNLD 2012 com validade até 2014).

Na elaboração dos textos de apoio, bem como na nossa prática pedagógica ao aplicar essa sequência didática, evitamos a utilização de elementos e argumentos que poderiam atuar como obstáculos epistemológicos, buscamos, também, a superação dos obstáculos epistemológicos já presentes nas concepções prévias e no pensar dos alunos.

Os documentos oficiais do MEC, DCNEM, PCN e PCN+, ao sugerirem a inserção de tópicos de física moderna e contemporânea na proposta de reforma do ensino médio justificam o presente trabalho.

É importante destacar que a inserção de tópicos de Mecânica Quântica no ensino médio não é uma unanimidade, não são poucos os professores e pesquisadores que compactuam com a ideia de que no ensino médio seria suficiente desenvolver apenas tópicos da Mecânica Clássica, delegando ao ensino universitário o estudo da Mecânica Quântica.

Frente a esta situação, destacamos que nossa proposta é de inserir no ensino médio apenas tópicos introdutórios, evitando maiores aprofundamentos matemáticos.

Na nossa sequência didática, antes de começar a apresentação dos tópicos de Mecânica Quântica, foi necessário realizarmos uma atividade de revisão, basicamente sobre três temas: os teoremas de conservação, ondas e eletromagnetismo. Decidimos, então, incluir essa revisão como uma das atividades de nossa sequência didática. Salientamos que esta revisão presente na nossa proposta goza de certa flexibilidade, tanto quanto aos temas, como ao grau de aprofundamento, dependendo no nível da turma na qual a sequência está sendo aplicada.

Além disso, foi necessário colocarmos em pauta a discussão sobre o realismo científico e o antirrealismo bem como um breve relato histórico deste debate filosófico, provendo desta forma uma base adequada para o entendimento das diversas interpretações da Mecânica Quântica, em especial a interpretação da Complementaridade. A necessidade deste debate filosófico também se justifica pelo fato de adotarmos uma visão filosófica não realista, em oposição à visão realista comumente presente nos livros didáticos, na elaboração e na aplicação de nosso trabalho e, também, por acreditarmos que tais abordagens filosóficas, de caráter ontológico e epistemológico, podem gerar estratégias e atividades que envolvam a imaginação e a abstração necessárias para o entendimento das novas teorias, bem como para a identificação da ruptura epistemológica existente entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica.

O foco principal desse trabalho é o estudo da questão da dualidade onda-partícula através do experimento da fenda dupla para elétrons e do interferômetro de Mach-Zehnder, para tanto, além das revisões e do debate filosófico já comentado, foi necessário o estudo da interação entre a radiação eletromagnética e a matéria, o qual foi apresentado através do efeito fotoelétrico sob a luz do postulado quântico.

1 INTRODUÇÃO

A elaboração desta sequência didática foi fundamentada na Epistemologia Histórica de Bachelard, onde o conceito de obstáculos epistemológicos assume grande relevância, visto que a análise destes obstáculos epistemológicos contribui para que se superem os obstáculos pedagógicos que impedem os alunos de compreenderem o conhecimento científico e os professores de compreenderem porque o aluno não aprende, bem como contribui para balizar a ação pedagógica de modo a não reforçar tais obstáculos.

Na educação, a noção de obstáculo epistemológico também é desconhecida. Acho surpreendente que os professores de ciências, mais do que os outros se possível fosse, não compreendam que alguém não compreenda. Poucos são os que se detiveram na psicologia do erro, da ignorância e irreflexão. (...) os professores de ciência imaginam que o espírito começa como uma aula, que é sempre possível reconstruir uma cultura falha pela repetição da lição, que se pode fazer entender uma demonstração repetindo-a ponto por ponto. Não levam em conta que o adolescente entra na aula de física com conhecimentos empíricos já constituídos: não se trata, portanto, de *adquirir* uma cultura experimental, mas sim de *mudar* de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana. (BACHELARD, 2011, p. 23).

Numa análise psicológica do progresso científico Bachelard coloca o problema do conhecimento científico em termos de obstáculos que surgem no âmago do próprio ato de conhecer, como uma espécie de imperativo funcional, lentidões e conflitos, os quais devem ser constantemente superados. A razão acomodada ao que já conhece, procura manter a continuidade do conhecimento, opondo-se à retificação dos erros ao introduzir analogias, metáforas e imagens no próprio ato de conhecer, com o fim de tornar familiar todo conhecimento abstrato, constituindo, assim, obstáculos epistemológicos. Tais obstáculos são identificados como epistemológicos, pois surgem no próprio ato de conhecer, numa relação entre o sujeito e o objeto do conhecimento.

Outro aspecto relevante da epistemologia de Bachelard, que no nosso entender merece ser destacado nesse trabalho, é o Racionalismo Aplicado por ele postulado. Trata-se de um racionalismo aplicado que evidencia a dialética entre o material e o racional, entre o empírico e o teórico, que se atualiza na ação polêmica incessante da razão e que se contrapõe ao formalismo e ao fixismo de uma razão una e indivisível, defendendo a multiplicidade dos elementos que estimulam e constituem a razão, a pluralidade das instâncias de pensamento e a reforma mútua dos conceitos e das experiências, num sentido oposto ao do racionalismo clássico.

O racionalismo aplicado é um racionalismo no qual o racional e o empírico se completam:

(...) o empirismo e o racionalismo estão ligados, no pensamento científico, por um estranho laço tão forte como o que une o prazer à dor. Com efeito, um deles triunfa dando razão ao outro: o empirismo precisa ser compreendido; o racionalismo precisa ser aplicado. Um empirismo sem leis claras, sem leis coordenadas, sem leis dedutivas não pode ser nem pensado, nem ensinado; um racionalismo sem provas palpáveis, sem aplicação à realidade imediata não pode convencer plenamente. Prova-se o valor real de uma lei empírica fazendo dela a base de um raciocínio. Legitima-se um raciocínio fazendo dele a base de uma experiência. A ciência, soma de provas e de experiências, soma de regras e de leis, soma de evidências e de factos, tem pois necessidade de uma filosofia com dois polos. Mais exactamente ela tem necessidade de um desenvolvimento dialéctico, porque cada noção se esclarece de uma forma complementar segundo dois pontos de vista filosóficos diferentes (BACHELARD, 1984, p.9).

Para um maior aprofundamento sobre a epistemologia de Bachelard sugerimos a leitura de nossa dissertação.

As sete atividades que dão forma a essa sequência didática são:

- 1º- Revisão: teoremas de conservação, ondas e eletromagnetismo.
- 2º- Realismo e Antirrealismo na Física Quântica (com texto de apoio).
- 3º- Interação radiação eletromagnética e matéria através do efeito fotoelétrico (com texto de apoio).
- 4º- Experimento metal da fenda dupla com “esferas” (corpúsculos), atividade experimental concreta com a “tábua de Galton” construídas pelos alunos. Experimento mental ou concreto (demonstrativo) da fenda dupla com ondas circulares na cuba de ondas. (com texto de apoio).
- 5º- Experimento concreto (demonstrativo) e experimento mental da fenda dupla com a luz. Experimento mental da fenda dupla com elétrons (não localizado). Experimento mental da fenda dupla com elétrons e com a determinação da fenda pela qual os elétrons passam (localizado). Interpretação da versão fraca da dualidade onda-partícula. (com texto de apoio).
- 6º- Interferômetro de Mach-Zehnder: em regime Clássico, em regime Quântico com trajetória indefinida e em regime Quântico com trajetória definida. Interpretação da versão forte da dualidade onda-partícula. Interpretações da Mecânica Quântica: ondulatória, corpuscular, dualista realista e complementaridade. Experimento da escolha demorada. (com texto de apoio)
- 7º- Avaliação dos resultados das atividades anteriores.

Cada uma dessas atividades foi desenvolvida em três horas aula de 45 minutos.

Destacamos, mais uma vez, que essa sequência não é fechada, ao contrário, ela é aberta às novas ideias e à criatividade dos professores que vierem a replicar essa sequência didática.

2 ATIVIDADES

O foco principal dessa sequência didática é o estudo da dualidade onda-partícula através do experimento da fenda dupla com elétrons e do experimento de Mach-Zehnder, no entanto, para viabilizar esse estudo foi necessário incluir nessa sequência didática outras atividades, tais como: uma atividade de revisão sobre os teoremas de conservação, ondas e eletromagnetismo; uma atividade sobre o debate filosófico entre o realismo e o antirrealismo e uma atividade sobre a interação entre a radiação e a matéria.

Esta sequência didática foi aplicada, durante o primeiro semestre do ano 2015, em uma turma do terceiro ano do ensino médio da Escola Estadual de Educação Básica Professor Justino Costa Quintana no decorrer de 21 horas aulas, através de aulas expositivas dialogadas intercaladas por experimentos mentais e concretos demonstrativos. Trata-se de uma turma de aproximadamente 20 alunos do turno da noite.

Cada uma das atividades foi realizada em 3 horas aula de aproximadamente 45 minutos cada, duas aulas numa sexta feira e uma aula na segunda feira.

A estratégia adotada foi de desenvolver o conteúdo nas duas aulas de sexta feira e na aula da segunda feira retomar, de forma breve, o conteúdo desenvolvido promovendo a discussão dos pontos polêmicos.

É importante salientar que a nossa escola está, atualmente, com o prédio interditado e que essa interdição já se estende por dois anos. A nossa escola, portanto, está atuando em prédios “emprestados”, o que por si só provoca constrangimentos a toda comunidade escolar, pois a falta de identidade é um sentimento comum a todos. A operacionalidade também ficou dificultada, pois não tivemos a disposição nossa biblioteca e a nossa sala de informática. Assim, as atividades com o Interferômetro Mach-Zehnder virtual ficaram impossibilitadas, no entanto, essas atividades foram feitas de modo demonstrativo com a utilização do data show e foi possibilitado o link para os alunos que quisessem aprofundar seus conhecimentos sobre este interferômetro bem como um roteiro para explorar o mesmo.

Por outro lado, nosso trabalho foi facilitado pelo fato do professor pesquisador ter sido professor desses alunos nas duas séries subsequentes (1º e 2º anos do EM) e, no presente ano, professor de “seminários integrados” dessa turma do 3º ano do EM, o que nos permitiu uma maior mobilidade e flexibilidade na aplicação das propostas pedagógicas.

Utilizamos na aplicação da sequência didática proposta os seguintes materiais pedagógicos: textos de apoio, quadro negro, data show e notebook para a apresentação de

slides, bem como, para a projeção de filmes e animações (youtube) relacionados com os assuntos das respectivas aulas.

Os textos de apoio buscam facilitar o acompanhamento por parte dos alunos e orientar os professores que vierem a reaplicar esta sequência. Na nossa dissertação os textos de apoio estão nos apêndices. No entanto, nessa produção educacional, os textos de apoio, além de aparecerem nos apêndices, aparecem, também, no desenvolvimento das atividades através de recortes dos respectivos textos de apoio. A intenção de apresentar esses recortes durante as atividades é facilitar a prática do professor, já a intenção de apresentar os textos de apoio completos nos apêndices é facilitar a sua reprodução para um acompanhamento mais efetivo por parte dos alunos.

A seguir faremos uma descrição das atividades que compõe essa sequência didática.

2.1 ATIVIDADES DE REVISÃO

Essa revisão se fez necessária, particularmente, devido à fragilidade e heterogeneidade da turma na qual estávamos trabalhando.

Incluimos nessa revisão três temas fundamentais para o entendimento da dualidade onda partícula: os teoremas de conservação, ondas e eletromagnetismo.

Os teoremas da conservação da energia e da conservação da quantidade de movimento são fundamentais para o entendimento das interações partícula-partícula e onda-partícula, que por sua vez, favorece o entendimento das interações das radiações eletromagnéticas com a matéria, dado que nessas interações ocorrem transferências tanto de energia como de momento (quantidade de movimento).

Destacamos, aqui, a necessidade de exemplificar as interações do tipo partícula-partícula (PP) e do tipo onda-partícula (OP), destacando o intervalo de tempo envolvido nessas interações. As interações do tipo OP decorrem num intervalo de tempo diferente de zero, enquanto que as interações do tipo PP são praticamente instantâneas e isso é uma das indicações de que a interação da luz com a matéria no efeito fotoelétrico é do tipo OP, ou seja, um fenômeno corpuscular. Assim estaremos favorecendo o estudo das interações eletromagnéticas com a matéria que será desenvolvido na terceira atividade.

Na revisão sobre ondas, destacamos principalmente os fenômenos ondulatórios, dos quais priorizamos os fenômenos da interferência e da difração, visto que a experiência da fenda dupla e a experiência com o interferômetro de Mach-Zehnder exigem esses conhecimentos.

No estudo sobre o eletromagnetismo buscamos reafirmar a luz como uma radiação eletromagnética.

É possível utilizar animações sobre os fenômenos ondulatórios de caráter livre encontrados no *youtube* para enriquecer as atividades de revisão.

2.2 REALISMO E ANTIRREALISMO NA FÍSICA QUÂNTICA.

A discussão proposta nessa atividade tem o propósito de fomentar discussões acerca de aspectos filosóficos sobre a realidade e a objetividade da natureza, bem como, fornecer aos alunos os subsídios necessários para uma melhor compreensão do princípio da complementaridade de Bohr e a sua principal diferença em relação às interpretações realistas da Mecânica Quântica. Favorecendo, dessa forma, o entendimento da dualidade onda-partícula.

Tal propósito será alcançado através do aprofundamento à compreensão da realidade física polarizado pelas posições filosóficas antagônicas realismo e antirrealismo e do aprofundamento das discussões sobre as origens e os limites do conhecimento.

Ao término dessa atividade o aluno deverá ser capaz de exercer uma reflexão crítica acerca da “Realidade”, além da realidade cotidiana e imediata e corresponder as representações sobre a realidade e a própria realidade, transformando, dessa forma, a imagem da realidade. Deverá, também, ser capaz de compreender que o avanço do conhecimento científico faz com que, cada vez mais, ele se diferencie do real observado e que as representações da realidade criadas pela ciência são cada vez mais abstratas.

Por fim, ao término dessa atividade, o aluno deverá ser capaz de caracterizar e diferenciar Realismo e Antirrealismo.

Sugerimos, para provocar esse estudo sobre a realidade, dois filmes, que se encontram “livre” no youtube: Matrix e o Show de Truman. Existem muitos outros filmes que podem atuar como elemento provocador para essa discussão.

A seguir destacaremos o texto de apoio para o desenvolvimento dessa atividade.

O realismo científico e o antirrealismo

Na primeira metade do século XX surge a Mecânica Quântica, como uma nova maneira de enxergar o mundo, que num primeiro momento parece estar em desacordo com as teorias da física clássica e em total desacordo com o senso comum. Para o seu entendimento são necessárias novas ideias, novos pensamentos e uma nova percepção das coisas, visto que a noção de natureza, na Mecânica Quântica, parece estar além da imaginação. A grande relevância da imaginação nas ciências de um modo geral é destacada por Richard Feynman:

Eu lhes peço que imaginem os campos magnéticos e elétricos. O que fazem? Sabem como? Que eu vejo normalmente? Quais são as exigências da imaginação científica? É algo diferente de imaginar uma sala cheia de anjos invisíveis? Não, não é como imaginar anjos invisíveis. É necessário um grau maior de imaginação para compreender o campo eletromagnético que para compreender anjos invisíveis. Por quê? Porque para se compreender os anjos invisíveis, tudo o que tenho que fazer é alterar suas propriedades um pouquinho – imagino-os ligeiramente visíveis e então posso ver as formas de suas asas e de seus corpos. Uma vez que consigo imaginar um anjo visível, a abstração necessária – que torne os anjos quase invisíveis é imaginá-los completamente invisíveis – é relativamente fácil. Então vocês dirão: “professor, me dê uma descrição completa de ondas eletromagnéticas, embora seja ligeiramente inexata, de modo que eu possa vê-las como posso ver os anjos invisíveis.” Eu sinto que não posso fazer isso. Não sei como fazê-lo. Não tenho nenhuma imagem do campo eletromagnético que de algum modo seja precisa. [...] Nossa ciência apresenta terríveis dificuldades de imaginação. O grau de imaginação necessário é muito mais extremo que o necessário para algumas ideias antigas. As ideias modernas são muito difíceis de imaginar. E usamos muitas ferramentas. Usamos equações e regras matemáticas e construímos um montão de imagens. [...] Se deve ter suficiente imaginação para se conceber algo que nunca tenha sido visto ou ouvido (FEYNMAN, 1964, p.20 apud BROCKINGTON, 2005, p.27).

No contexto da Mecânica Quântica a relação do homem com a natureza é modificada, abrindo espaço para uma profunda análise das concepções de ciência e sua capacidade de construção de imagens da realidade, concomitantemente com um importante debate filosófico. Na mecânica quântica a resposta à pergunta: o que é real, não é tão simples.

Deste debate, principalmente sobre a existência ou não de uma realidade independente e da possível possibilidade de acessá-la, surgiram duas correntes filosóficas antagônicas que buscam, ambas, compreender e revelar as relações entre o conhecimento humano e a realidade ao qual o conhecimento se refere: o Realismo e o Antirrealismo.

O realismo sustenta que o mundo físico existe independentemente do pensamento e da percepção humana, diferenciando o que existe realmente e o que se acredita que existe. O antirrealismo, ao contrário, afirma que o mundo físico é de algum modo dependente da atividade consciente dos seres humanos.

Para muitas pessoas, o realismo parece mais plausível do que o antirrealismo. Pois o realismo se acomoda bem à perspectiva do senso comum de que os fatos sobre o mundo estão “lá fora” esperando serem descobertos por nós, ao passo que o antirrealismo não.

É possível distinguir o realismo em um sentido ontológico, relativo às essências das coisas, cuja tese defende a existência de uma realidade independente de nossa mente, de nossa observação e em um sentido epistemológico, relativo ao conhecimento, que defende a tese que é possível conhecer esta realidade e que a teoria científica também se aplica para a realidade não observada. Ao considerar o conhecimento científico o realismo epistemológico assume a forma do chamado realismo científico.

Na visão realista, apesar do ser humano criar representações mentais e linguísticas, ao eliminar-se o sujeito e a consciência, esta realidade autônoma continuará existindo.

No século XIX o termo *realismo* surgiu principalmente nas artes como reação ao *romantismo*, realçando o cotidiano e o social, se colocando numa posição política mais progressista. Particularmente nas ciências o realismo desta época estava associado ao mecanicismo e ao atomismo, valorizando a quantificação e o método hipotético-dedutivo, em oposição ao positivismo de Comte que defendia a tese de que qualquer especulação sobre mecanismos ocultos deveria ser evitada. Para o positivismo só teria sentido tecer afirmações sobre o que é observável ou verificável e a análise da realidade deve ser feita através das observações e das constatações racionais.

Já no século XX, particularmente no final da década de 1920, se estabelece uma nova Mecânica Quântica, e todas tentativas realistas para interpretá-la fracassam. A visão que se impõe quase unânime destaca uma conexão íntima entre o sujeito e o objeto e na década de 1930 diversas correntes idealistas (antirrealistas) propõe a inseparabilidade entre o sujeito e o objeto.

Após a segunda grande guerra ocorre uma reação às interpretações idealistas da Mecânica Quântica por uma visão que eliminasse o observador humano da descrição quântica da natureza, tal visão, realista objetivista, concebe uma realidade que pode ser descrita mesmo na situação em que não haja observador.

Já na década de 1990, quando parecia que o sujeito poderia ser eliminado da Mecânica Quântica, ressurgem as posições idealistas (antirrealistas).

Na história da Mecânica Quântica o antirrealismo nos leva a noção de complementaridade defendida por Bohr em 1928: “uma realidade independente no sentido físico ordinário não pode ser atribuída nem aos fenômenos, nem aos agentes de observação”. Bohr defendia que a teoria só trata do observável, isto é, uma realidade não-observada pode até existir, mas ela não é descritível pela linguagem humana. A posição de Bohr modifica-se a partir de 1935 quando passa a dar ênfase para o “todo” do arranjo experimental. Junto com esta concepção de totalidade Bohr também defende uma concepção “relacionista” segundo a qual a realidade observada é fruto da relação entre o sujeito e o objeto, sendo dependente das escolhas e da vontade do observador.

Esta noção de complementaridade defendida por Bohr vem a se constituir na interpretação da complementaridade (ortodoxa ou de Copenhague), a qual é, atualmente, a interpretação da mecânica quântica mais aceita pela comunidade científica.

A metáfora da árvore:

Essa metáfora tem suas limitações, pois trata-se de um fenômeno macroscópico em vez de escala atômica, nível no qual a Teoria Quântica é empregada. No entanto, o papel do observador (em uma abordagem mais filosófica sobre a realidade física) foi discutido de diversas formas por vários cientistas que contribuíram com a Teoria Quântica.

Que som faz uma árvore ao cair se não houver ninguém para ouvi-la?

Provavelmente não há uma única e correta resposta a essa pergunta, mas é possível traçar um paralelo entre as várias correntes filosóficas e as respostas dada a esta pergunta.

Alguns defendem que a árvore ao cair emiti o mesmo som que sempre emitiu, haja alguém para ouvir ou não. É uma concepção de **realismo**, num entendimento de que existe uma realidade independente, exterior à mente humana e a sua percepção. Nesse sentido, com frequência, a concepção realista está associada a uma visão determinística, o que significa que qualquer consequência pode ser explicada por uma causa bem determinada.

Os defensores da visão **antirrealista** diriam que a árvore pode emitir múltiplos sons ao cair, ou mesmo não emitir som algum, e que descrever esse fenômeno envolve considerar todas as alternativas. Somente ao estar lá para escutá-la é que a presença ou a ausência de som ganha existência. Em outras palavras, observar a queda da árvore é que determina o seu estado, se ele emite ou não som ao cair (e qual som). É, de certo modo, o que faz a interpretação de Copenhague, expressão que se refere ao entendimento que Bohr e seus seguidores deram à Mecânica Quântica. Nela, rejeita-se a ideia de uma realidade objetiva que independe do observador; é a nossa forma de medição que define a natureza do que é medido. E isso não caracteriza uma contradição da natureza, mas um sentido de complementaridade em que todos os estados a formam. É possível dizer que esta posição está ligada com uma espécie de idealismo, corrente para a qual o mundo físico depende de algum modo da atividade consciente dos seres humanos.

Outras correntes, que podem estar interligadas com as anteriores e entre si, são as do Instrumentalismo e do Empirismo.

Para o **Instrumentalismo**, pouco importa se a árvore iria ou não fazer barulho e qual seria se ninguém estivesse ouvindo, pois o importante era que o modelo utilizado para descrever sua queda funcionava e, quando alguém a ouvia, era o som predito pelo modelo.

Segundo essa visão, a Física Quântica importa-se apenas com a capacidade de previsão de seus resultados. Sua formulação é capaz de explicar ou descrever os fenômenos estudados, não havendo necessidade de buscar uma interpretação ou uma existência real para os conceitos utilizados ao se fazer isso.

Para o **Empirismo**, a própria pergunta não faria sentido, pois somente as observações seriam um modo seguro de se ter conhecimento. Se não havia ninguém para ouvir a árvore, não haveria como saber o som que ela faria. Portanto, se não existir um meio de verificar se uma sentença é verdadeira ou falsa, não faz sentido se preocupar com tal questão.

2.3 INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA ATRAVÉS DO EFEITO FOTOELÉTRICO.

A intenção principal desta atividade é enunciar o postulado quântico e identificar a ruptura entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica, destacando que existem fenômenos que a Física Clássica não consegue explicar e que as teorias são aplicáveis em determinados contextos, isto é, se num determinado contexto uma teoria faz previsões errôneas, não há alternativa além de utilizar novas teorias, como a Mecânica Quântica, por exemplo.

A seguir apresentamos o texto de apoio referente a essa atividade:

Interação entre a radiação e a matéria

Objetos da Física Clássica

Na Física Clássica temos dois tipos de objetos cujos conceitos são familiares: os corpúsculos e as ondas.

Os corpúsculos (partículas) são entidades puntiformes bem localizados numa determinada região e em qualquer instante sua posição, sua velocidade e sua trajetória são bem determinadas, apresentando dimensões desprezíveis, isto é, em condições normais não se dividem (indivisibilidade).

As ondas são concebidas pela física clássica como excitações que se propagam em um meio transportando energia e informação, que se identificam com o movimento oscilatório das partículas do meio. Ao contrário dos corpúsculos, as ondas não estão bem localizadas, elas são espalhadas ocupando certa região espacial, apresentando, por tanto, um movimento deslocalizado. Outra diferença relevante é o fato das ondas não apresentarem a característica de serem indivisíveis.

Nas interações entre partículas a troca de energia ocorre instantaneamente, em pancadas ($\Delta t = 0$), como nas colisões. Já as interações entre ondas é bastante diferente visto que elas interferem umas com as outras. A maneira como as ondas transferem energia também é diferente do caso das partículas, pois elas estão espalhadas numa determinada região do espaço e é necessário um determinado intervalo de tempo diferente de zero para que se efetue a transferência de energia ($\Delta t \neq 0$). Esta transferência se dá continuamente. Para exemplificar esta segunda situação, consideramos um barril flutuando no mar durante a passagem de uma onda, a transferência de energia da onda para o barril é contínua (não em pancadas) e

necessita de certo tempo diferente de zero. Importante lembrar que a energia de uma onda é proporcional a sua amplitude.

Radiação Eletromagnética

As radiações eletromagnéticas, por verificarem vários fenômenos ondulatórios (reflexão, refração, difração, interferência, polarização) são consideradas ondas eletromagnéticas e transportam energia através do espaço da mesma forma que qualquer onda transporta energia. As ondas eletromagnéticas são constituídas por campos elétricos e magnéticos oscilantes. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo é igual à velocidade da luz, ou seja, 300.000 km/s. A sua intensidade é proporcional à amplitude dos campos elétrico e magnéticos. Quanto maior a intensidade, maior a energia transportada pela onda.

O **espectro eletromagnético** representa o **conjunto de todas as ondas eletromagnéticas de diferentes frequências**. Algumas são visíveis, podendo ser captadas pelo olho humano, no entanto, a maior parte delas é invisível aos nossos olhos. Ele encontra-se dividido em zonas distintas: frequência extremamente baixa; frequência muito baixa; ondas de rádio; micro-ondas; infravermelhos; luz visível; raios ultravioletas; raios X, raios Gama.

Fig. 1 - Espectro eletromagnético em função da frequência e do comprimento de onda

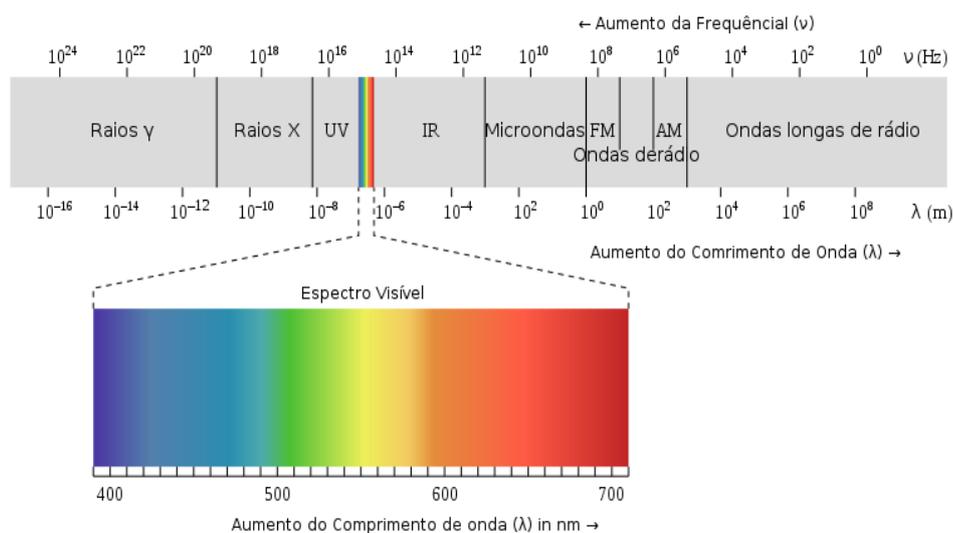
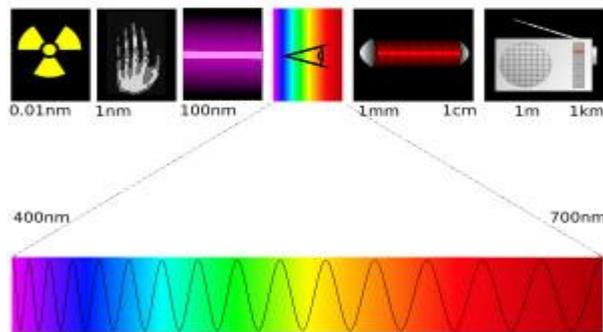


Fig. 2 - Espectro eletromagnético em função do comprimento de onda



Efeito Fotoelétrico

A teoria do eletromagnetismo elaborada por Maxwell, que estabelece que a luz é uma onda eletromagnética, foi confirmada experimentalmente por Hertz em 1888. Esta teoria faz parte de um dos pilares da física clássica. No entanto, a teoria clássica do eletromagnetismo começou a demonstrar certa fragilidade a partir de uma observação experimental, também realizada por Hertz ao estudar as descargas elétricas entre duas esferas de zinco. Hertz observou que era muito mais fácil obter as descargas elétricas entre as esferas quando uma delas era iluminada com luz ultravioleta, donde concluiu que a luz poderia interferir nas propriedades elétricas dos objetos.

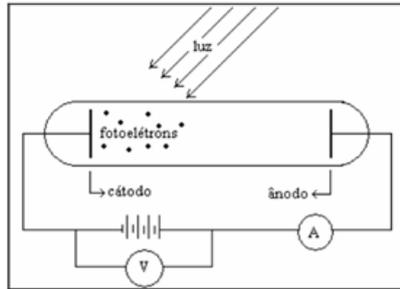
Em 1889, Thomson explicou esse efeito, postulando que a descarga era facilitada devido à emissão de elétrons do metal quando iluminado por luz ultravioleta.

A liberação de elétrons devido à incidência de luz é o que determinamos atualmente como efeito fotoelétrico. O efeito é devido basicamente devido à transferência de energia da radiação para os elétrons que estão sendo incididos.

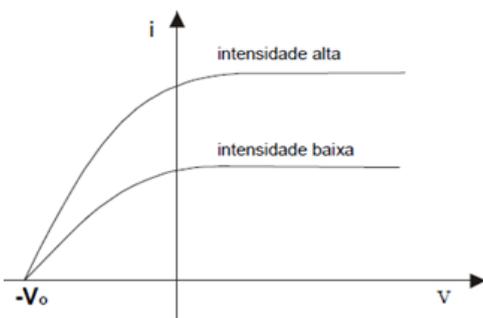
Nosso estudo sobre o efeito fotoelétrico será feito através da experiência feita por Philipp Lenard que investigou mais detalhadamente as suas características em 1902, destacando o que pode ser explicado, bem como, o que não pode ser explicado pela teoria clássica do eletromagnetismo.

Em um recipiente de vidro com vácuo, ele incidiu de cada vez luz de diversas cores (ou seja, diversas frequências), sobre a placa emissora (cátodo). Ele media então a corrente elétrica que era captada pela placa coletora (ânodo). O esquema desta experiência está representado na figura abaixo:

Fig. 3 - Aparato experimental para verificação do efeito fotoelétrico



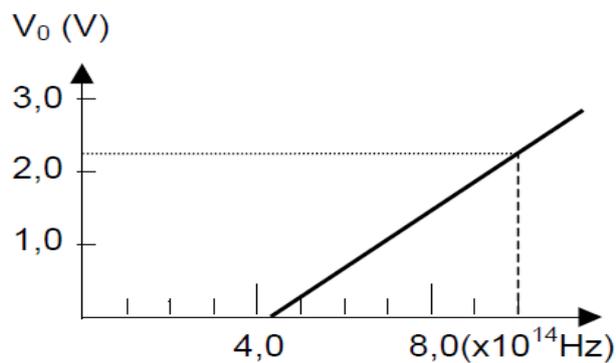
O potencial da fonte de tensão é ajustável, podendo inclusive fornecer potenciais negativos. Se o potencial aplicado for nulo, os elétrons serão ejetados, no cátodo pela incidência de luz, nas mais variadas direções e com diferentes energias, podendo, alguns deles, chegarem ao ânodo, e outros não. O aumento do potencial aplicado faz com que todos os elétrons liberados sigam acelerados em direção ao ânodo, aumentando a corrente registrada no amperímetro. Um pequeno aumento no potencial já é suficiente para que todos os elétrons se orientem em direção ao ânodo e cheguem ao ânodo, de tal forma que aumentos maiores no potencial aplicado não influem na corrente medida, a qual praticamente se mantém constante. Com a aplicação de um potencial negativo, alguns elétrons retornam ao cátodo. Este potencial negativo pode assumir um determinado valor que anule a corrente registrada no amperímetro. Este potencial, que anula a corrente, é denominado potencial de parada ou, ainda, potencial de corte (V_0). Verifica-se a seguinte relação entre o a intensidade da corrente e o potencial de corte, observe que a figura mostra, também, a relação entre a intensidade da radiação incidente e o potencial de corte:

Fig.4 – Gráfico i versus V 

Note que estranhamente o potencial de corte não depende da intensidade da radiação. Lembrem que a energia de uma onda é proporcional a sua intensidade. Logo, pensando classicamente, este resultado significa que a energia dos elétrons ejetados não depende da energia que recebem da onda incidente. Como explicar este fato?

Ainda de acordo com a teoria clássica, o efeito fotoelétrico deveria acontecer para qualquer frequência da luz incidente. No experimento de Lenard foi observada a existência de uma frequência mínima da radiação incidente capaz de liberar elétrons do material que constitui o ânodo. Para valores menores do que esta frequência não ocorre a liberação de elétrons. Esta frequência mínima é denominada frequência de corte f_0 . Os resultados experimentais mostram a seguinte relação entre o potencial de corte e a frequência:

Figura 5 - gráfico do potencial de frenagem para o sódio em função da frequência



Ou seja, o potencial de corte não depende da intensidade da onda incidente, mas depende linearmente da frequência, sendo que o efeito só é observado a partir de certa frequência. Isto implica que a energia dos elétrons ejetados depende da frequência da luz incidente, contrariando a física clássica. Lembramos que segundo a física clássica, que a energia dos elétrons ejetados não deveria depender da frequência da onda incidente e sim da sua intensidade.

A experiência ainda demonstra mais um problema para a física clássica. Como a interação é uma interação entre uma onda e uma partícula, deveria haver um tempo para o que os elétrons recebessem a energia da onda e fossem emitidos. Este tempo não é verificado.

Resumindo: pela teoria clássica, um aumento na intensidade da radiação incidente deveria provocar um aumento na energia cinética dos elétrons ejetados, visto que eles estariam recebendo uma quantidade maior de energia. Também deveríamos observar um tempo entre a incidência da radiação e emissão do elétron, pois se trata de uma interação onda-partícula. Por fim, para uma dada intensidade, o efeito deveria ocorrer para qualquer frequência. No entanto, observamos o seguinte:

- a) A energia cinética dos elétrons emitidos não depende da intensidade da radiação incidente e sim da frequência.
- b) Não existe um tempo detectável entre a emissão do elétron e incidência da radiação.
- c) Existe uma frequência de corte, abaixo da qual não ocorre o efeito.

Estes três fatos nos levam a concluir que a interação entre a radiação e a matéria, nesta experiência, não é do tipo onda-partícula como descrita anteriormente. Esta experiência evidencia um postulado central da mecânica quântica: o postulado quântico. Este postulado afirma que as interações fundamentais da natureza (neste caso a interação eletromagnética) são discretizadas. Em outras palavras: no mundo microscópico, a interação entre radiação (onda eletromagnética) e matéria (elétrons) se dá através de pacotes de energia, como se fosse uma interação do tipo partícula-partícula. Para cada interação fundamental interpretamos este pacote de energia (também chamado de quantum de energia) como uma partícula associada à interação. No caso da interação eletromagnética, esta partícula é chamada de fóton. Falaremos brevemente sobre as demais interações a seguir.

Para explicar quantitativamente o efeito fotoelétrico, cada pacote de energia (fóton) tem que ter uma energia proporcional à frequência da radiação, dada pela relação:

$$E_{\text{fóton}} = h \cdot f.$$

A constante de proporcionalidade h é conhecida como sendo a constante de Planck, cujo valor é $4,2 \times 10^{-15}$ eV.s ou $6,6 \times 10^{-34}$ J.s Esta é a constante fundamental que determina o limite onde a mecânica clássica não pode ser aplicada.

Notem que a constante de Planck tem um valor muito pequeno em relação à escala humana, da ordem de 10^{-34} em J.s. Para termos ideia, soltemos um bloco de 1 kg de altura de 1 m. O bloco demora aproximadamente 0,4 segundos para chegar ao solo e a energia

mecânica do bloco é da ordem de 10 Joule. Logo a escala típica de energia vezes tempo deste problema macroscópico é de $10 \times 0,4$ Js. Compare com a constante de Planck!

Devido ao valor muito pequeno da constante de Planck, a discretização da energia fornecida pela radiação aos elétrons só é evidenciada em altas frequências (veja equação acima). Por sua vez, altas frequências implicam em pequenos comprimentos de onda. Pequenos comprimentos de onda só podem ser medidos em escalas de distância muito pequenas. Logo, evidenciamos que no fim, a discretização da interação entre a radiação e a matéria só é observada em escalas muito pequenas de distância.

Grandezas Quantizadas e as Interações fundamentais da Natureza

A palavra *quantum* (plural = *quanta*) é uma palavra latina e significa *quantidade*. Em física a palavra quantum é usada para designar a menor quantidade em que uma grandeza ou propriedade é encontrada na natureza.

Um bom exemplo de grandeza quantizada é a carga elétrica. A menor unidade com que a carga elétrica aparece livremente na natureza, denominada carga elementar, é a carga do elétron, ou do próton (que diferem em sinais). Dessa maneira cargas elétricas só existirão em números múltiplos da carga elementar ($Q = n.e$). Grandezas com essa característica, múltiplos de um *quantum*, são ditas quantizadas ou discretizadas. Exemplos: carga elétrica, energia, massa, radiação.

É possível fazer uma analogia com conjuntos numéricos: grandezas contínuas com o conjunto dos números Reais e as quantizadas com o conjunto dos números Naturais.

O postulado quântico, evidenciado no efeito fotoelétrico afirma que as interações fundamentais da natureza, quando observadas em escalas microscópicas, são discretizadas. Isto significa que, como discutido anteriormente, todas as interações podem ser entendidas num modelo de interação do tipo partícula-partícula. Importante lembrar que este é um modelo para entendermos, usando a linguagem que estamos acostumados (a linguagem clássica), como as interações fundamentais “funcionam”, no nível microscópico (discutiremos mais sobre o uso da linguagem clássica no próximo texto de apoio). As partículas associadas à interação (o quantum de energia) são chamadas de os quanta da interação. Os quanta da interação eletromagnética são os fótons, mas e as demais interações?

Na natureza existem quatro interações fundamentais. O eletromagnetismo é a interação que estudamos no efeito fotoelétrico. Ainda temos:

a) nuclear forte, que atua somente dentro dos núcleos atômicos. Os quanta da interação nuclear forte são chamados de Gluons.

b) a interação nuclear fraca, que também atuam somente dentro dos núcleos atômicos. Os quanta da interação nuclear fraca são chamados de W^+ , W^- e Z^0 .

c) A interação gravitacional. Quais são os quanta da interação gravitacional? Ainda não foi feita uma experiência que se detecta a discretização da interação gravitacional. Tampouco entendemos do ponto de vista teórica quando conciliar a interação gravitacional com o postulado quântico. Este é um dos maiores problemas da física atual.

Ao fim dessa atividade o aluno deverá ser capaz de:

- Definir o efeito fotoelétrico;
- Concluir que a ejeção de elétrons não depende da Intensidade da radiação incidente, contrariando o eletromagnetismo clássico;
- Concluir que a ejeção de elétrons depende da frequência da radiação incidente.
- Conceituar frequência de corte (f_0) e potencial de corte (V_0);
- Relacionar a energia cinética dos elétrons ejetados com a frequência de corte f_0 .
- Relacionar o potencial de corte V_0 com as frequências;
- Compreender que nesse experimento o fenômeno é corpuscular e que a radiação é constituída de pequenos pacotes de energias (fótons);
- Relacionar a energia de cada fóton com sua frequência e com a constante de Planck;
- Reconhecer que os fenômenos envolvendo a radiação eletromagnética, dependendo arranjo experimental, pode ser ondulatório ou corpuscular;
- Extrapolar esse comportamento dual às partículas materiais.
- Perceber que a ordem de grandeza da constante de Planck não pertence à escala de ordem de grandeza humana e que a mesma pode ser encarada como limite de aplicação da física clássica;
- Enunciar o postulado quântico;
- Identificar a ruptura entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica.

A seguir apresentaremos as atividades relacionadas com a dupla fenda. A quarta atividade envolve a dupla fenda com objetos clássicos e a quinta atividade, com objetos quânticos.

2.4 EXPERIMENTO MENTAL DA FENDA DUPLA COM ESFERAS. ATIVIDADE EXPERIMENTAL CONCRETA COM A “TÁBUA DE GALTON. EXPERIMENTO MENTAL OU CONCRETO COM ONDAS CIRCULARES NA CUBA DE ONDAS.

O Experimento da tábua de Galton foi incluído nessa sequência didática, basicamente com duas intenções. Primeira, possibilitar aos alunos um contato com experimentos que envolvam o conceito de probabilidade e de distribuição de probabilidade, visto que na tábua de Galton a quantidade de esferas em cada coluna representa a probabilidade de uma determinada esfera ocupar tal posição e o conjunto das posições forma uma curva normal de distribuição. Essa curva representará a distribuição de probabilidades para cada experiência individual com cada uma das esferas de se alcançar certo local possível de repouso no fundo da tábua. Segunda, destacar que o aparato experimental faz parte do fenômeno estudado, visto que, retirando um prego da tábua a probabilidade para cada experiência individual com cada uma das esferas será alterada, quer a esfera se aproxime efetivamente de onde retiramos o prego, ou não. Assim, podemos perguntar: "como é que a esfera 'sabe' que se retirou um prego se ela nunca se aproxima desse local?". A resposta é que a esfera não "sabe"; mas a tábua no seu todo "sabe" e altera a distribuição de probabilidades, ou propensão, para cada esfera, fato que pode ser testado por testes estatísticos.

Destacamos que a distribuição de esferas obtidas para a tábua de Galton sem um prego pode servir de análogo à experiência da dupla fenda, e a distribuição de esferas obtidas para uma tábua de Galton normal pode servir como análogo à experiência de difração por uma única fenda. Estas analogias foram utilizadas por Karl Popper para defender sua posição realista sobre a experiência da dupla fenda.

A construção da tábua da Galton foi feita pelos alunos que foram divididos em grupo de quatro ou cinco alunos. Reiteramos que esta atividade provocou muitas discussões, inclusive, de fundo filosófico.

Nessa atividade também foi incluída o experimento mental da fenda dupla com esferas (corpúsculos) e o experimento concreto demonstrativo da dupla fenda com ondas circulares produzidas numa cuba de ondas.

A seguir transcrevemos dois recortes, fenda dupla com esferas e fenda dupla com ondas circulares, do texto de apoio **DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA** de nossa dissertação:

Fenda dupla com esferas

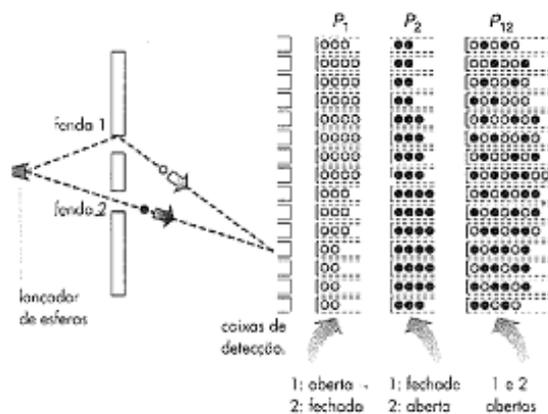
Uma máquina lança esferas com a mesma velocidade e em direções aleatórias contra uma parede com duas fendas paralelas e próximas uma da outra. Um pouco afastado desta parede encontram-se uma série de caixas que recolherão as esferas que passam pelas fendas. A maioria das esferas é travada pela parede outras passarão pela primeira ou pela segunda fenda diretamente ou ricocheteando nas suas bordas e estas serão recolhidas pelas respectivas caixas, de tal modo que o número de esferas recolhidas numa determinada caixa indica a **probabilidade** de chegada das esferas na posição determinada pela caixa em questão. Esta experiência poderá ser feita na seguinte ordem:

- Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa passando pela fenda 1.
- Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa passando pela fenda 2.
- Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa quando ambas as fendas estiverem abertas.

É fácil constatar que:

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

Fig. 1- Dupla fenda com esferas



Fonte: Klein (1996, p.19)

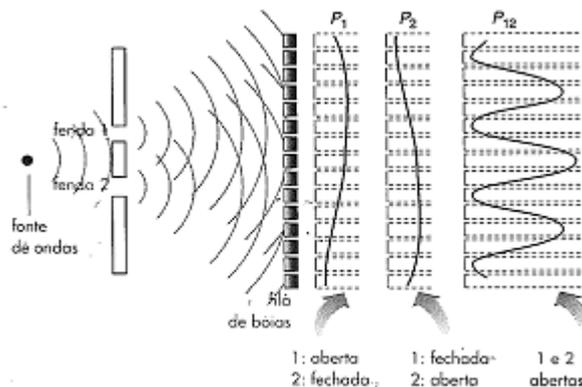
Fenda dupla com ondas circulares produzidas na superfície da água numa *cuba de ondas*:

A experiência da fenda dupla para ondas circulares produzidas na superfície da água numa *cuba de ondas*. Estas ondas podem ser geradas, por exemplo, por um bastão que toca na água em intervalos de tempo iguais. As caixas do experimento anterior podem ser substituídas por boias (rolhas de cortiça) que sobem e descem ao ritmo da passagem das ondas detectando, desta forma, a intensidade da onda. A intensidade da onda, ou a energia transferida pela onda, é proporcional à altura alcançada pela respectiva boia.

Esta experiência poderá ser feita na seguinte ordem:

- Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 1. Isto é, P_1 descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 1 e que incidem no detector (boias).
- Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 2. Isto é, P_2 descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 2 e que incidem no detector (boias).
- Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 1 ou pela fenda 2. Isto é, P_{12} descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 1 ou pela fenda 2 e que incidem no detector (boias).

Fig. 2 – Fenda dupla com ondas circulares produzidas na superfície da água.



Fonte: Klein (1996, p.21)

É evidente que o perfil obtido no caso das duas fendas abertas é muito diferente do perfil obtido na experiência das esferas, onde $P_{12} = P_1 + P_2$. Na experiência com ondas aparece aquilo a que se chama de interferências e a curva obtida é denominada padrão de interferência. Esta curva não apresenta uma relação simples com as anteriores, não é simplesmente uma soma das curvas anteriores como no caso das esferas.

Nesta experiência, com ondas, verificamos que no padrão de interferência existem vários pontos onde a intensidade é nula, ou seja, vários pontos onde as boias permaneceram praticamente imóveis, resultado da sobreposição das ondas que vêm da fenda 1 e das que vêm da fenda 2 sempre em oposição de fase, isto é, resultado de uma interferência destrutiva. Verificamos, também, que há outros pontos onde a intensidade é máxima e a amplitude da onda resultante é o dobro das ondas incidentes nestes pontos, resultado da interferência construtiva entre ondas que nestes pontos estão em concordância de fase. Entre estes pontos a intensidade apresenta valores diferentes.

Destes dois experimentos pode-se concluir: se o arranjo experimental originar padrão de interferência, o fenômeno é ondulatório, caso contrário, é corpuscular.

Ao fim dessa atividade o aluno deverá ser capaz de:

- Tábua de Galton:

Reconhecer que a quantidade de esferas em cada coluna da Tábua de Galton representa a probabilidade de uma determinada esfera ocupar tal posição.

Que o fenômeno em questão envolve, inclusive, o aparato experimental.

- Fenda dupla com esferas:

Identificar a curva P_1 .

Identificar a curva P_2 .

Identificar a curva P_{12} .

Concluir que $P_{12} = P_1 + P_2$.

Concluir que as esferas não interferem.

- Fenda dupla com ondas circulares:

Identificar a curva P_1 .

Identificar a curva P_2 .

Identificar a curva P_{12} .

Concluir que $P_{12} \neq P_1 + P_2$.

- Reconhecer os pontos onde a interferência é construtiva e os pontos onde é destrutiva.

- Destacar as semelhanças e as diferenças entre as três curvas das atividades com esferas e com ondas circulares na cuba.

- Relacionar padrão de interferência e probabilidade.
- Reconhecer que a interferência é uma característica ondulatória (padrão de interferência).

Agora é proposto, na próxima atividade, repetir estes experimentos e esta discussão numa escala microscópica (com objetos quânticos).

2.5 EXPERIMENTOS CONCRETO DEMONSTRATIVO E MENTAL DA DUPLA FENDA COM A LUZ. EXPERIMENTOS DA DUPLA FENDA COM ELÉTRONS NÃO LOCALIZADOS E COM ELÉTRONS LOCALIZADOS.

A atividade da fenda dupla com a luz tem a intensão de mostrar que a luz, assim como as ondas circulares produzidas na cuba de ondas, goza da propriedade da superposição apresentando nesse caso o fenômeno da interferência, sendo, portanto, nesse experimento um fenômeno ondulatório.

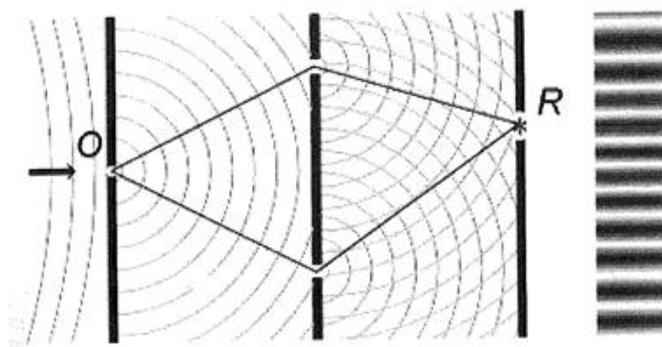
A experiência concreta demonstrativa que nós utilizamos na nossa prática pedagógica foi bastante simples, na qual utilizamos um laser, um pente e fita isolante para delimitar as duas fendas no pente. Fizemos incidir o laser sobre as duas fendas do pente e projetamos na parede. Deste modo foi possível identificar as bandas claras referentes às interferências construtivas e as bandas escuras referentes às interferências destrutivas.

A seguir apresentaremos um recorte, fenda dupla com a luz, do texto de apoio “DUALIDADE ONDA- PARTÍCULA” de nossa dissertação:

Fenda dupla com a luz

O experimento de interferência de luz foi feito por Thomas Young, em 1801. A fig. 3 ilustra como se propagam as ondas. Ao projetar a luz numa parede era observado regiões claras e regiões escuras, denominadas franjas de interferência. As regiões claras foi atribuído a interferências construtivas da luz e as escuras, a interferências destrutivas da luz. Desta forma Young inferiu, a partir das franjas, que a luz é uma onda.

Fig. 3 – fenda dupla para a luz



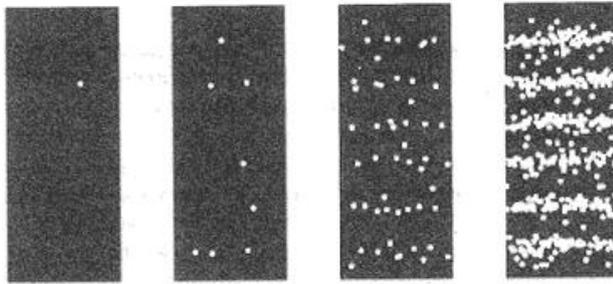
Fonte: Pessoa (2006, p.3)

Podemos transformar este experimento da física clássica em um experimento quântico diminuindo a intensidade da luz e usando um aparelho supersensível para detectar a luz (por exemplo, uma fotomultiplicadora).

Deste modo podemos ver as franjas de interferência se formando ponto a ponto na tela detectora. No caso da luz, dá-se o nome de “fóton” a cada um desses pontos observados. Estes pontos se agrupam em bandas acompanhando o padrão de intensidade típico da interferência.

Por mais fraco que seja o feixe de luz, após um tempo suficiente o padrão de interferência se forma.

Fig. 4 – fenda dupla para a luz em regime quântico.



Fonte: Pessoa (2006, p.3)

No regime quântico se observa a formação paulatina do padrão de interferência, resultado das ionizações, que ocorre uma a uma, na placa detectora.

O padrão de interferência obtido é o esperado, mas a transferência de energia durante a detecção, de maneira localizada, contraria a intuição macroscópica.

Ao término dessa atividade o aluno deverá ser capaz de:

- Reconhecer que a formação das bandas claras refere-se à interferência construtiva.
- Reconhecer que a formação das bandas escuras refere-se à interferência destrutiva.
- Concluir, que neste experimento com a luz, o fenômeno é ondulatório.

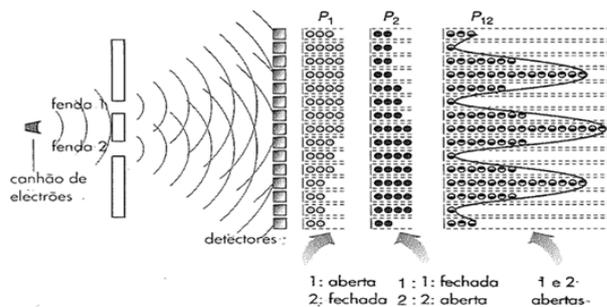
A próxima atividade, dupla fenda com elétrons não localizados, isto é, não se sabe por qual fenda passam os elétrons, tem o objetivo principal destacar que os elétrons, dependendo do experimento, interferem, apresentando nesse experimento em particular características de onda.

A seguir apresentaremos um recorte do texto de apoio “DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA” de nossa dissertação utilizado no desenvolvimento dessa atividade:

Fenda dupla com elétrons

Refazendo a experiência das duas fendas, agora com elétrons. Um canhão de elétrons dispara elétrons de mesma energia sobre a placa de duas fendas. A placa detectora localiza-se atrás da placa de duas fendas. Nessa experiência **não se sabe por qual fenda passam os elétrons** que serão representados, aqui, metade brancos, metade pretos. O resultado obtido é diferente do resultado obtido na experiência com esferas, aparecendo na tela detectora o padrão de interferências, marca do comportamento ondulatório.

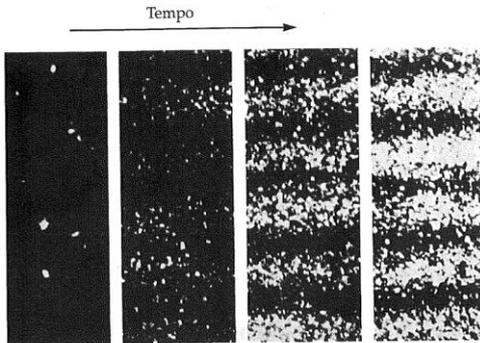
Fig. 5 – fenda dupla para elétrons



Fonte: Klein (1996, p.22)

Regulando a intensidade do canhão de elétrons, de modo que eles saiam um a um, ficando, portanto, a emissão e a detecção (impacto com a tela) de cada um deles isolados dos outros, cada elétron é captado num ponto preciso do detector (localizado), contribuindo a favor da ideia de que os elétrons são corpusculares. No entanto, à medida que se acumulam os impactos dos elétrons, ocorre a formação, ponto a ponto, do padrão de interferência semelhante ao obtido, anteriormente, quando os elétrons tinham sido emitidos em grande número, contribuindo a favor da ideia de que os elétrons são ondas.

Fig. 6 – fenda dupla para elétrons em regime quântico



Fonte: Klein (1996, p.23)

Destes resultados pode-se “concluir”, como se um objeto pudesse não ser nem uma coisa, nem o contrário dessa coisa:

- Os elétrons não são simplesmente corpúsculos, porque criam interferências quando chegam na tela detectora em número elevado;
- Os elétrons não são puramente ondas, porque são individualmente detectados (localizados).

Nesta situação, onde os elétrons são emitidos um a um, temos, portanto fenômenos independentes uns dos outros. Se os elétrons fossem corpúsculos, deveriam, forçosamente, passar por uma das fendas, e o fato da outra fenda estar aberta ou fechada não deveria ter qualquer influência sobre o seu comportamento. No entanto, a experiência mostra que os estados, aberto ou fechado, das fendas condiciona a distribuição espacial dos elétrons na tela detectora, como se o fato de uma segunda fenda aberta, oferecendo uma possibilidade de passagem suplementar ao elétron, impedisse-o de chegar a determinados pontos, caracterizados pelas franjas escuras (interferência destrutiva). Isto é, as propriedades atribuídas a uma partícula dependem das características do dispositivo para o qual ela se encaminha. Salienta-se, ainda, que nesta situação não se pode determinar por qual, das fendas um determinado elétron passará.

Ao término dessa atividade o aluno deverá ser capaz de:

- Identificar a curva P_1 .
- Identificar a curva P_2 .
- Identificar a curva P_{12} .
- Concluir que $P_{12} \neq P_1 + P_2$.

- Destacar as semelhanças e as diferenças entre as três curvas (P_1 , P_2 e P_{12}) das atividades 4 e 5.
- Identificar o padrão de interferência
- Reconhecer que os estados (aberto ou fechado) das fendas condicionam a distribuição espacial dos elétrons na tela detectora.
- Concluir que os elétrons interferem, característica de onda.
- Concluir que nesta experiência os elétrons são localizados durante a detecção, característica de corpúsculo.
- Concluir que o fenômeno não é puramente ondulatório.
- Concluir que o fenômeno não é puramente corpuscular.
- Abstrair que o elétron não é onda e nem corpúsculo e que isto é **uma contradição lógica**.

A atividade envolvendo o experimento mental da dupla fenda com elétrons localizados busca destacar que o fenômeno nesse experimento é corpuscular, visto que a determinação da fenda pela qual cada elétron passará, através de uma fonte luminosa colocada entre a placa que contém as fendas e a tela detectora, faz com que o padrão de interferência não seja mais observado. Destacando, também, que não é permitido supor que se possa simultaneamente observar interferências e identificar a fenda utilizada por cada elétron e que tais resultados são universais e são válidos para todas as partículas, sejam elas de luz (fótons) ou de matéria (elétrons, prótons, nêutrons, átomos...).

Ainda, nessa atividade tem destaque a versão fraca da dualidade, bem com as principais interpretações da Mecânica Quântica para esse fenômeno.

A seguir apresentaremos o recorte do experimento mental da fenda dupla com elétrons localizados do texto de apoio “DUALIDADE ONDA- PARTÍCULA” de nossa dissertação utilizado no desenvolvimento dessa atividade:

Fenda dupla com elétrons com fenda determinada

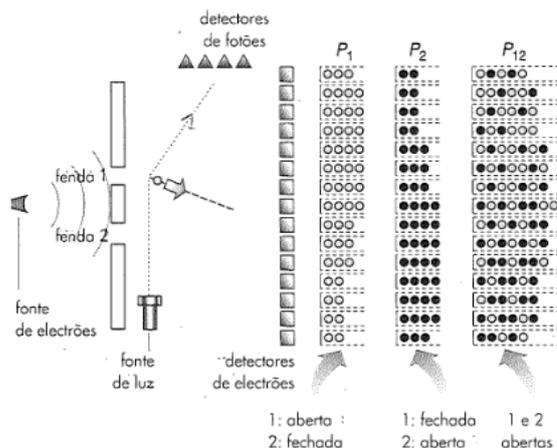
Propõe-se, então, outra situação com a experiência anterior da fenda dupla com elétrons, agora determinando por qual das fendas cada elétron passará. Esta determinação poderá ser feita através de uma fonte luminosa colocada entre a placa que contém as fendas e a tela detectora, iluminando os elétrons que passam, por exemplo, pela fenda 1. Desta forma, detectando a luz proveniente da fenda 1, fica determinado a fenda por qual determinado elétron passou. Do mesmo modo podemos determinar os elétrons que passam pela fenda 2.

O experimento poderá ser feita na seguinte ordem:

- Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora passando pela fenda 1.
- Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora passando pela fenda 2.
- Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora com as duas fendas abertas.

Notamos que a distribuição dos elétrons com uma das fendas fechada são simétricas entre si e quando as duas fendas estão abertas não se observa o padrão de interferência, isto é, encontramos um comportamento semelhante ao das esferas.

Fig. 6 – fenda dupla para elétrons com fenda determinada



Fonte: Klein (1996, p.26)

Desta sequência, verifica-se quando a fenda pela qual passa cada elétron é determinada, o padrão de interferência não é mais observado, portanto, não é permitido supor que se possa, simultaneamente, observar interferências e identificar a fenda utilizada por cada elétron. Tais resultados são universais e são válidos para todas as partículas, sejam elas de luz

(fótons) ou de matéria (elétrons, prótons, nêutrons, átomos...). Ao determinar a fenda pela qual passam os elétrons a figura de interferência é perturbada.

Toda medição aparece pois como uma interação entre o objeto microscópico sobre o qual efectuamos a medição e o aparelho de medição propriamente dito, que é macroscópico. Existe pois entre os dois uma espécie de ligação indestrutível, uma união mínima, que nunca é nula. Esta relação obrigatória impede de levar em conta o que pertence ao próprio objecto medido e o que pertence ao próprio aparelho de medição. As propriedades das partículas já não parecem poder ser separadas das condições de sua manifestação (KLEIN, 1996, p.28).

Podemos concluir, após esta sequência de experimentos, que um determinado aparelho de medição pode tornar evidente uma grandeza específica, mas não outra. Se colocarmos uma questão de natureza ondulatória (difração) em relação a uma partícula, sua resposta será de natureza ondulatória (interferência). Se colocarmos uma questão de natureza corpuscular (detecção pontual) a sua resposta será de natureza corpuscular (impacto localizado). A natureza dos aparelhos utilizados determina o tipo de fenômenos observados. Nenhuma experiência nos mostra uma partícula se comportando simultaneamente como uma onda e como um corpúsculo, no entanto necessitamos destas duas imagens para traduzir os resultados experimentais.

A noção de trajetória também fica abalada após estas experiências, pois observando as interferências, não podemos precisar qual foi o percurso das partículas, nem mesmo a fenda por qual elas passaram. Isto é, mesmo conhecendo as condições iniciais não é possível determinar o movimento ulterior como na física clássica. O que podemos calcular é a probabilidade de que a partícula se manifeste neste ou naquele ponto da tela detectora.

Na experiência da fenda dupla com elétrons, ao acompanhar a formação do padrão de interferência em telas fosforescentes, observamos os pontos aparecendo um após o outro, isto é, observamos cada fóton sendo detectado de maneira localizada, uma característica corpuscular. No entanto, estes pontos se agrupam em bandas destacando o padrão típico da interferência, característica ondulatória.

Desta forma temos um objeto quântico exibindo propriedades contraditórias, caracterizando a contradição lógica entre onda e partícula já comentada anteriormente.

A versão fraca da dualidade onda-partícula afirma que: “Para qualquer objeto microscópico, pode-se realizar um experimento tipicamente ondulatório (como um de interferência), mas a detecção sempre se dá através de uma troca pontual de um pacote mínimo de energia”.

Note que nessa versão não é afirmado que os fótons ou os elétrons são sempre indivisíveis em sua propagação, mas que apenas na sua detecção eles aparecem de maneira indivisível e pontual e, também, não é afirmado que um objeto quântico sempre se comporta como uma onda, mas sim que ele pode exibir interferência.

Como é possível um objeto quântico apresentar ambas as características, ondulatória e corpuscular, num mesmo experimento?

Veremos agora como cada uma das quatro principais interpretações da Teoria Quântica responde a esta questão. Embora a interpretação ortodoxa da mecânica quântica seja não realista, existem interpretações realistas. As mais usadas são:

Interpretações realistas:

1) **Interpretação Ondulatória:** Antes da detecção, o objeto quântico propaga-se como onda, mas durante a detecção ele torna-se mais ou menos bem localizado, parecendo uma partícula. Isto é, durante certo tempo temos uma onda espalhada, e depois temos uma partícula, sem que ambos coexistam simultaneamente, eliminando, assim, a possível contradição lógica.

2) **Interpretação Corpuscular:** O fóton e o elétron são na realidade uma partícula, o que é manifestado na respectiva detecção. Não existe onda associada e o padrão de interferência é explicado a partir da interação da partícula com o anteparo que contém as duas fendas, desta forma não há contradição.

3) **Interpretação Dualista Realista:** O objeto quântico se divide em duas partes, uma partícula com trajetória bem definida (mas desconhecida), e uma onda associada. A probabilidade da partícula se propagar em uma determinada direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula. Aqui a contradição é eliminada, pois o objeto quântico se divide em duas partes, uma sendo só partícula, e a outra só onda.

Nas interpretações acima se afirma algo sobre a natureza do ente físico em questão, no caso elétrons ou fótons. Esta natureza manifesta-se na experiência, mas independe dela. Existe uma distinção clara entre o objeto de estudo e o experimento. Notem que o postuldo quântico não desenvolve um papel importante nestas interpretações.

Vejamos agora a interpretação ortodoxa da mecânica quântica. Interpretação positivista de Bohr, também conhecida como interpretação da complementaridade:

Interpretação da Complementaridade: O fenômeno em questão é ondulatório, e não corpuscular, pois não podemos inferir a trajetória passada do quantum detectado. O aspecto corpuscular observado na detecção se deve ao postulado quântico, de Max Planck, o qual afirma que existe uma descontinuidade essencial em qualquer processo atômico, como por exemplo, na ionização de átomos de prata na chapa fotográfica devido à ação da luz.

Notem que nesta interpretação nada se afirma sobre a realidade do ente físico que está sendo observado. Apenas afirma-se que o fenômeno é ondulatório. O fenômeno inclui o aparato de medida e o objeto que está sendo medido. O que é real aqui? O real é o fenômeno. Nada se afirma sobre a realidade do objeto que está sendo medido. Dentro desta perspectiva a física descreve fenômenos e não a realidade intrínseca de algum ente físico. Por isto esta interpretação é não realista. Para você, o que é real?

Ao término dessa atividade o aluno deverá ser capaz de:

- Identificar a curva P_1 .
- Identificar a curva P_2 .
- Identificar a curva P_{12} .
- Reconhecer que $P_{12} = P_1 + P_2$.
- Destacar as semelhanças e as diferenças entre as três curvas (P_1 , P_2 e P_{12}) dessa atividade e das respectivas curvas das atividades anteriores.
- Identificar as semelhanças entre o experimento com elétrons e o experimento com esferas.
- Reconhecer que a localização da fenda pelo qual passa cada elétron faz com que o padrão de interferência não seja mais observado.
- Inferir que não é possível simultaneamente observar interferências e identificar a fenda utilizada por cada elétron.
- Extrapolar os resultados desta experiência para todas as partículas quer sejam de luz (fótons) ou de matéria (elétrons, prótons, nêutrons, átomos...).
- Caracterizar as quatro interpretações básicas, evidenciando seus problemas e suas divergências, da versão fraca da dualidade onda-partícula (o experimento da fenda dupla), priorizando a interpretação da Complementaridade:

Agora vamos estudar a dualidade através de outro experimento, que envolve, também, o fenômeno da interferência.

2.6 INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER.

A intenção agora é dar continuidade à discussão da dualidade onda- partícula, através do problema conceitual do caminho percorrido pelo fóton na interferência quântica e destacar o enunciado da versão forte para a dualidade através do interferômetro de Mach-Zehnder.

Esta atividade poderá ser reforçada utilizando o interferômetro virtual de Mach-Zehnder desenvolvido por Ostemann et al (2009) como ferramenta didática e cultural, o que possibilita evidenciar o comportamento corpuscular ou ondulatório do fóton, sendo possível trabalhar tanto no regime quântico como no regime clássico. O interferômetro de Mach-Zehnder possui dois divisores de feixes, sendo, portanto, equivalente a uma fenda dupla.

Ostemann et al (2009) elaboraram um roteiro para o desenvolvimento exploratório do interferômetro de Mach-Zehnder, o qual poderá ser utilizado no desenvolvimento dessa atividade. Este roteiro consta na nossa dissertação no ANEXO A.

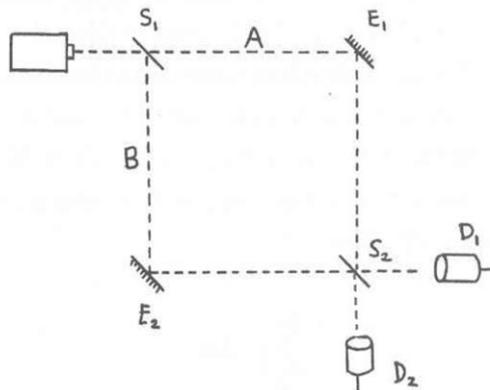
Para o desenvolvimento teórico dessa atividade apresentamos a seguir um recorte sobre a interferometria de Mach-Zehnder presente no texto de apoio DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA de nossa dissertação:

INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER CLÁSSICO

O interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) é um arranjo experimental relativamente simples de espelhos e semi-espelhos que demonstra o fenômeno da interferência da luz pela divisão de um feixe luminoso, parecido com o experimento da fenda dupla, porém mais simples, idealizado independentemente por Ludwig Zehnder e Ludwig Mach.

O feixe luminoso, considerado como consistindo de ondas em uma dimensão, monocromática de comprimento de onda λ , é dividido em um primeiro semi-espelho e então recombinado em um segundo semi-espelho onde, dependendo da fase relativa adquirida pelos feixes ao longo dos caminhos, exibirá interferência construtiva.

Fig. 1 – Desenho do IMZ



Fonte: Pessoa (2006, p. 19)

Sob condições idealizadas, os espelhos, E1 e E2, são considerados perfeitamente refletoras e os semi-espelhos, S1 e S2, refletem e transmitem exatamente 50% da luz neles incidente. Deste modo, se a amplitude do feixe inicial é Ψ_0 a amplitude do feixe transmitido e do feixe refletido será $\Psi_0/\sqrt{2}$. Cada reflexão da luz em um espelho ou semi-espelho introduz uma diferença de fase correspondente a $\lambda/4$, provocando um avanço de $1/4$ de comprimento de onda em relação à onda transmitida.

Desta forma o feixe A se aproxima de S2 com uma amplitude $\Psi_0/\sqrt{2}$ e com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/4$. O espelho semi-refletor S2 divide o feixe A em duas partes iguais, a parte refletida sofre mais um deslocamento de fase de $\lambda/4$ chegando no detector D1 com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/2$ e com amplitude de $\Psi_0/2$. A outra parte do feixe A, transmitida pelo espelho semi-refletor S2, chega no detector D2 com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/4$ devido à reflexão no espelho E1 e com amplitude de $\Psi_0/2$. **Resumido: AD1 $\lambda/2$ e AD2 $\lambda/4$.**

O feixe B também se aproxima de S2 com uma amplitude $\Psi_0/\sqrt{2}$ e com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/2$ devido às reflexões no espelho semi-refletor S1 e no espelho E2. O feixe B ao incidir sobre o espelho semi-refletor S2 é dividido em duas partes: A parte transmitida ao detector D1 mantém o deslocamento de fase de $\lambda/2$ e amplitude de $\Psi_0/2$, a parte refletida ao detector D2 sofre mais um deslocamento de fase de $\lambda/4$, resultando, portanto, num deslocamento de fase relativo de $3\lambda/4$ e amplitude de $\Psi_0/2$. **Resumindo: BD1 $\lambda/2$ e BD2 $3\lambda/4$.**

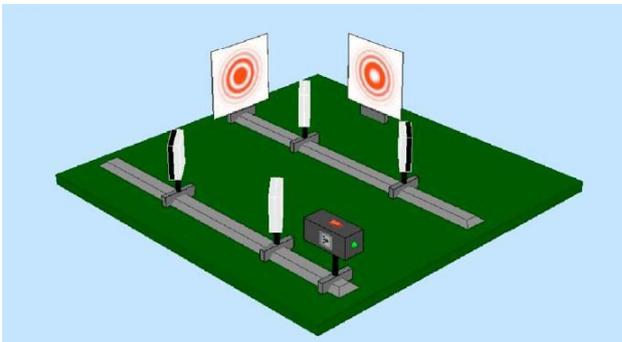
Assim é possível concluir que as partes dos feixes A e B que chegam no centro do detector D1 não têm diferença de fase entre si, resultando, portanto, numa interferência construtiva com amplitude Ψ_0 , correspondendo a 100% do feixe original. Conclui-se,

também, que as partes dos feixes A e B que chegam no centro do detector D2 apresentam a seguinte diferença de fase, $3\lambda/4 - \lambda/4 = \lambda/2$, resultado numa interferência destrutiva, correspondendo à 0% do feixe original.

Podemos, também, concluir que só é possível superpor construtivamente dois componentes de onda se ao mesmo tempo outros dois componentes estejam se superpondo destrutivamente.

Se substituirmos os detectores por telas e considerarmos a pequena abertura angular característica da fonte, o feixe emitido não será mais paralelo. Assim, poderemos ter interferências pela defasagem ocasionada tanto pela diferença de caminho óptico como pelas reflexões sucessivas nos espelhos e semi-espelhos. Dessa forma, observaremos, em ambas as telas, a formação de anéis luminosos típicos do fenômeno de interferência. Os pontos localizados na região central dos anteparos estão de acordo com a previsão feita na situação idealizada discutida anteriormente.

Fig. 2 – IMZ em regime clássico.



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER QUÂNTICO (Interferometria para Um Fóton)

A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime monofotônico, ou seja, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez.

Para transformar o experimento clássico anteriormente descrito num experimento quântico devemos inicialmente ajustar a fonte luminosa diminuindo a intensidade do feixe original até que poucos fótons incidam em S1, isto é, ajustar a fonte de modo que ela passe a emitir um fóton de cada vez, por exemplo, um fóton por segundo (regime monofotônico). Outra providência necessária é a utilização de detectores de fótons, supostamente ideais, sensíveis à presença de um único fóton (fotomultiplicadora).

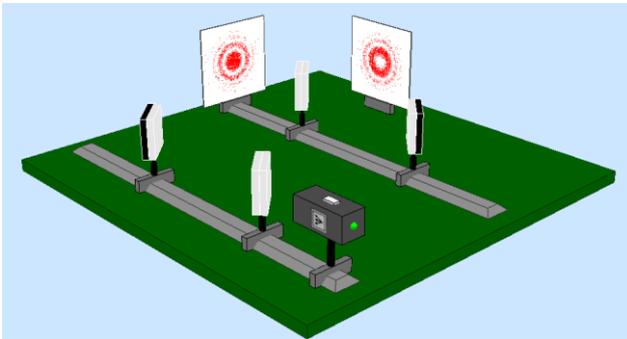
Deste modo o interferômetro estará funcionando em regime quântico, isto é, num regime de baixas intensidades, quando propriedades corpusculares passam a aparecer.

Num primeiro momento, considerando apenas os fótons que incidem na região central dos detectores D1 e D2, poderíamos esperar que em cada um dos detectores fossem coletados 50% dos fótons emitidos pela fonte, isto é, 50% em D1 e 50% em D2. No entanto, não é isto que acontece. Todos os fótons, 100%, são detectados em D1, e nenhum em D2. Portanto, podemos afirmar que o interferômetro de Mach-Zehnder para fótons únicos tem o mesmo comportamento que o caso clássico, apresentando um padrão tipicamente ondulatório, interferência construtiva no detector D1 e interferência destrutiva no detector D2. Deste modo podemos concluir que, em certo sentido, cada fóton interfere consigo mesmo.

Considerando todos os fótons emitidos pela fonte, inclusive aqueles que rumam em direção a uma região bastante afastada do centro dos detectores e colocando anteparos no lugar dos detectores, observarmos uma distribuição de fótons aparentemente aleatória em cada tela. No entanto, com o passar do tempo, observaremos um padrão de anéis de interferência se formando em cada uma das telas, o qual nos mostra que existem regiões na tela que são inacessíveis aos fótons e regiões nas quais sua incidência é mais provável.

Este fenômeno é ondulatório, pois só podemos descrever o fato de que nenhum fóton foi detectado em D2 através de um modelo ondulatório, isto é, através de interferências destrutivas a partir de S2, ou ainda, porque não podemos inferir qual o caminho seguido pelo fóton dentro do interferômetro.

Fig.3 - IMZ em regime quântico



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

Não há informação de qual caminho, então há interferência e o fenômeno é ondulatório.

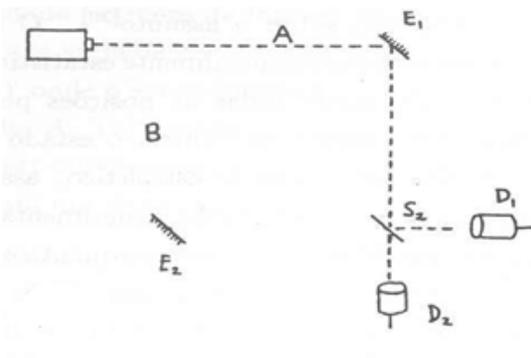
Determinando a trajetória seguida pelo fóton- Por qual caminho rumou o fóton?

Colocamos, agora, a seguinte questão: No experimento do interferômetro de Mach-Zehnder em regime quântico, depois que o fóton passou pelo semi-espelho S1, mas antes de chegar ao semi-espelho S2, em qual caminho, A ou B, ele se encontra?

Para essa discussão vamos seguir o seguinte roteiro:

- Retirar o espelho semi-refletor S1. Nesse caso podemos concluir que o fóton está no caminho A e não está no caminho B e após passar pelo espelho semi-refletor S2 poderá ser detectado pelo detector D1 (50% de probabilidade) ou pelo detector D2 (50% de probabilidade), não ocorrendo, portanto, interferência dos componentes.

Fig. 4 – IMZ- os fótons seguem pelo caminho A

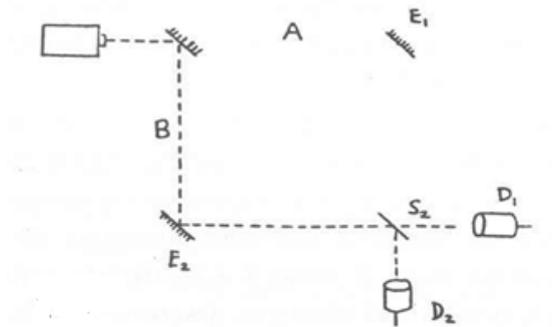


Fonte: Pessoa (2006, p. 13)

- Substituir o espelho semi-refletor S1 por um espelho de reflexão total. Nesse caso podemos concluir que o fóton está no caminho B e não está no caminho A e após passar pelo

espelho semi-refletor S2 poderá ser detectado pelo detector D1 (50% de probabilidade) ou pelo detector D2 (50% de probabilidade), não ocorrendo, portanto, interferência dos componentes.

Fig. 5 – IMZ- os fótons seguem pelo caminho B



Fonte: Pessoa (2006, p. 13)

Se com o fóton no caminho A a probabilidade de ser detectado em D2 é 50%, e com o fóton no caminho B a probabilidade de ser detectado em D2 também é 50%, pela definição do conectivo “ou” a probabilidade do fóton estar “ou em A ou em B” tem que ser 50%. Porém o experimento, em regime quântico, do interferômetro de Mach-Zehnder nega a afirmação de que o fóton está “ou em A ou em B”, visto que no experimento citado a probabilidade do fóton ser detectado pelo detector D2 não é 50%, mas é 0%. Logo é falsa a afirmação de que o fóton está ou em A ou em B.

Assim, parece que podemos concluir que os fótons não seguem trajetórias bem definidas. Tal conclusão não era esperada quando pensamos a luz sendo detectada na forma de partículas (fótons) e que tais partículas existem durante a propagação da luz, seguindo trajetórias bem definidas, embora, desconhecidas. Temos aqui um impasse!

Como podemos, então, interpretar o fenômeno de interferência quântica demonstrado nos experimentos anteriores?

A interpretação da complementaridade considera que o arranjo experimental determina o comportamento do fóton. Se, em princípio, for possível determinar o caminho percorrido pelo fóton, então o fenômeno é corpuscular e o fóton, uma partícula. Se, por outro lado, o experimento apresenta aspectos ondulatórios tal como um padrão de interferência, o fóton é considerado como sendo uma onda, e *não tem sentido* perguntar onde está o fóton. Em outras palavras, o sistema apresenta aspectos corpusculares ou ondulatórios, dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.

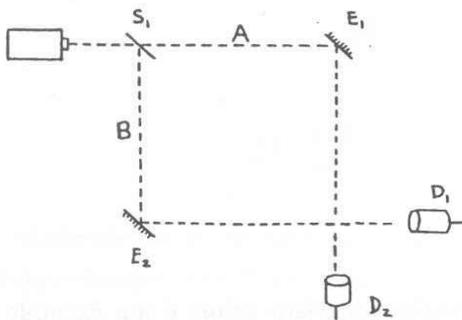
Fenômeno corpuscular

É importante destacar que para Bohr a palavra fenômeno designa a “totalidade” que inclui o objeto quântico e aparelhagem experimental e que ele só se completa quando o resultado experimental é registrado em nível macroscópico, isto é, quando o experimento termina.

Destacamos, ainda, que um determinado fenômeno é corpuscular, não porque o é detectado pontualmente como uma quantidade bem localizada de energia, visto que isto é comum também aos fenômenos ondulatórios, mas por ter uma trajetória bem determinada associada.

Podemos observar um fenômeno corpuscular com o interferômetro de Mach-Zehnder retirando o espelho semi-refletor S2.

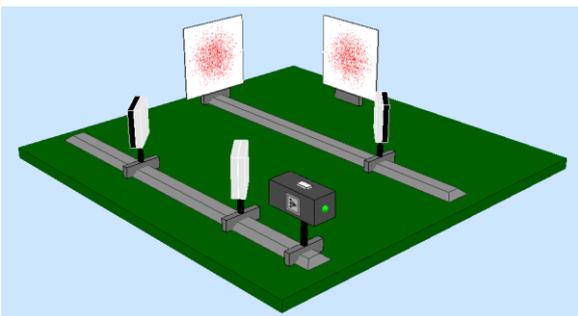
Fig. 5 – IMZ com caminho conhecido – fenômeno corpuscular



Fonte: Pessoa (2006, p. 16)

Nessa situação, se o fóton é detectado pelo detector D1, podemos inferir que o fóton percorreu o caminho B; se for detectado em D2, a trajetória inferida é A. Isto é, o fenômeno apresenta trajetória determinada, portanto, é **corpuscular**.

Fig. 6 – IMZ com caminho conhecido – fenômeno corpuscular



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

Há informação de qual caminho, então o fenômeno é corpuscular e não há interferência.

Para a interpretação da complementaridade, uma vez completada a medição, o fenômeno é corpuscular. O fóton é considerado uma partícula que seguiu uma trajetória bem definida. Esta inferência com relação à trajetória passada do quantum detectado é conhecida como “retrodição”.

Dualidade onda-partícula: versão forte

Agora podemos enunciar a versão que Bohr deu para a dualidade onda-partícula, que é chamada de “versão forte”:

Um sistema quântico ou exhibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.

Esta versão expressa a noção de que onda e partícula são aspectos mutuamente exclusivos, mas *complementares*, da natureza. Isto é, na representação de um objeto quântico como um elétron ou um fóton, podemos considerá-lo ou como uma partícula, para certas situações experimentais, ou como onda, para outras situações.

Segundo Bohr, é impossível montar uma situação experimental que exiba simultaneamente esses dois aspectos da natureza (por isso é que são *mutuamente exclusivos*). Porém, só podemos compreender um objeto quântico de maneira completa quando levamos em conta esses dois aspectos complementares. Isto é, não conseguimos representar um objeto quântico em um “quadro único”: precisamos de descrições complementares. Isto se deve ao fato de estarmos usando uma linguagem clássica para descrever um fenômeno quântico.

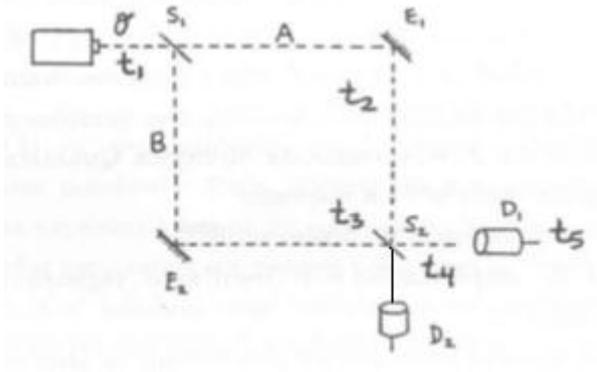
Experimento de escolha demorada

Como vimos anteriormente a presença ou não do espelho semi-refletor S2 no interferômetro de Mach-Zehnder é determinante para se obter um fenômeno ondulatório ou corpuscular respectivamente.

O experimento de escolha demorada usando o IMZ foi estudado pelo físico norte-americano John Wheeler, a partir de 1978, buscando responder a questão sobre a possibilidade de colocar ou retirar o espelho semi-refletor S2 enquanto o fóton estiver percorrendo o interferômetro, ou seja, até que instante o cientista pode escolher entre deixar ou retirar S2, de forma a fazer o fenômeno ser ondulatório ou corpuscular?

Vamos agora então examinar algumas consequências deste *experimento de escolha demorada* para as diferentes interpretações que já conhecemos. Para tanto, consideremos alguns instantes temporais ao longo do percurso do fóton, na montagem da Fig. 7. No instante t_1 , o fóton incide em S_1 ; em t_2 , ele se encontra dentro do interferômetro; em t_3 ele passa pela posição do espelho semi-refletor S_2 ; em t_4 ele se aproxima do detector; em t_5 ele gera um sinal macroscópico no osciloscópio.

Fig. 7 - Fig. Desenho do interferômetro no qual estão indicados diferentes instantes temporais.



Fonte: Pessoa (2006, p. 16)

De acordo com a interpretação da complementaridade não podemos afirmar nada sobre o fóton no instante t_2 , quando o fóton já está dentro do interferômetro. Não se pode dizer que o objeto quântico é onda, nem que ele é partícula. Isto só poderá ser feito quando o “fenômeno” se completa, e um registro macroscópico for obtido no aparelho de medição, no instante t_5 . Isto é, somente no instante t_5 , após o registro macroscópico obtido pelo aparelho de medida, é que poderemos dizer o que estava acontecendo no instante t_2 , o que estava acontecendo no passado.

Devemos chamar atenção para o fato de que mesmo que o semi-espelho não esteja presente no instante t_3 , o fenômeno em t_4 ainda não se constitui como corpuscular, visto que ainda há possibilidade do semi-espelho ser colocado, antes do registro macroscópico, de forma a recombinar os componentes, resultando em um fenômeno ondulatório. Só com registro macroscópico é que esta possibilidade pode ser excluída.

Segundo a interpretação da complementaridade é proibido que se fale algo sobre o fenômeno no instante t_2 e é possível acontecer de o passado se atualizar no presente. Isto, porém, não ocorre com as interpretações realistas. De acordo com a interpretação ondulatória, em t_2 o pacote de onda se divide em duas posições (no caminho A e no B); o que ocorre no

futuro (em t_3) em nada afeta a realidade em t_2 . O mesmo ocorre com a interpretação da dupla solução.

O princípio da complementaridade e a linguagem clássica.

O ser humano desenvolveu seu aparelho cognitivo para se adaptar aos corpos “macroscópicos”, ou seja, aos corpos que nos rodeiam e que percebemos. Concomitantemente, desenvolveu uma linguagem que permite a ele se comunicar com os outros e lhes informar do estado de coisas do mundo. Esta foi chamada de “linguagem clássica”, pois é a linguagem própria da Física Clássica. No entanto, nada garante que as entidades microscópicas tenham o mesmo comportamento das clássicas, podendo ser classificadas como ondas ou partículas. De fato, não temos razões para acreditar que nossa linguagem e mente clássica, que classificam os objetos como ondas ou partículas, possam capturar adequadamente todos os aspectos das entidades microscópicas. O que podemos fazer, segundo Bohr, é ora utilizar uma representação corpuscular para descrever um experimento (fenômeno), ora utilizar um quadro ondulatório para descrever outro experimento. Cada experimento envolvendo entidades microscópicas pode ser compreendido ou num quadro corpuscular (quando elas exibem trajetórias bem definidas), ou num ondulatório (quando elas manifestam padrões de interferência), nunca ambos ao mesmo tempo. Notem que o resultado do experimento sempre é uma grandeza microscópica, sendo entendida dentro do ambiente da linguagem clássica. Assim, o princípio da complementaridade surge como uma tentativa de se interpretar o resultado de um experimento de forma objetiva, usando a linguagem clássica. Para tanto precisamos abrir mão do realismo. Não temos mais acesso ao objeto em si. Apenas descrevemos um fenômeno e o fenômeno envolve o objeto e o aparato de medida. Não faz sentido mais afirmar algo sobre a natureza de algum objeto antes deste ser medido.

A seguir transcrevemos o roteiro exploratório para a atividade com o interferômetro De Mach-Zehnder virtual de Ostermamm et al (2009):

ROTEIRO EXPLORATÓRIO PARA O INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER

1- Com o software aberto, localize o *menu* LANGUAGE e selecione o idioma.

2- Selecione a opção VER FEIXES e observe o caminho que é seguido pela luz no interferômetro.

Em seguida selecione novamente esta opção para desativar este comando.

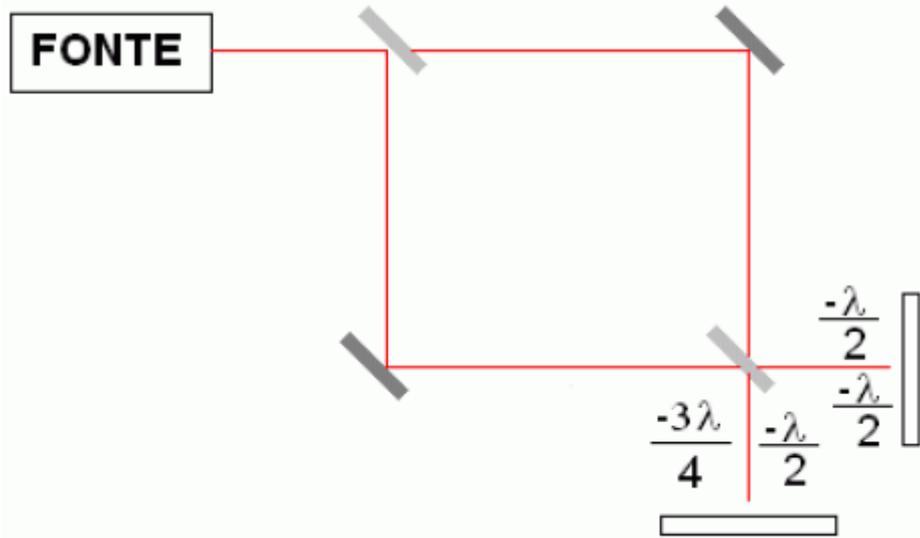
3- Vamos agora identificar as estruturas que compõem o interferômetro. Para isso basta você passar o *mouse* sobre cada uma delas. Localize a fonte, os espelhos, espelhos semi-refletores e os anteparos.

4- Selecione a opção LASER e em seguida LIGADO. Observe o que aparece na tela do interferômetro. Descreva o que você observa nos anteparos.

Formam-se figuras de interferência circulares nos dois anteparos. Observe que as figuras são complementares, isto é, onde há interferência construtiva em um anteparo, há interferência destrutiva na posição equivalente do outro anteparo. Pode-se dizer que onde há uma região escura no anteparo 1, forma-se uma região clara no anteparo 2 e vice-versa. A complementaridade dos padrões de interferência é resultado da conservação de energia – a intensidade total da luz que chega aos dois anteparos é igual a intensidade da luz emitida pela fonte, considerando que estamos supondo que não haja nenhuma dissipação do laser no trajeto até os anteparos e na interação com o material do anteparo.

5- Procure explicar a formação dos padrões de interferência observados. (**Dica:** uma reflexão em um espelho semi-refletor introduz um deslocamento de fase na luz correspondente a um quarto de comprimento de onda da mesma. Faça a soma dos deslocamentos de fase dos feixes que chegam a cada anteparo.)

Observe as frentes de onda provenientes dos dois caminhos no interferômetro chegam ao ponto central dos anteparos (esquema abaixo). Uma análise simples mostra que em um dos anteparos, as frentes de onda chegam com um atraso de $\lambda/2$ (meio comprimento de onda) em relação ao feixe emitido pela fonte. Ambos os feixes, no entanto, estão em fase entre si e na superposição, depois do segundo semi-espelho, resultam numa interferência construtiva. A mesma análise simples, mostra que no outro anteparo, as duas frentes de onda apresentam uma defasagem de $\lambda/4$ (um quarto do comprimento de onda) revelando, portanto, uma interferência destrutiva.



6- Retire do interferômetro o espelho semi-refletor 2 (opção ESPELHO SEMI-REFL. 2). Qual a relação entre as intensidades da luz nos anteparos e a intensidade da luz emitida pela fonte?

Considerando-se espelhos ideais em que não haja nenhuma perda da intensidade da luz, a intensidade nos anteparos é a mesma e corresponde a metade da intensidade da luz emitida pela fonte. Observe que quando falamos em intensidade da luz ou de onda em geral, falamos em uma grandeza diretamente proporcional ao quadrado da amplitude da onda.

7- Recoloque o espelho semi-refletor 2 no interferômetro.

8- A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime monofotônico, ou seja, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez. Selecione a opção FÓTONS ÚNICOS e observe os anteparos. (**Dica:** no *menu* FÓTONS/SEGUNDO, a simulação poderá ser acelerada se for colocado o valor 10, para que a emissão de fótons a cada segundo seja maior.)

9- Compare os padrões que vão se formando nos anteparos com os que foram observados quando o interferômetro foi utilizado com a opção LASER. Como é feita a detecção dos fótons nos anteparos? Após a detecção de um grande número de fótons, como podemos descrever a distribuição dessas detecções nos anteparos? (**Dica:** para responder a esta última pergunta, observe no canto superior direito da tela a contagem de fótons.)

A detecção dos fótons é puntual - representada na forma de pontos - os quais atingem os anteparos em determinadas regiões. A distribuição das detecções é aleatória (ora em um, ora em outro anteparo), mas segue uma distribuição em torno de 50% para cada anteparo.

Conforme o número de detecções aumenta, é possível observar o aparecimento de um padrão de interferência igual ao obtido com a fonte laser.

10- Coloque um detector num dos braços do interferômetro (opção DETECTOR 1). Observe novamente a contagem de fótons, nos anteparos e no detector. O que você observa? (**Dica:** clique no botão ACELERAR.)

Cerca de 50% dos fótons são detectados no detector 1 e os 50% restantes se dividem quase que igualmente entre os anteparos. Com o uso de detectores, os fótons têm o atributo posição definido, isto é, podemos dizer por qual braço do interferômetro o fóton seguiu e o fóton apresenta um comportamento corpuscular. Os anteparos não exibem mais um padrão de interferência.

11- Observe agora os anteparos. O padrão de impactos revela interferência? Explique.

Não se observa interferência, pois quando se pode dizer o trajeto do fóton por meio de uma medida (no caso ao se usar um detector em um dos braços do interferômetro), o fóton se comporta como uma partícula. Esse é a problemática da dualidade onda-partícula na Física Quântica.

12- Coloque mais um detector no interferômetro (opção DETECTOR 2). O que se observa na contagem de fótons nos detectores e nas luzinhas dos detectores e da fonte? E na tela? Clique uma vez no botão ACELERAR. O que se observa nas contagens dos detectores?

Cerca de 50% dos fótons é absorvida em cada detector e, cada detecção é representada por uma luzinha sobre o detector. Estas luzinhas nunca acendem simultaneamente. Não se observa figura de interferência nos detectores, visto que os fótons são absorvidos. Acelerando-se as emissões verifica-se que a distribuição das detecções continua em cerca de 50% para cada detector.

13- Considerando apenas um fóton sendo emitido na fonte, descreva como se comporta um espelho semi-refletor. Obs.: um espelho semi-refletor (separador de feixe) divide um feixe luminoso em dois feixes de igual intensidade.

Tudo depende do arranjo experimental que o fóton encontra. No caso descrito acima, em que há um detector em um dos braços ou um detector em cada um dos braços do interferômetro, a trajetória do fóton fica bem definida e o fóton se comportará como partícula. Assim, o fóton será refletido ou transmitido com a mesma probabilidade, seguindo por um dos caminhos do detector.

14- Se um fóton atravessa o aparelho de cada vez, como você descreve a formação do padrão de interferência observado na tela? (**Dica:** o padrão não foi formado pela interferência

entre diferentes fótons, pois, a cada instante apenas um fóton atravessa o interferômetro e chega aos anteparos).

Primeiramente, observe que para haver um padrão de interferência, não há detectores nos braços do interferômetro. Isso significa que, ao mandarmos um único fóton de cada vez para o interferômetro, não podemos dizer com certeza, qual o caminho que o fóton seguiu. Tudo se passa como se o fóton seguisse pelos dois braços ao mesmo tempo. Como o fóton não se divide, abrimos mão de conceber o fóton como uma partícula e pensamos no fóton como uma onda. A onda então, se divide em duas frentes de onda e cada uma segue por um braço. As ondas se reencontram, então, após o segundo espelho semi-refletor e podem exibir as interferência destrutiva ou construtiva que determinam as probabilidades de detecção do fóton em cada posição do anteparo.

15- Vamos agora testar a atuação dos filtros polaroides. Clique na janela FILTRO POLAROIDE 1 e selecione a opção FÓTONS ÚNICOS. Que padrão é observado nos anteparos?

Observa-se o mesmo padrão de interferência obtido com luz laser ou com os fótons únicos. Nesse simulador, a fonte operando no modo LASER emite luz linearmente polarizada. Você poderá usar dois polarizadores perpendiculares entre si para determinar a polarização da luz e conseqüentemente, a polarização do fóton.

16 Coloque, agora, o filtro polaroide 2 no interferômetro. Houve alguma alteração em relação ao que você observou antes?

A presença do polaroide 2 não afetou as figuras de interferência.

17- Mude a inclinação de um dos filtros polaroides, digitando um valor para o ângulo ou girando-o diretamente. Descreva os padrões de interferência observados. Houve alguma alteração em relação ao que foi observado nas questões 2 e 3? Tente explicar o que você observou.

Os fótons são absorvidos quando se altera a inclinação do filtro polaroide. Dessa forma, observa-se que quanto maior é o ângulo de inclinação do filtro polaroide, mais o padrão de interferência se distancia do padrão observado anteriormente. As figuras de interferência começam a ficar borradas.

18- A detecção de cada fóton nos anteparos ocorre de forma localizada, numa posição definida. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição bem definida? Proponha uma maneira de descobrir isto usando uma combinação de filtros polaroides.

Sim, é possível descobrir por onde o fóton passou. Quando o filtro polaroide está em 90^0 as detecções não formam padrão de interferência. Se colocarmos um filtro polaroide perpendicular ao outro podemos saber por qual dos caminhos o fóton passou.

19- Vamos tentar descobrir por qual caminho passa o fóton usando dois filtros polaroides, um em cada braço do interferômetro, com uma inclinação relativa de 90^0 entre eles. Assim, se o fóton passar por apenas um dos braços, terá que sair do interferômetro, necessariamente, com sua polarização dada pelo eixo de polarização do filtro polaroide que se encontra naquele braço. Como você poderá descobrir qual o estado de polarização do fóton emergente?

Colocando-se os três filtros polaroides no interferômetro e inclinando todos eles em 90^0 , observa-se que todos os fótons são absorvidos. Quando os três filtros polaroides estão com inclinação 0^0 nenhum fóton é absorvido. Verifica-se, portanto, que o fóton tem polarização horizontal. Assim, se colocarmos o primeiro e o terceiro filtro polaroide com 90^0 de inclinação e o segundo com 0^0 , observamos que o fóton passou pelo caminho onde está o segundo filtro polaroide.

Também é possível orientar o segundo e terceiro filtro polaroide, deixando o primeiro com 0^0 , verifica-se que o fóton segue o caminho do primeiro filtro.

20- Selecione a orientação do filtro polaroide 1 para 0^0 ou 360^0 e posicione o filtro polaroide 3 de modo que fique com orientação paralela ao primeiro. O que se observa nos anteparos?

Se o filtro polaroide 2 também estiver em 0^0 ou em 360^0 , os fótons serão detectados nos anteparos, formando figuras de interferência. Caso o filtro polaroide 2 esteja com uma inclinação diferente de 0^0 ou 360^0 , observa-se que as figuras de interferência começam a desaparecer, vindo a ser representadas simplesmente por pontos que não revelam figuras de interferência nos anteparos.

21- O fóton tem ou não o atributo posição definido?

Sim, ele segue pelo caminho onde o filtro polaroide está com a mesma inclinação do filtro polaroide 3.

22- E então, por onde passou o fóton? (**Dica:** cruze os eixos dos polaroides.)

Se o filtro polaroide 1 está paralelo a filtro polaroide 3, o fóton segue o caminho 1. Caso o filtro polaroide 2 esteja paralelo ao filtro polaroide 3, o fóton irá seguir o caminho 2.

23-

a) O que o resultado obtido no experimento até agora significa para o nosso modelo mental do fóton como um objeto que possui o atributo posição dentro do interferômetro?

b) Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo dentro do interferômetro?

c) E quando não se observa um padrão de interferência? Por quê? (Dica: se os fótons possuísem o atributo posição quando dentro do aparelho, então cada fóton só poderia interagir com um dos polaroides nos braços do aparelho, certo?).

a) O fóton é uma partícula que “carrega” a informação posição.

b) Quando se observa o padrão de interferência, o fóton não tem o atributo posição no interferômetro, podendo ter passado por qualquer um dos caminhos.

c) Quando não se observa o padrão de interferência é possível descobrir o caminho seguido pelo fóton. A possibilidade de cada fóton só poder interagir com um dos polaroides nos braços do aparelho não se sustenta. Para o fóton “saber” se ele está destinado a atingir a tela onde antes de termos cruzado os eixos dos polaroides havia um mínimo de interferência e não chegava luz, ele teria que dispor da informação sobre os eixos de polarização de ambos os polaroides e não apenas daquele pelo qual ele teria passado, de acordo com o modelo mental de partícula possuidora do atributo posição.

24- Coloque os detectores 1 e 2 no interferômetro. Verifique se os dois detectores registram simultaneamente a entrada de cada fóton individual no interferômetro. O que você observa?

O fóton segue o caminho 1 ou 2, visto que não ocorre detecção simultânea.

25- Com os dois detectores de fótons colocados no interferômetro, qual a probabilidade de detecção do fóton no detector 1? E no detector 2?

A probabilidade de detecção é de cerca de 50% em cada detector.

26- Considerando o item acima tente dar uma explicação em torno da dualidade onda-partícula para o que ocorre com o estado do fóton quando tentamos descobrir por qual dos braços ele passa.

Quando usamos polarizadores ou detectores de forma que o arranjo experimental permita saber qual o caminho seguido pelo fóton, então podemos inferir qual caminho o fóton seguiu. Nesse caso, dizemos que o fóton tem o atributo posição. Tendo o atributo posição, tudo acontece como se o fóton fosse uma partícula e como consequência, não verificamos nenhum padrão de interferência. Vale ressaltar que somente ondas exibem um padrão de interferência e ondas não têm o atributo posição definido.

Ao fim dessa atividade o aluno deverá ser capaz de:

- Reconhecer que no IMZ Clássico os feixes A e B que chegam do detector D1 não têm diferença de fase entre si (interferência construtiva) - 100% do feixe original.
- Reconhecer que os feixes A e B, no IMZ Clássico, que chegam do detector D2 têm diferença de fase de $\lambda/2$ entre si (interferência destrutiva) – 0% do feixe original.
- Concluir que esse experimento, IMZ Clássico com a luz, é um fenômeno ondulatório.
- Concluir que o IMZ Quântico com trajetória indefinida, tem o mesmo comportamento do IMZ Clássico, interferência construtiva em D1 e, destrutiva em D2.
- Concluir que nesse experimento, IMZ Quântico com trajetória indefinida, o fenômeno é ondulatório.
- Reconhecer que no IMZ Quântico com trajetória definida o padrão de interferência desaparece.
- Concluir que nesse experimento, IMZ Quântico com trajetória definida, o fenômeno é corpuscular.
- Distinguir as diferenças filosóficas das interpretações.
- Reconhecer a interpretação da complementaridade como a mais aceita pela comunidade científica.
- Ser capaz de enunciar a versão forte.

Por fim apresentarem a última atividade dessa sequência didática: Avaliação dos resultados das atividades anteriores.

2.7 AVALIAÇÃO DAS ATIVIDADES ANTERIORES.

Por fim esta última atividade tem por objetivo a obtenção de dados através da aplicação de um teste de escolha simples, observações e anotações que permitirá, após uma análise quantitativa descritiva, a validação ou não da respectiva sequência didática, bem como efetivar possíveis correções.

Salientamos que, devido à evasão escolar, o número de alunos diminuiu de modo significativo. Iniciamos a nossa proposta com 20 alunos e a concluímos com um total de 15 alunos.

A seguir apresentaremos as questões do teste simples que foi aplicado aos alunos, o resultado quantitativo e alguns comentários sobre a intenção de cada questão e sobre o resultado obtido. Destacamos que esse teste de escolha simples se encontra no apêndice D de nossa dissertação.

QUESTÕES DO TESTE DE ESCOLHA SIMPLES E ANÁLISE DO RESULTADO:

- Questão 1:

Quando uma teoria não consegue explicar um determinado fenômeno observado, o que devemos fazer?

- a) Abandonar a teoria. (0%)
- b) Tentar ajustar a teoria. (26,7%)
- c) Utilizar outra teoria e abandonar a anterior. (13,3%)
- d) Utilizar outra teoria e não abandonar, necessariamente, a anterior. (60,0%)

Esta questão procura colocar em discussão a postura de uma pessoa (aluno ou cientista) diante de uma possível ruptura científica. Destacamos que a ideia de ruptura científica foi motivo de discussão polêmica em sala de aula, gerando debates bastantes produtivos. Entendemos que a ruptura entre a Física Clássica e a Mecânica Quântica ficou bem caracterizada nas atividades, bem como o entendimento que o surgimento de uma nova teoria não torna, necessariamente, a antiga teoria obsoleta. De uma total de 15 alunos, 9 marcaram alternativa d (60%) o que evidencia no nosso entender, que os debates sobre este tema foram efetivos e produtivos.

- Questão 2:

Considerando a metáfora da árvore discutida em sala de aula, qual a sua opinião?

- a) Realista, emite o mesmo som que sempre emitiu, haja alguém para ouvir ou não. (40,0%)
- b) Antirrealista, somente ao estar lá para escutá-la é que a presença ou a ausência de som ganha existência. (26,6%)
- c) Instrumentalista, pouco importa se a árvore iria ou não fazer barulho e qual seria se ninguém estivesse ouvindo, pois o importante é se o modelo utilizado para descrever sua queda funciona ou não. (13,3%)
- d) Empirista, a pergunta não faz sentido, pois somente as observações seriam um modo seguro de se ter conhecimento. (20,0%)

Aqui, procuramos destacar a posição filosófica do aluno diante do conhecimento científico e também diante do seu cotidiano, como Realista ou com Antirrealista. Destacamos que nesta discussão em sala de aula foi utilizado um texto de apoio elaborado pela nossa proposta com este fim. A metáfora da árvore foi apresentada e discutida em sala de aula, gerando um certo “alvoroço” da turma. Na época a turma se mostrou bastante dividida nas suas opiniões. As respostas a esta questão evidenciam, ainda, esta divisão. A maioria se mostrou Realista (40,0%).

Ainda sobre a questão, O que é Real, tivemos dois momentos lúdicos, com os filmes: Matrix e O Show de Truman.

De acordo com os resultados do teste: 40,0% se dizem Realistas; 26,7% se dizem Antirrealistas; 13,3% se dizem Instrumentalistas e 20% se dizem Empiristas.

- Questão 3:

Um dos assuntos trabalhado em sala de aula foi a interação da radiação eletromagnética com a matéria através do efeito fotoelétrico, aonde vimos que a luz quando incide sobre determinado material, poderá arrancar elétrons deste material. Vimos que a Física Clássica não era capaz de explicar a totalidade do fenômeno. A teoria que é capaz de explicar este efeito:

- a) Considera esse fenômeno ondulatório. (13,3%)
- b) Considera esse fenômeno corpuscular. (66,7%)
- c) Considera esse fenômeno ondulatório e corpuscular. (20,0%)

Nesta questão, embora implicitamente, envolve a ruptura destacada anteriormente, bem como a nova teoria que responde a questão da interação radiação- matéria. Este tema foi

discutido em sala de aula através do efeito fotoelétrico, com o auxílio de um texto de apoio. Consideramos que o objetivo foi alcançado, pois 66,7% dos alunos responderam que a teoria capaz de explicar o fenômeno considera o efeito fotoelétrico como um fenômeno corpuscular.

- Questão 4:

Para explicar o efeito fotoelétrico é necessário considerar a interação da luz com a matéria, como uma interação do tipo:

- a) Partícula-partícula. (53,4%)
- b) Onda-onda (13,3%)
- c) Partícula-onda (13,3%)
- d) Onda-partícula (20,0%)

Esta questão, implicitamente, remete à questão discutida em sala de aula sobre a interação radiação-matéria ocorrer instantaneamente, portanto, do tipo partícula-partícula. Foi discutido em sala de aula e devidamente exemplificado, tanto as interações instantâneas (partícula-partícula), bem como aquelas que requerem um certo tempo para se efetivarem (onda-partícula). Mais da metade da turma identificaram o efeito foto elétrico, devido ao fato de serem instantânea, com a interação partícula-partícula.

- Questão 5:

A constante de Planck determina o limite onde a mecânica clássica não pode ser aplicada. A ordem de grandeza dessa constante:

- a) Faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópico. (13,3%)
- b) Não faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópicos porque é um número muito grande. (20,0%)
- c) Não faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópico porque é um número muito pequeno. (66,7%)

Na nossa proposta didática a constante de Planck aparece pela primeira vez no estudo da interação da radiação eletromagnética com a matéria e que tal constante se apresenta como limite de aplicação da Mecânica Clássica. Nesta oportunidade destacamos a ordem de grandeza desta constante e discutimos a ordem de grandeza da escala humana. A maioria da turma, 66,7%, aproveitaram bem as discussões.

-Questão 6:

Quando um fenômeno (objeto+arranjo experimental) registra um padrão de interferência, podemos afirmar:

- a) O fenômeno é corpuscular. (6,7%)
- b) O fenômeno é ondulatório. (66,6%)
- c) O fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular. (20,0%)
- d) O fenômeno não é ondulatório e nem corpuscular. (6,7%)

Com esta questão começamos a avaliar a dualidade onda partícula. As atividades pedagógicas deste tema teve a contribuição de um texto de apoio. O resultado desta questão chama a atenção para o fato de que em Mecânica Quântica o fenômeno deve ser considerado na sua completeza e que um fenômeno ondulatório pode ser caracterizado pelo padrão de interferência que aparece na sua detecção. A maioria dos alunos (66,6%) compreenderam as exposições feitas em sala de aula.

- Questão 7:

No experimento da fenda dupla com esferas não houve o registro do padrão de interferência. No experimento da fenda dupla com ondas produzidas na superfície na água numa cuba, bem como, no experimento com elétrons, houve o registro do padrão de interferência. No entanto, quando era localizada a fenda pela qual o elétron passava através de uma iluminação adequada, o padrão de interferência não era mais registrado. Sobre o experimento da fenda dupla com elétrons, podemos afirmar:

- a) Trata-se de um fenômeno exclusivamente corpuscular, pois o elétron é uma partícula. (13,3%)
- b) Trata-se de um fenômeno exclusivamente ondulatório, pois o elétron é uma onda. (0%)
- c) Trata-se de um fenômeno ondulatório e o fato de iluminar o elétron não altera sua natureza. (0%)
- d) Inicialmente trata-se de um fenômeno ondulatório, mas quando o elétron é localizado, através de uma iluminação adequada, o fenômeno passa a ser corpuscular, pois a natureza do elétron foi alterada. (40%)

e) Inicialmente trata-se de um fenômeno ondulatório, mas quando o elétron é localizado, através de uma iluminação adequada, o fenômeno passa a ser corpuscular, pois a natureza do experimento foi alterada. (46,7%)

Verificamos que após a discussão da difração de elétrons 86,7% dos alunos entenderam que o fenômeno pode ser entendido como ondulatório ou como corpuscular, dependendo se está ou não identificada a fenda pela qual os elétrons passam, através de uma iluminação adequada.

No entanto, o fato dos elétrons estarem sendo “iluminados” adequadamente, altera a natureza do elétron ou a natureza do experimento, ficou dividida: 40% concluíram que a natureza do elétron foi alterada pela iluminação e 46,6% concluíram que a natureza do experimento é que foi alterada.

- Questão 8

No experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder, tanto no regime clássico como no regime quântico, um dos detectores registrou uma contagem de 100% enquanto o outro registrou 0%. Isto só pode ser explicado pelo fenômeno da interferência. Neste caso o experimento, na sua totalidade, caracteriza um fenômeno:

- a) Ondulatório. (46,7%)
- b) Corpuscular. (13,3%)
- c) Ondulatório e corpuscular. (20,0%)
- d) Ondulatório ou corpuscular. (20,0%)

Esta e a próxima questão envolvem a dualidade estudada através do Interferômetro Mach-Zehnder, com texto de apoio. Nesta questão buscamos destacar que este padrão, 100% num dos detectores e 0% no outro, é equivalente ao padrão de interferência, caracterizando, então, o fenômeno como ondulatório. Podemos qualificar o resultado como razoável se comparado com os resultados obtidos com as questões da fenda dupla.

- Questão 9:

Num experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder, no regime quântico, o caminho pelo qual o fóton percorre foi determinado. Cada um dos detectores registrou uma contagem de 50%. Neste caso o experimento, na sua totalidade, caracteriza um fenômeno:

- a) Ondulatório. (13,3%)
- b) Corpuscular. (46,7%)
- c) Ondulatório e corpuscular. (20,0%)
- d) Ondulatório ou corpuscular. (20,0%)

Os resultados desta questão corroboram os resultados da questão anterior e nossa análise é semelhante à análise da questão anterior.

Nesta questão em particular estamos destacando o fato da trajetória seguida pelos fótons no interior do interferômetro estar determinada nos levando concluir que tal fenômeno é corpuscular.

- Questão 10:

De acordo com o postulado quântico, a interação entre a matéria e a radiação eletromagnética se dá pela troca de energia de maneira _____, com a matéria absorvendo _____, cuja energia é proporcional a _____ da radiação.

Assinale a alternativa correta que, pela ordem, preenche corretamente as lacunas:

- a) Contínua – quanta – amplitude. (20,0%)
- b) Discreta – prótons – frequência. (6,7%)
- c) Discreta – fótons – frequência. (46,7%)
- d) Contínua – elétrons – intensidade. (13,3%)
- e) Contínua – nêutrons – amplitude. (13,3%)

Por fim, com esta questão, buscamos avaliar o entendimento do aluno sobre o postulado quântico. A maioria dos alunos, 53,4%, entende que a absorção de energia se dá de forma discreta, mas destes, 6,7%, mostraram certa confusão entre fóton e próton, o que não faz muito sentido. Talvez isto seja resultado de certa desatenção na hora de assinalar a resposta. Destaco que este percentual de 6,7% corresponde um aluno.

Após as atividades propostas e a discussão dos resultados do teste avaliativo, o aluno deverá ser capaz de concluir:

- que as propriedades atribuídas a uma partícula dependem das características do dispositivo experimental;
- que toda medida perturba o sistema medido;

- que toda medida deve-se a uma interação entre o objeto microscópico sobre o qual se efetua a medida e o instrumento de medida, que é macroscópico;
- que existe uma ligação indestrutível, não nula, entre o objeto e o aparelho de medida;
- que as propriedades de uma partícula não podem ser separadas das condições de sua manifestação;
- que um aparelho de medida pode tornar evidente uma grandeza específica, mas não outra;
- que o arranjo experimental determina o tipo de fenômenos observados;
- que nenhuma experiência revela um fenômeno ondulatório e corpuscular simultaneamente.
- que nos experimentos da fenda dupla e do interferômetro de Mach-Zehnder só podemos calcular a probabilidade de que determinada partícula se manifeste num determinado ponto da tela detectora;

3 CONCLUSÃO

A nossa proposta de sequência didática versando sobre a dualidade onda partícula, como uma atividade para efetivamente inserir a Mecânica Quântica no Ensino Médio, já anteriormente justificada, nos permitiu concluir, durante o processo de sua elaboração, pela análise dos textos sobre a dualidade onda-partícula e sobre o princípio da incerteza presentes nos livros didáticos do Programa Nacional do Livro Didático – 2012, com validade de três anos (2012, 2013 e 2014), uma tendência Realista na descrição dos referidos textos, bem como identificar alguns obstáculos epistemológicos, realista, substancialista e do conhecimento quantitativo, que podem tornar-se obstáculos pedagógicos.

É importante destacar, que os livros do PNLD-2015, quando comparados com a versão PNLD-2012, apresentam certa tendência apontando para uma descrição Não Realista. Este fato nos leva a pensar numa intervenção futura no sentido de continuarmos analisando os livros didáticos para confirmar ou não esta tendência.

A sequência didática, como foi proposta, permitiu uma fértil discussão das filosofias no desenvolvimento científico, principalmente o debate entre o Realismo e Antirrealismo, que de certa maneira favoreceu o entendimento das várias Interpretações da Mecânica Quântica, destacando a Interpretação da Complementaridade.

Após a aplicação da proposta, pelos resultados do teste avaliativo, podemos concluir que a maioria dos alunos apresenta uma visão realista. Fato este não nos é estranho, pois esta é a visão predominantemente no senso comum. Mas, apesar, disto, eles reconhecem que existem outras filosofias igualmente importantes.

Destacamos, também, que a ruptura científica, devido à necessidade de explicar determinados fenômenos que a física clássica não dava conta e da necessidade da descrição microscópica da realidade, ocorre com a formulação de uma nova teoria: a Mecânica Quântica. Concluímos que nossos alunos ficaram cientes desta ruptura após a aplicação da nossa proposta. Em particular, chamou nossa atenção, a unanimidade das respostas do teste em não se abandonar a teoria superada na ruptura.

A ordem de grandeza envolvida na Mecânica Quântica, também ficou clara aos alunos com o conhecimento da constante de Planck, que aqui apareceu pela primeira vez nas aulas sobre a interação radiação- matéria. Que a ordem de grandeza da constante de Planck não faz parte da escala de ordem de grandeza do cotidiano das pessoas, também foi compreendido pelos nossos alunos, bem como o entendimento de que essa constante pode ser encarada como o limite de aplicação da Física Clássica.

O entendimento de que em física quântica, o fenômeno deve ser considerado na sua totalidade e, que um determinado objeto quântico, dependendo do arranjo experimental, pode ser um fenômeno ondulatório ou corpuscular, mas não ambos simultaneamente, segundo a Interpretação da Complementaridade, foi entendido pela maioria do alunos.

A possibilidade da luz, encarada inicialmente como onda, associada a um determinado experimento ser um fenômeno corpuscular, assim como, o elétron, tido inicialmente como partícula, associado a um determinado experimento, constituir-se num fenômeno ondulatório, não é mais novidade para nossos alunos.

Isto tudo posto justifica a validação de nossa proposta em princípio, pois é evidente que ajustes serão necessários, tanto na proposta como na ação pedagógica, visto que “no hay camino , se hace camino al andar” (ANTÔNIO MACHADO).

4 REFERÊNCIAS

4.1 REFERÊNCIA UTILIZADA NESSE INSTRUMENTO EDUCACIONAL

SILVA, J. K. L. da. Uma proposta de ensino de tópicos da mecânica quântica sob a ótica de Bachelard. Bagé: Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Ciências), Universidade Federal do Pampa, 2015.

4.2 REFERÊNCIAS UTILIZADAS NA DISSERTAÇÃO

ANDRADE, R. R. D.; NASCIMENTO, R. S.; GERMANO, M. G. Influências da física moderna na obra de Salvador Dalí. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 3, 2007. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/artcle/view/6243/5794>>. Acesso em: 10 agosto 2014.

ARLEGO, M. J. F. Los fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela secundaria utilizando el concepto de integral de camino. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, ano 3, n. 1, 2008. Disponível em: <http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/ano-3-nro1/REIEC_ano3_num1_art6.pdf?attredirects=0> Acesso em: 03 maio 2014.

BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico**: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto. 2011, 316p. 9ª Reimpressão. [Tradução Estela dos Santos Abreu].

_____. **O novo espírito científico**. 2ª edição. Edições Tempo Brasileiro. 1985. 151p. [Tradução Juvenal Hahne Júnior].

_____. **A filosofia do Não**. Filosofia do novo espírito científico. 3ª edição. Lisboa: Editorial Presença. 1984. 138p. [Tradução Joaquim José Moura Ramos].

_____. **O racionalismo aplicado**. Zahar Editores. 1977. 244 p. [Tradução Nathanael C. Caixeiro].

_____. **El materialismo racional**. Buenos Aires, Paidós. 1976. [Tradução Elsa Repetto e Nora Martínez Castrillón].

BROCKINGTON, Guilherme. **A Realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do ensino médio**. 2005. 268 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências)- Instituto de Química, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo.

BOHR, Niels. **Física atômica e conhecimento humano**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Contraponto. 1996. 140p. [Tradução de Vera Ribeiro].

BUNGE, Mario. **Epistemologia**: curso de atualização. T. A. Queiroz, Editor e Editora da Universidade de São Paulo. 1980. 246 p. [Tradução de Claudio Navarra].

_____. **Ciência e desenvolvimento**. Editora Itatiaia limitada e Editora da Universidade de São Paulo. 1980. 135 p. [Tradução de Cláudia Regis Junqueira].

CARVALHO NETO, R. A.; FREIRE JÚNIOR, O.; SILVA, J. L. P. B. Improving students' meaningful learning on the predictive nature of quantum mechanics. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 1, 2009. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID207/v14_n1_a2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2014.

COSTA, R. R. D.; NASCIMENTO, R. S.; GERMANO, M. G. Salvador Dalí e a mecânica quântica. **A física na escola**, v. 8, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a06.pdf>>. Acesso em: 03 agosto 2014.

CUPPARI, A., RINAUDO, G., ROBUTTI, O., VIOLINO, P. Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. **Physics Education**, Bristol, v. 32, n. 5, p.302-308, Sept. 1997.

DAGOGNET, François. **Bachelard**. Lisboa: Edições 70. 1980. 102p. [Tradução Alberto Campos].

DOCA, Ricardo Helou; GUALTER, José Biscuola; NEWTON, Villas Bôas. **Física**. São Paulo: Saraiva, 2010. v.3.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A Evolução da Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor. 2008. 244 p. [Tradução de Giasone Rebuá].

FANARO, M. A.; ARLEGO, M.; OTERO, M. R. El Método de Caminos Múltiples de Feynman como Referência para Introducir los Conceptos Fundamentales de la Mecánica Cuántica en la Escuela Secundaria. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/1090/849>>. Acesso em: 03 maio 2014.

FANARO, M. A.; OTERO, M. R.; ARLEGO, M. Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 1, 2009a. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID205/v14_n1_a2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2014.

FANARO, M. A.; OTERO, M. R.; MOREIRA, M. A. Teoremas-en-acto y conceptos-en-acto en dos situaciones relativas a la noción de sistema cuántico. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 9, n. 3, 2009b. Disponível em: <<http://www.fae.ufmg.br/abrapec/revistas/V9N3/v9n3a1.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2014.

FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. Modern physics and students' conceptions **Interna**

tional journal of Science Education, London, v. 14, n. 2, p. 181-190, Apr./June 1992.

GASPAR, Alberto. **Compreendendo a Física**. São Paulo: Ática, 2010, v.3.

GIL, D. P., SENENT, F., SOLBES, J. Análisis crítico de la introducción de la física moderna en La enseñanza media. **Revista de Enseñanza de la Física**, Rosario, v. 2, n. 1, p. 16-21, abr. 1988.

_____. La introducción a la física moderna: un ejemplo paradigmático de cambio conceptual. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, p. 209-210, set. 1987. n. extra.

GIL, D. P., SOLBES, J. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. **International Journal of Science Education**, London, v. 15, n. 3, p. 255-260, May/June 1993.

GONÇALVES FILHO, Aurélio; TOSCANO, Carlos. **Física e realidade**. São Paulo: Scipione, 2010, v.3.

HESEEN, JOANNES. **Teoria geral do conhecimento**. 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

JAPIASSU, Hilton. **Introdução ao pensamento epistemológico**. 7ª edição. Rio de Janeiro: F. Alves. 1992. 202p.

JOHANSSON, K. E.; MILSTEAD, D. Uncertainty in the classroom – teaching quantum physics. **Physics Education**, v. 43, n. 2, 2008. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/43/2/006/pdf/0031-9120_43_2_006.pdf>. Acesso em: 03 maio 2014.

KANTOR, Carlos; PAOLIELLO JR., Lilio A.; MENEZES, Luis Carlos de; BONETTI, Marcelo de C.; CANATO JR., Osvaldo; ALVES, Viviane M. **Quanta Física**. São Paulo: PD, 2010. v.3.

KAZUHITO, Yamamoto; FUKE, Luiz Felipe. **Física para o ensino médio**. São Paulo: Saraiva, 2011, v.3.

KLEIN, Étienne. **A Física Quântica**. Lisboa: Instituto Piaget, 1996. 129p. [Tradução João C. S. Duarte].

LOPES, Alice Casimiro. **Currículo e epistemologia**. Ijuí: Unijuí, 2007. 232p.

LUZ, Antônio Máximo Ribeiro da; ÁLVARES, Beatriz Alvarenga. **Curso de Física**. São Paulo: Scipione, 2010, v.3.

MOREIRA, Marco Antônio. **Metodologia de pesquisa em ensino**/Marco Antônio Moreira. 1ª edição. São Paulo: Livraria da Física, 2011. 242p.

_____. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (semtec). **PCN+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos**

Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC/Semtec. 2002.

_____. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Básica (SEB). **Orientações Curriculares para o Ensino Médio.** Brasília: MEC/SEB. 2008.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física moderna e contemporânea no ensino médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.5, n.1, 2000. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID57/v5_n1_a2000.pdf>. Acesso em: 12 agosto 2014.

OSTERMANN, F; RICCI, T. **Uma introdução conceitual à mecânica quântica para professores do ensino médio.** Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 2003. (Textos de apoio ao professor de Física, n.14).

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro de Mach-Zehnder. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 8, n. 3, 2009. Disponível em: <http://saum.uvigo.es/reec/volumenes/volumen8/ART18_Vol8_N3.pdf>. Acesso em: 12 agosto 2011.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 193 - 203, (2005). Disponível em <www.sbfisica.org.br>

OTERO, M. R.; FANARO, M. A.; ARLEGO, M. Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la Física en la Escuela Secundaria: Nociones Cuánticas. **Revista Electrónica de Investigación en Educación em Ciencias**, ano 4, n. 1, 2009. Disponível em: <http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/ano4-nro-1/REIEC_anio4_num1_art6.pdf?attredirects=0>. Acesso em: 03 maio 2014.

PAULO, I. J. C. de. **Elementos para uma proposta de inserção de tópicos de física moderna no ensino de nível médio.** Cuiabá: Instituto de Educação – UFMT, 1997. Diss. Mestr. Educação.

PESSOA Junior, Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica/** Osvaldo Pessoa jr. 3ª edição. São Paulo: Livraria da Física, 2006. 189p.

PIETROCOLA, Maurício; POGIBIN, Alexandre; ANDRADE, Renata de; ROMERO, Talita Raquel. **Física em contextos: pessoal, social e histórico.** São Paulo: FTD, 2011. v.3.

PINTO, A.C., ZANETIC, J. É possível levar a Física Quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/download/6873/6333>>. Acesso em 12 agosto 2014.

POSPIECH, G. Teaching the EPR paradox at high school? **Physics Education**, v. 34, n. 5, 1999. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/34/5/307/pdf/00319120_34_5_307.pdf>. Acesso em 12 agosto 2011.

RUZZI, M. Física Moderna: teorias e Fenomenos. 2ª edição. Curitiba: editora IBPEX, 2008.

SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H. L.; CASTRO FILHO, J. A.; PEQUENO, M. C. Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 3, Seção Produtos e Materiais Didáticos, 2008. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/303501.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2014.

SANT'ANA, Blaide; MARTINI, Gloria; REIS, Hugo Carneiro; SPINELLI, Water. **Conexões com a Física**. São Paulo: Moderna, 2010.v.3.

SILVA, A. C. da; ALMEIDA, J. P. M. de. Física Quântica no Ensino Médio: o que dizem as pesquisas. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 28, n. 624 3: p. 624-652, dez. 2011. Disponível <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2011v28n3p624>>. Acesso em 12 agosto 2014.

SILVA, Claudio Xavier da; BARRETO FILHO, Benigno. **Física aula por aula**. São Paulo: FTD, 2010, v.3.

SILVA, Ilton Benoni da. **Inter-relação: a pedagogia da ciência: uma leitura do discurso epistemológico de Gaston Bachelard**. 2ª edição. Ijuí: Unijuí, 2007.176p.

SOLBES, J., CALATAYUD, M. L., CLIMENT, J. B., NAVARRO, J. Diseño de un currículum para la introducción del modelo atómico cuántico. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 5, p. 209-210, sept. 1987a. n. extra.

_____. Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v.5, n.3, p. 189-195, nov. 1987b.

HESEEN, JOANNES. **Teoria geral do conhecimento**. 2ª edição. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

TORRES, Carlos Magno A.; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. **Física Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Moderna, 2010. v.3.

APÊNDICE A–Texto de apoio sobre realismo e antirrealismo

O realismo científico e o antirrealismo

Na primeira metade do século XX surge a Mecânica Quântica, como uma nova maneira de enxergar o mundo, que num primeiro momento parece estar em desacordo com as teorias da física clássica e em total desacordo com o senso comum. Para o seu entendimento são necessárias novas ideias, novos pensamentos e uma nova percepção das coisas, visto que a noção de natureza, na Mecânica Quântica, parece estar além da imaginação. A grande relevância da imaginação nas ciências de um modo geral é destacada por Richard Feynman:

Eu lhes peço que imaginem os campos magnéticos e elétricos. O que fazem? Sabem como? Que eu vejo normalmente? Quais são as exigências da imaginação científica? É algo diferente de imaginar uma sala cheia de anjos invisíveis? Não, não é como imaginar anjos invisíveis. É necessário um grau maior de imaginação para compreender o campo eletromagnético que para compreender anjos invisíveis. Por quê? Porque para se compreender os anjos invisíveis, tudo o que tenho que fazer é alterar suas propriedades um pouquinho – imagino-os ligeiramente visíveis e então posso ver as formas de suas asas e de seus corpos. Uma vez que consigo imaginar um anjo visível, a abstração necessária – que torne os anjos quase invisíveis é imaginá-los completamente invisíveis – é relativamente fácil. Então vocês dirão: “professor, me dê uma descrição completa de ondas eletromagnéticas, embora seja ligeiramente inexata, de modo que eu possa vê-las como posso ver os anjos invisíveis.” Eu sinto que não posso fazer isso. Não sei como fazê-lo. Não tenho nenhuma imagem do campo eletromagnético que de algum modo seja precisa. [...] Nossa ciência apresenta terríveis dificuldades de imaginação. O grau de imaginação necessário é muito mais extremo que o necessário para algumas ideias antigas. As ideias modernas são muito difíceis de imaginar. E usamos muitas ferramentas. Usamos equações e regras matemáticas e construímos um montão de imagens. [...] Se deve ter suficiente imaginação para se conceber algo que nunca tenha sido visto ou ouvido (FEYNMAN, 1964, p.20 apud BROCKINGTON, 2005, p.27).

No contexto da Mecânica Quântica a relação do homem com a natureza é modificada, abrindo espaço para uma profunda análise das concepções de ciência e sua capacidade de construção de imagens da realidade, concomitantemente com um importante debate filosófico. Na mecânica quântica a resposta à pergunta: o que é real, não é tão simples.

Deste debate, principalmente sobre a existência ou não de uma realidade independente e da possível possibilidade de acessá-la, surgiram duas correntes filosóficas antagônicas que buscam, ambas, compreender e revelar as relações entre o conhecimento humano e a realidade ao qual o conhecimento se refere: o Realismo e o Antirrealismo.

O realismo sustenta que o mundo físico existe independentemente do pensamento e da percepção humana, diferenciando o que existe realmente e o que se acredita que existe. O

antirrealismo, ao contrário, afirma que o mundo físico é de algum modo dependente da atividade consciente dos seres humanos.

Para muitas pessoas, o realismo parece mais plausível do que o antirrealismo. Pois o realismo se acomoda bem à perspectiva do senso comum de que os fatos sobre o mundo estão “lá fora” esperando serem descobertos por nós, ao passo que o antirrealismo não.

É possível distinguir o realismo em um sentido ontológico, relativo às essências das coisas, cuja tese defende a existência de uma realidade independente de nossa mente, de nossa observação e em um sentido epistemológico, relativo ao conhecimento, que defende a tese que é possível conhecer esta realidade e que a teoria científica também se aplica para a realidade não observada. Ao considerar o conhecimento científico o realismo epistemológico assume a forma do chamado realismo científico.

Na visão realista, apesar do ser humano criar representações mentais e linguísticas, ao eliminar-se o sujeito e a consciência, esta realidade autônoma continuará existindo.

No século XIX o termo *realismo* surgiu principalmente nas artes como reação ao *romantismo*, realçando o cotidiano e o social, se colocando numa posição política mais progressista. Particularmente nas ciências o realismo desta época estava associado ao mecanicismo e ao atomismo, valorizando a quantificação e o método hipotético-dedutivo, em oposição ao positivismo de Comte que defendia a tese de que qualquer especulação sobre mecanismos ocultos deveria ser evitada. Para o positivismo só teria sentido tecer afirmações sobre o que é observável ou verificável e a análise da realidade deve ser feita através das observações e das constatações racionais.

Já no século XX, particularmente no final da década de 1920, se estabelece uma nova Mecânica Quântica, e todas tentativas realistas para interpretá-la fracassam. A visão que se impõe quase unânime destaca uma conexão íntima entre o sujeito e o objeto e na década de 1930 diversas correntes idealistas (antirrealistas) propõe a inseparabilidade entre o sujeito e o objeto.

Após a segunda grande guerra ocorre uma reação às interpretações idealistas da Mecânica Quântica por uma visão que eliminasse o observador humano da descrição quântica da natureza, tal visão, realista objetivista, concebe uma realidade que pode ser descrita mesmo na situação em que não haja observador.

Já na década de 1990, quando parecia que o sujeito poderia ser eliminado da Mecânica Quântica, ressurgem as posições idealistas (antirrealistas).

Na história da Mecânica Quântica o antirrealismo nos leva a noção de complementaridade defendida por Bohr em 1928: “uma realidade independente no sentido

físico ordinário não pode ser atribuída nem aos fenômenos, nem aos agentes de observação”. Bohr defendia que a teoria só trata do observável, isto é, uma realidade não-observada pode até existir, mas ela não é descritível pela linguagem humana. A posição de Bohr modifica-se a partir de 1935 quando passa a dar ênfase para o “todo” do arranjo experimental. Junto com esta concepção de totalidade Bohr também defende uma concepção “relacionista” segundo a qual a realidade observada é fruto da relação entre o sujeito e o objeto, sendo dependente das escolhas e da vontade do observador.

Esta noção de complementaridade defendida por Bohr vem a se constituir na interpretação da complementaridade (ortodoxa ou de Copenhagen), a qual é, atualmente, a interpretação da mecânica quântica mais aceita pela comunidade científica.

A metáfora da árvore:

Essa metáfora tem suas limitações, pois trata-se de um fenômeno macroscópico em vez de escala atômica, nível no qual a Teoria Quântica é empregada. No entanto, o papel do observador (em uma abordagem mais filosófica sobre a realidade física) foi discutido de diversas formas por vários cientistas que contribuíram com a Teoria Quântica.

Que som faz uma árvore ao cair se não houver ninguém para ouvi-la?

Provavelmente não há uma única e correta resposta a essa pergunta, mas é possível traçar um paralelo entre as várias correntes filosóficas e as respostas dada a esta pergunta.

Alguns defendem que a árvore ao cair emiti o mesmo som que sempre emitiu, haja alguém para ouvir ou não. É uma concepção de **realismo**, num entendimento de que existe uma realidade independente, exterior à mente humana e a sua percepção. Nesse sentido, com frequência, a concepção realista está associada a uma visão determinística, o que significa que qualquer consequência pode ser explicada por uma causa bem determinada.

Os defensores da visão **antirrealista** diriam que a árvore pode emitir múltiplos sons ao cair, ou mesmo não emitir som algum, e que descrever esse fenômeno envolve considerar todas as alternativas. Somente ao estar lá para escutá-la é que a presença ou a ausência de som ganha existência. Em outras palavras, observar a queda da árvore é que determina o seu estado, se ele emite ou não som ao cair (e qual som). É, de certo modo, o que faz a interpretação de Copenhagen, expressão que se refere ao entendimento que Bohr e seus

seguidores deram à Mecânica Quântica. Nela, rejeita-se a ideia de uma realidade objetiva que independe do observador; é a nossa forma de medição que define a natureza do que é medido. E isso não caracteriza uma contradição da natureza, mas um sentido de complementaridade em que todos os estados a formam. É possível dizer que esta posição está ligada com uma espécie de idealismo, corrente para a qual o mundo físico depende de algum modo da atividade consciente dos seres humanos.

Outras correntes, que podem estar interligadas com as anteriores e entre si, são as do Instrumentalismo e do Empirismo.

Para o **Instrumentalismo**, pouco importa se a árvore iria ou não fazer barulho e qual seria se ninguém estivesse ouvindo, pois o importante era que o modelo utilizado para descrever sua queda funcionava e, quando alguém a ouvia, era o som predito pelo modelo. Segundo essa visão, a Física Quântica importa-se apenas com a capacidade de previsão de seus resultados. Sua formulação é capaz de explicar ou descrever os fenômenos estudados, não havendo necessidade de buscar uma interpretação ou uma existência real para os conceitos utilizados ao se fazer isso.

Para o **Empirismo**, a própria pergunta não faria sentido, pois somente as observações seriam um modo seguro de se ter conhecimento. Se não havia ninguém para ouvir a árvore, não haveria como saber o som que ela faria. Portanto, se não existir um meio de verificar se uma sentença é verdadeira ou falsa, não faz sentido se preocupar com tal questão.

APÊNDICE B– Texto de apoio sobre a interação entre a radiação e a matéria

Interação entre a radiação e a matéria

Objetos da Física Clássica

Na Física Clássica temos dois tipos de objetos cujos conceitos são familiares: os corpúsculos e as ondas.

Os corpúsculos (partículas) são entidades puntiformes bem localizados numa determinada região e em qualquer instante sua posição, sua velocidade e sua trajetória são bem determinadas, apresentando dimensões desprezíveis, isto é, em condições normais não se dividem (indivisibilidade).

As ondas são concebidas pela física clássica como excitações que se propagam em um meio transportando energia e informação, que se identificam com o movimento oscilatório das partículas do meio. Ao contrário dos corpúsculos, as ondas não estão bem localizadas, elas são espalhadas ocupando certa região espacial, apresentando, por tanto, um movimento deslocalizado. Outra diferença relevante é o fato das ondas não apresentarem a característica de serem indivisíveis.

Nas interações entre partículas a troca de energia ocorre instantaneamente, em pancadas ($\Delta t = 0$), como nas colisões. Já as interações entre ondas é bastante diferente visto que elas interferem umas com as outras. A maneira como as ondas transferem energia também é diferente do caso das partículas, pois elas estão espalhadas numa determinada região do espaço e é necessário um determinado intervalo de tempo diferente de zero para que se efetue a transferência de energia ($\Delta t \neq 0$). Esta transferência se dá continuamente. Para exemplificar esta segunda situação, consideramos um barril flutuando no mar durante a passagem de uma onda, a transferência de energia da onda para o barril é contínua (não em pancadas) e necessita de certo tempo diferente de zero. Importante lembrar que a energia de uma onda é proporcional a sua amplitude.

Radiação Eletromagnética

As radiações eletromagnéticas, por verificarem vários fenômenos ondulatórios (reflexão, refração, difração, interferência, polarização) são consideradas ondas eletromagnéticas e transportam energia através do espaço da mesma forma que qualquer onda transporta energia. As ondas eletromagnéticas são constituídas por campos elétricos e magnéticos oscilantes. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo é igual à velocidade da luz, ou seja, 300.000 km/s. A sua intensidade é proporcional à amplitude dos campos elétrico e magnéticos. Quanto maior a intensidade, maior a energia transportada pela onda.

O **espectro eletromagnético** representa o **conjunto de todas as ondas eletromagnéticas de diferentes frequências**. Algumas são visíveis, podendo ser captadas pelo olho humano, no entanto, a maior parte delas é invisível aos nossos olhos. Ele encontra-se dividido em zonas distintas: frequência extremamente baixa; frequência muito baixa; ondas de rádio; micro-ondas; infravermelhos; luz visível; raios ultravioletas; raios X, raios Gama.

Fig. 1 - Espectro eletromagnético em função da frequência e do comprimento de onda

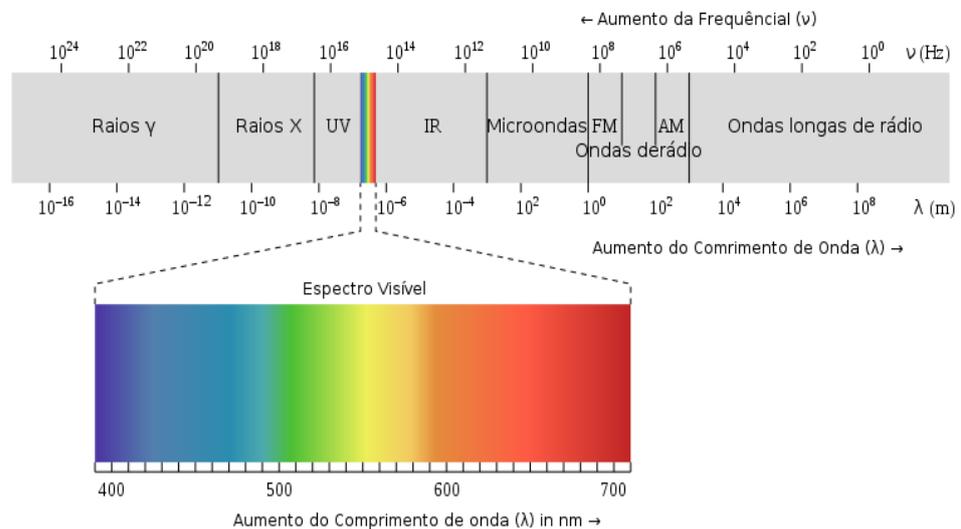
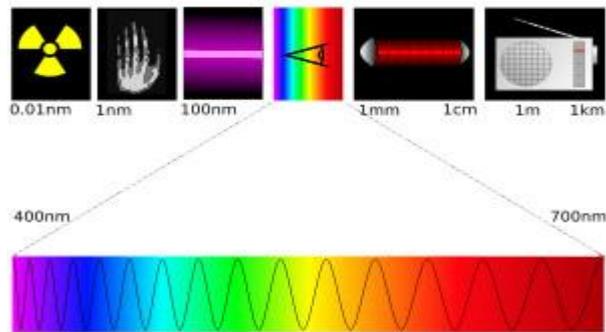


Fig. 2 - Espectro eletromagnético em função do comprimento de onda



Efeito Fotoelétrico

A teoria do eletromagnetismo elaborada por Maxwell, que estabelece que a luz é uma onda eletromagnética, foi confirmada experimentalmente por Hertz em 1888. Esta teoria faz parte de um dos pilares da física clássica. No entanto, a teoria clássica do eletromagnetismo começou a demonstrar certa fragilidade a partir de uma observação experimental, também realizada por Hertz ao estudar as descargas elétricas entre duas esferas de zinco. Hertz observou que era muito mais fácil obter as descargas elétricas entre as esferas quando uma delas era iluminada com luz ultravioleta, donde concluiu que a luz poderia interferir nas propriedades elétricas dos objetos.

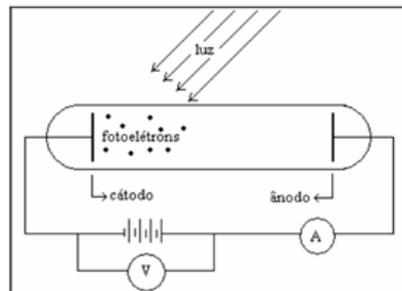
Em 1889, Thomson explicou esse efeito, postulando que a descarga era facilitada devido à emissão de elétrons do metal quando iluminado por luz ultravioleta.

A liberação de elétrons devido à incidência de luz é o que determinamos atualmente como efeito fotoelétrico. O efeito é devido basicamente devido à transferência de energia da radiação para os elétrons que estão sendo incididos.

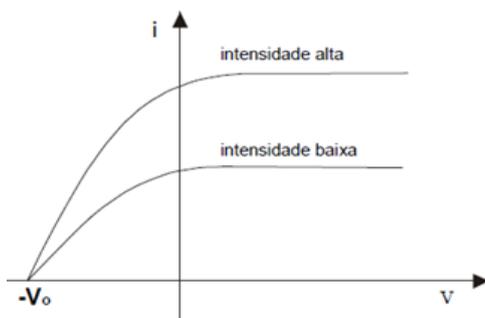
Nosso estudo sobre o efeito fotoelétrico será feito através da experiência feita por Philipp Lenard que investigou mais detalhadamente as suas características em 1902, destacando o que pode ser explicado, bem como, o que não pode ser explicado pela teoria clássica do eletromagnetismo.

Em um recipiente de vidro com vácuo, ele incidiu de cada vez luz de diversas cores (ou seja, diversas frequências), sobre a placa emissora (cátodo). Ele media então a corrente elétrica que era captada pela placa coletora (ânodo). O esquema desta experiência está representado na figura abaixo:

Fig. 3 - Aparato experimental para verificação do efeito fotoelétrico



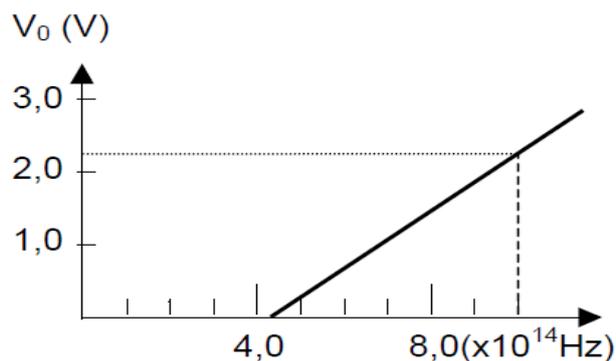
O potencial da fonte de tensão é ajustável, podendo inclusive fornecer potenciais negativos. Se o potencial aplicado for nulo, os elétrons serão ejetados, no cátodo pela incidência de luz, nas mais variadas direções e com diferentes energias, podendo, alguns deles, chegarem ao ânodo, e outros não. O aumento do potencial aplicado faz com que todos os elétrons liberados sigam acelerados em direção ao ânodo, aumentando a corrente registrada no amperímetro. Um pequeno aumento no potencial já é suficiente para que todos os elétrons se orientem em direção ao ânodo e cheguem ao ânodo, de tal forma que aumentos maiores no potencial aplicado não influem na corrente medida, a qual praticamente se mantém constante. Com a aplicação de um potencial negativo, alguns elétrons retornam ao cátodo. Este potencial negativo pode assumir um determinado valor que anule a corrente registrada no amperímetro. Este potencial, que anula a corrente, é denominado potencial de parada ou, ainda, potencial de corte (V_0). Verifica-se a seguinte relação entre o a intensidade da corrente e o potencial de corte, observe que a figura mostra, também, a relação entre a intensidade da radiação incidente e o potencial de corte:

Fig.4 – Gráfico i versus V 

Note que estranhamente o potencial de corte não depende da intensidade da radiação. Lembrem que a energia de uma onda é proporcional a sua intensidade. Logo, pensando classicamente, este resultado significa que a energia dos elétrons ejetados não depende da energia que recebem da onda incidente. Como explicar este fato?

Ainda de acordo com a teoria clássica, o efeito fotoelétrico deveria acontecer para qualquer frequência da luz incidente. No experimento de Lenard foi observada a existência de uma frequência mínima da radiação incidente capaz de liberar elétrons do material que constitui o ânodo. Para valores menores do que esta frequência não ocorre a liberação de elétrons. Esta frequência mínima é denominada frequência de corte f_0 . Os resultados experimentais mostram a seguinte relação entre o potencial de corte e a frequência:

Figura 5 - gráfico do potencial de frenagem para o sódio em função da frequência



Ou seja, o potencial de corte não depende da intensidade da onda incidente, mas depende linearmente da frequência, sendo que o efeito só é observado a partir de uma certa frequência. Isto implica que a energia dos elétrons ejetados depende da frequência da luz incidente, contrariando a física clássica. Lembramos que segundo a física clássica, que a energia dos elétrons ejetados não deveria depender da frequência da onda incidente e sim da sua intensidade.

A experiência ainda demonstra mais um problema para a física clássica. Como a interação é uma interação entre uma onda e uma partícula, deveria haver um tempo para o que os elétrons recebessem a energia da onda e fossem emitidos. Este tempo não é verificado.

Resumindo: pela teoria clássica, um aumento na intensidade da radiação incidente deveria provocar um aumento na energia cinética dos elétrons ejetados, visto que eles estariam recebendo uma quantidade maior de energia. Também deveríamos observar um tempo entre a incidência da radiação e emissão do elétron, pois se trata de uma interação onda-partícula. Por fim, para uma dada intensidade, o efeito deveria ocorrer para qualquer frequência. No entanto, observamos o seguinte:

- a) A energia cinética dos elétrons emitidos não depende da intensidade da radiação incidente e sim da frequência.
- b) Não existe um tempo detectável entre a emissão do elétron e incidência da radiação.
- c) Existe uma frequência de corte, abaixo da qual não ocorre o efeito.

Estes três fatos nos levam a concluir que a interação entre a radiação e a matéria, nesta experiência, não é do tipo onda-partícula como descrita anteriormente. Esta experiência evidencia um postulado central da mecânica quântica: o postulado quântico. Este postulado afirma que as interações fundamentais da natureza (neste caso a interação eletromagnética) são discretizadas. Em outras palavras: no mundo microscópico, a interação entre radiação (onda eletromagnética) e matéria (elétrons) se dá através de pacotes de energia, como se fosse uma interação do tipo partícula-partícula. Para cada interação fundamental interpretamos este pacote de energia (também chamado de quantum de energia) como uma partícula associada à interação. No caso da interação eletromagnética, esta partícula é chamada de fóton. Falaremos brevemente sobre as demais interações a seguir.

Para explicar quantitativamente o efeito fotoelétrico, cada pacote de energia (fóton) tem que ter uma energia proporcional à frequência da radiação, dada pela relação:

$$E_{\text{fóton}} = h.f.$$

A constante de proporcionalidade h é conhecida como sendo a constante de Planck, cujo valor é $4,2 \times 10^{-15}$ eV.s ou $6,6 \times 10^{-34}$ J.s Esta é a constante fundamental que determina o limite onde a mecânica clássica não pode ser aplicada.

Notem que a constante de Planck tem um valor muito pequeno em relação à escala humana, da ordem de 10^{-34} em J.s. Para termos ideia, soltemos um bloco de 1 kg de altura de 1 m. O bloco demora aproximadamente 0,4 segundos para chegar ao solo e a energia mecânica do bloco é da ordem de 10 Joule. Logo a escala típica de energia vezes tempo deste problema macroscópico é de $10 \times 0,4$ Js. Compare com a constante de Planck!

Devido ao valor muito pequeno da constante de Planck, a discretização da energia fornecida pela radiação aos elétrons só é evidenciada em altas frequências (veja equação acima). Por sua vez, altas frequências implicam em pequenos comprimentos de onda. Pequenos comprimentos de onda só podem ser medidos em escalas de distância muito pequenas. Logo, evidenciamos que no fim, a discretização da interação entre a radiação e a matéria só é observada em escalas muito pequenas de distância.

Grandezas Quantizadas e as Interações fundamentais da Natureza

A palavra *quantum* (plural = *quanta*) é uma palavra latina e significa *quantidade*. Em física a palavra quantum é usada para designar a menor quantidade em que uma grandeza ou propriedade é encontrada na natureza.

Um bom exemplo de grandeza quantizada é a carga elétrica. A menor unidade com que a carga elétrica aparece livremente na natureza, denominada carga elementar, é a carga do elétron, ou do próton (que diferem em sinais). Dessa maneira cargas elétricas só existirão em números múltiplos da carga elementar ($Q = n.e$). Grandezas com essa característica, múltiplos de um *quantum*, são ditas quantizadas ou discretizadas. Exemplos: carga elétrica, energia, massa, radiação.

É possível fazer uma analogia com conjuntos numéricos: grandezas contínuas com o conjunto dos número Reais e as quantizadas com o conjunto dos números Naturais.

O postulado quântico, evidenciado no efeito fotoelétrico afirma que as interações fundamentais da natureza, quando observadas em escalas microscópicas, são discretizadas. Isto significa que, como discutido anteriormente, todas as interações podem ser entendidas num modelo de interação do tipo partícula-partícula. Importante lembrar que este é um modelo para entendermos, usando a linguagem que estamos acostumados (a linguagem clássica), como as interações fundamentais “funcionam”, no nível microscópico (discutiremos mais sobre o uso da linguagem clássica no próximo texto de apoio). As partículas associadas à interação (o quantum de energia) são chamadas de os quanta da interação. Os quanta da interação eletromagnética são os fótons, mas e as demais interações?

Na natureza existem 4 interações fundamentais. O eletromagnetismo é a interação que estudamos no efeito fotoelétrico. Ainda temos:

a) nuclear forte, que atua somente dentro dos núcleos atômicos. Os quanta a interação da interação nuclear forte são chamados de Gluons.

b) a interação nuclear fraca, que também atuam somente dentro dos núcleos atômicos. Os quanta da interação nuclear fraca são chamados de W^+ , W^- e Z^0 .

c) A interação gravitacional. Quais são os quanta da interação gravitacional? Ainda não foi feita uma experiência que detecta-se a discretização da interação gravitacional. Tampouco entendemos do ponto de vista teórica quando conciliar a interação gravitacional com o postulado quântico. Este é um dos maiores problemas da física atual.

APÊNDICE C– Texto de apoio para o estudo sobre dualidade onda-partícula

DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Introdução

A física quântica surge com a necessidade do desenvolvimento da física atômica, visto que a física clássica apresentava limitações no estudo da constituição da matéria e com a respectiva crise da representação do mundo microscópico que pode ser caracterizada pela evolução dos diversos modelos atômicos.

No início do século XIX, a partir das leis ponderais das reações químicas John Dalton dá um caráter científico à ideia de átomo, considerando-o como uma minúscula partícula material indestrutível, mantendo massa e dimensão inalterável.

Já no século XX, Ernest Rutherford apresenta uma nova face para o átomo, discordando da indivisibilidade do mesmo, a partir da existência das partículas α , β e raios γ . Rutherford fez, então, as seguintes proposições:

- O átomo deve ser constituído de uma parte central e que foi denominado núcleo. Este deve ter carga positiva, pois repele violentamente as partículas α , que possuem carga positiva, quando estas passam próximo ao núcleo.
- O tamanho do núcleo deve ser extremamente pequeno em relação ao átomo.
- Se o átomo tivesse apenas núcleos positivos, qualquer matéria seria muito positiva. Para contornar este fato, Rutherford admitiu que a carga nuclear seria equilibrada por elétrons, com carga negativa. No entanto, estes elétrons não poderiam estar parados, pois seriam atraídos para o núcleo e o átomo seria um sistema instável.
- Admitiu, então, um equilíbrio dinâmico: “os elétrons devem girar em torno do núcleo, em órbitas circulares”.
- Como o átomo é eletricamente neutro, a carga total dos elétrons deve ser igual à carga no núcleo.

No entanto, a teoria de Rutherford apresentava uma contradição. Segundo a teoria clássica do eletromagnetismo, qualquer carga elétrica acelerada emite energia na forma de onda eletromagnética. O elétron em movimento circular está sujeito a uma aceleração centrípeta e, deve emitir continuamente energia, perdendo, desta forma, velocidade e para manter o equilíbrio com o núcleo, seria necessário diminuir o raio da trajetória. Desta forma o movimento do elétron teria, então, uma trajetória em espiral e o elétron cairia no núcleo e qualquer átomo teria uma estrutura instável.

O físico Niels Bohr foi quem introduziu a justificação energética para o elétron, aceitando o modelo de Rutherford e considerando os estudos dos espectros de emissão do hidrogênio.

Supôs que nem todas as leis da física clássica deveriam ser seguidas pelas partículas constituintes do átomo. Os constituintes do átomo passam a respeitar novas leis que são baseadas na mecânica quântica.

Baseando-se na teoria dos quanta de Max Planck e na explicação de Einstein para o efeito fotoelétrico, que consideram que a energia se propaga na forma de pacotes (quanta), Bohr propôs o seguintes postulados:

Postulado 1. Em um átomo são permitidas somente algumas órbitas circulares ao elétron, sendo que em cada uma dessas órbitas o elétron apresenta energia constante.

Postulado 2. Um elétron não pode assumir qualquer valor de energia, mas somente determinados valores que correspondam às órbitas permitidas, tendo, assim, determinados níveis de energia ou camadas energéticas.

Postulado 3. Um elétron, quando localizado em uma dessas órbitas, não perde nem ganha energia espontaneamente. Por isso, diz que, nesse caso, ele assume um estado estacionário.

Postulado 4. Um elétron pode absorver energia de uma fonte externa somente em unidades discretas (pequenas), chamadas quanta (forma singular: quantum).

Postulado 5. Quando um elétron absorve um quantum de energia, ele salta de uma órbita mais energética, ligeiramente mais afastada do núcleo. Dizemos que o elétron realizou um salto quântico e atingiu um estado excitado.

Postulado 6. Quando o elétron retorna a órbita menos energética, ele perde, na forma de onda eletromagnética, uma quantidade de energia que corresponde à diferença de energia existente entre órbitas envolvidas no movimento do elétron.

Segundo Bohr os elétrons giram ao redor do núcleo em órbitas circulares bem definidas e, espontaneamente, ao fazê-lo, eles não irradiam energia e quando um elétron passa de uma órbita para outra, ele emite ou absorve, determinada energia dada pela expressão: $\Delta E = h \cdot f$.

Bohr, também descobriu um método para calcular as energias dos estados estacionários do átomo de hidrogênio, postulando que as órbitas do elétron são circulares e que o momento angular do elétron no estado fundamental é $h/2\pi$, no primeiro estado excitado é $2h/2\pi$, no estado seguinte é $3h/2\pi$, e assim por diante. De acordo com Bohr:

$$L = nh/2\pi, \text{ com } n=1,2,3, \dots$$

O número n , introduzido dessa maneira na teoria de Bohr, é chamado de número quântico principal da órbita de Bohr.

A teoria de Rutherford-Bohr foi muito bem sucedida para átomos de um elétron. Quando se tratava de átomos mais complexos houve a necessidade de adaptar novas grandezas quânticas.

Foi Sommerfeld quem deu o primeiro passo para na ampliação da teoria de Bohr, admitindo a possibilidade de órbitas elípticas com diferentes excentricidades para um mesmo número quântico principal. Introduzindo, desta forma, um segundo número quântico l , denominado número quântico secundário.

Os valores de l variam de zero até $(n-1)$. Quanto maior o valor de l a elipse é mais arredondada. Um l máximo corresponderia uma órbita circular. Na camada M ($n=4$), os possíveis valores são: $l=0, 1, 2$ e 3 .

Ainda na evolução dos modelos atômicos surgem mais dois números quânticos, o número quântico magnético (m_l) e o número quântico de spin (m_s). O número quântico magnético está relacionado com o campo magnético devido ao movimento do elétron em torno do núcleo. Verificou-se que esse número quântico magnético pode ter valores inteiros no intervalo: $(-l, \dots, 0, \dots, +l)$. O número quântico de spin está relacionado com a rotação do elétron, que também gera campo magnético. A interação entre os campos magnéticos, devidos aos dois tipos de movimento do elétron, modifica a energia do sistema. As duas orientações do spin correspondem a dois níveis de energia próximo um do outro.

Na sequência, para a descrição do mundo microscópico, surge a Física quântica rompendo com a linguagem comum, com o visual, com o sensível, com o senso comum, com as metáforas intuitivas e utilizando um formalismo matemático muito forte e entidades abstratas no seu desenvolvimento.

Na física quântica a observação dos fenômenos toma um sentido muito especial, pois aqui, a observação está relacionada com o fato de que **a interação** dos objetos atômicos e dos instrumentos de medida é parte integrante dos fenômenos quânticos.

Uma das questões essenciais da Física Quântica e que a diferencia da Física Clássica, entre outras, é a questão da dualidade onda-partícula, de tal modo, que um mesmo objeto quântico pode se constituir num fenômeno ondulatório ou corpuscular dependendo do arranjo experimental.

Objetos Quânticos

Conforme já foi visto no efeito fotoelétrico, a luz é composta por fótons, que são “pacotes” de energia, cujo valor é dado por $E=h.f$. Mas afinal o fóton é uma onda ou é uma partícula? Os elétrons, os prótons, os nêutrons, fótons, o átomo, etc., pertencem ao mundo microscópico. Não obedecem as leis da Física Clássica, mas da Mecânica Quântica. Podemos observar nesses objetos características ondulatórias ou corpusculares dependendo do arranjo experimental, isto é, a dualidade onda-partícula, caracterizando-os como objetos quânticos aos quais não se pode atribuir, simultaneamente, um conjunto de propriedades dinâmicas (posição, velocidade, momentum linear) bem definidas.

A mecânica quântica trabalha com sistemas formados por objetos quânticos, que, como referimos anteriormente, são objetos microscópicos. Podemos citar como modelos de objetos quânticos elétrons, prótons, nêutrons, núcleos atômicos ou moléculas, todos eles sendo objetos físicos dotados de massa. Contudo, também podemos citar como exemplos de objetos quânticos os *fótons* que formam a luz e que não possuem massa.

A diferença fundamental entre os objetos quânticos e os objetos clássicos é que nem sempre podemos atribuir aos objetos quânticos propriedades dinâmicas simultaneamente bem definidas, ou seja, na mecânica quântica nem todos os observáveis são compatíveis entre si. Por exemplo, não podemos determinar simultaneamente a posição e o *momentum* linear de um elétron. Isso não é decorrência de não possuímos aparelhos suficientemente precisos para realizar as medições necessárias, mas constitui uma limitação intrínseca à natureza dos objetos quânticos.

Entre outros fenômenos ondulatórios, **a interferência e a difração** são extremamente relevantes para o entendimento adequado do princípio da dualidade. A interferência está relacionado ao fato das ondas de mesma natureza física terem a capacidade de se sobreporem, de tal modo que o encontro de duas ou mais ondas de mesma natureza numa região do espaço gera uma outra onda, formada pela sobreposição das ondas anteriores. Tal sobreposição se dá pela soma das amplitudes, em cada ponto do espaço, das ondas componentes.

Salienta-se que a propriedade de sobreposição, isto é, de poderem se adicionar é uma exclusividade das ondas. Dois corpúsculos são incapazes de se sobreporem.

A dualidade onda-partícula parece enunciar uma contradição lógica ao dizer que partículas são ondas, isto é, afirmando que uma coisa, sem partes, é, ao mesmo tempo, partícula e onda, é indivisível e divisível, segue uma trajetória e não segue. No entanto a Mecânica Quântica não busca responder o que são os entes, ou a sua essência, mas sim, o fenômeno, que inclui o aparato de medida e o objeto que está sendo medido. A Mecânica Quântica busca conciliar esta contradição lógica através de dois enunciados diferentes para a dualidade onda-partícula: um que busca conciliar interferência (típico de uma onda) e detecção pontual de um quantum (a indivisibilidade típica de um corpúsculo) e outro que busca conciliar a existência de interferência e de trajetórias. O primeiro enunciado, chamado de “versão fraca”, será discutido neste texto através do experimento da fenda dupla com elétrons. O outro enunciado, chamado de “versão forte”, será estudado através do experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder.

A experiência da fenda dupla

Antes da discussão da experiência da fenda dupla para luz, feito pela primeira vez por Geoffret Taylor em 1909, e também, para elétrons a partir de década de 1950, propõe-se uma sequência de experimentos mentais descritas por Etienne Klein (1996) e Ruzzi (2008).

Fenda dupla com esferas

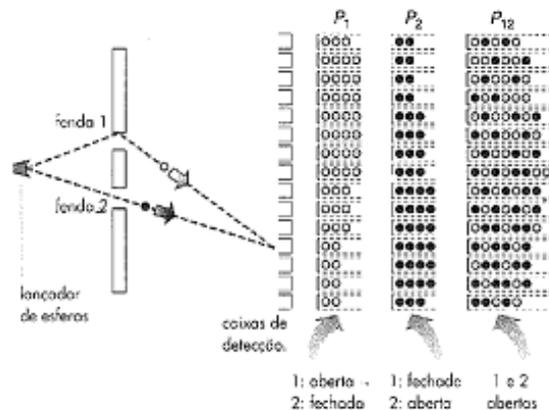
Uma máquina lança esferas com a mesma velocidade e em direções aleatórias contra uma parede com duas fendas paralelas e próximas uma da outra. Um pouco afastado desta parede encontram-se uma série de caixas que recolherão as esferas que passam pelas fendas. A maioria das esferas é travada pela parede outras passarão pela primeira ou pela segunda fenda diretamente ou ricocheteando nas suas bordas e estas serão recolhidas pelas respectivas caixas, de tal modo que o número de esferas recolhidas numa determinada caixa indica a **probabilidade** de chegada das esferas na posição determina pela caixa em questão. Esta experiência poderá ser feita na seguinte ordem:

- a) Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa passando pela fenda 1.
- b) Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa passando pela fenda 2.
- c) Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade de uma esfera chegar numa determinada caixa quando ambas as fendas estiverem abertas.

É fácil constatar que:

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

Fig. 1- Dupla fenda com esferas



Fonte: Klein (1996, p.19)

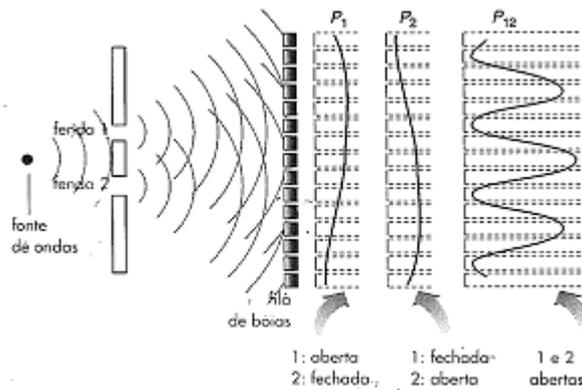
Fenda dupla com ondas circulares produzidas na superfície da água numa *cuba de ondas*:

A experiência da fenda dupla para ondas circulares produzidas na superfície da água numa *cuba de ondas*. Estas ondas podem ser geradas, por exemplo, por um bastão que toca na água em intervalos de tempo iguais. As caixas do experimento anterior podem ser substituídas por boias (rolhas de cortiça) que sobem e descem ao ritmo da passagem das ondas detectando, desta forma, a intensidade da onda. A intensidade da onda, ou a energia transferida pela onda, é proporcional à altura alcançada pela respectiva boia.

Esta experiência poderá ser feita na seguinte ordem:

- Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 1. Isto é, P_1 descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 1 e que incidem no detector (boias).
- Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 2. Isto é, P_2 descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 2 e que incidem no detector (boias).
- Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade da onda chegar com aquela amplitude de oscilação passando pela fenda 1 ou pela fenda 2. Isto é, P_{12} descreve a distribuição de energia das ondas que passaram pela fenda 1 ou pela fenda 2 e que incidem no detector (boias).

Fig. 2 – Fenda dupla com ondas circulares produzidas na superfície da água.



Fonte: Klein (1996, p.21)

É evidente que o perfil obtido no caso das duas fendas abertas é muito diferente do perfil obtido na experiência das esferas, onde $P_{12} = P_1 + P_2$. Na experiência com ondas aparece aquilo a que se chama de interferências e a curva obtida é denominada padrão de interferência. Esta curva não apresenta uma relação simples com as anteriores, não é simplesmente uma soma das curvas anteriores como no caso das esferas.

Nesta experiência, com ondas, verificamos que no padrão de interferência existem vários pontos onde a intensidade é nula, ou seja, vários pontos onde as boias permaneceram praticamente imóveis, resultado da sobreposição das ondas que vêm da fenda 1 e das que vêm da fenda 2 sempre em oposição de fase, isto é, resultado de uma interferência destrutiva. Verificamos, também, que há outros pontos onde a intensidade é máxima e a amplitude da onda resultante é o dobro das ondas incidentes nestes pontos, resultado da interferência construtiva entre ondas que nestes pontos estão em concordância de fase. Entre estes pontos a intensidade apresenta valores diferentes.

Destes dois experimentos pode-se concluir: se o arranjo experimental originar padrão de interferência, o fenômeno é ondulatório, caso contrário, é corpuscular.

Agora é proposto repetir estes experimentos e esta discussão numa escala microscópica.

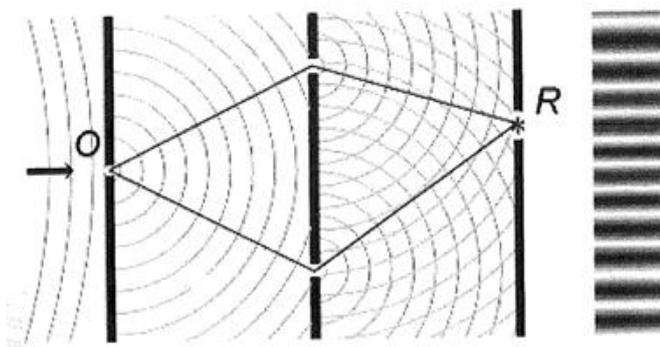
Fenda dupla com a luz

O experimento de interferência de luz foi feito por Thomas Young, em 1801. A fig. 3 ilustra como se propagam as ondas. Ao projetar a luz numa parede era observado regiões claras e regiões escuras, denominadas franjas de interferência. As regiões claras foi atribuído a interferências construtivas da luz e as escuras, a interferências destrutivas da luz. Desta forma Young inferiu, a partir das franjas, que a luz é uma onda.

Podemos transformar este experimento da física clássica em um experimento quântico diminuindo a intensidade da luz e usando um aparelho supersensível para detectar a luz (por exemplo, uma fotomultiplicadora).

Deste modo podemos ver as franjas de interferência se formando ponto a ponto na tela detectora. No caso da luz, dá-se o nome de “fóton” a cada um desses pontos observados. Estes pontos se agrupam em bandas acompanhando o padrão de intensidade típico da interferência.

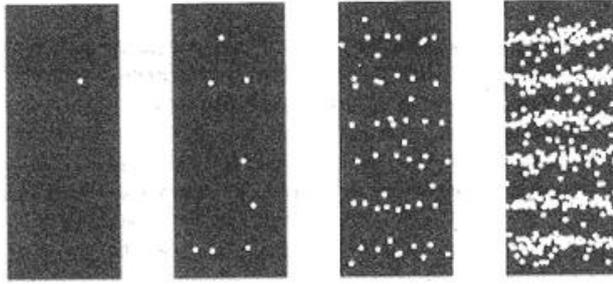
Fig. 3 – fenda dupla para a luz



Fonte: Pessoa (2006, p.3)

Por mais fraco que seja o feixe de luz, após um tempo suficiente o padrão de interferência se forma.

Fig. 4 – fenda dupla para a luz em regime quântico.



Fonte: Pessoa (2006, p.3)

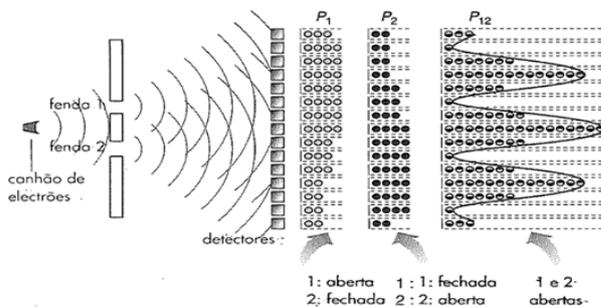
No regime quântico se observa a formação paulatina do padrão de interferência, resultado das ionizações, que ocorre uma a uma, na placa detectora.

O padrão de interferência obtido é o esperado, mas a transferência de energia durante a detecção, de maneira localizada, contraria a intuição macroscópica.

Fenda dupla com elétrons

Refazendo a experiência das duas fendas, agora com elétrons. Um canhão de elétrons dispara elétrons de mesma energia sobre a placa de duas fendas. A placa detectora localiza-se atrás da placa de duas fendas. Nessa experiência **não se sabe por qual fenda passam os elétrons** que serão representados, aqui, metade brancos, metade pretos. O resultado obtido é diferente do resultado obtido na experiência com esferas, aparecendo na tela detectora o padrão de interferências, marca do comportamento ondulatório.

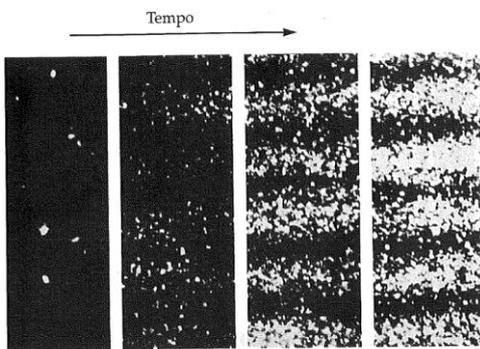
Fig. 5 – fenda dupla para elétrons



Fonte: Klein (1996, p.22)

Regulando a intensidade do canhão de elétrons, de modo que eles saiam um a um, ficando, portanto, a emissão e a detecção (impacto com a tela) de cada um deles isolados dos outros, cada elétron é captado num ponto preciso do detector (localizado), contribuindo a favor da ideia de que os elétrons são corpusculares. No entanto, à medida que se acumulam os impactos dos elétrons, ocorre a formação, ponto a ponto, do padrão de interferência semelhante ao obtido, anteriormente, quando os elétrons tinham sido emitidos em grande número, contribuindo a favor da ideia de que os elétrons são ondas.

Fig. 6 – fenda dupla para elétrons em regime quântico



Fonte: Klein (1996, p.23)

Destes resultados pode-se “concluir”, como se um objeto pudesse não ser nem uma coisa, nem o contrário dessa coisa:

- Os elétrons não são simplesmente corpúsculos, porque criam interferências quando chegam em número elevado;
- Os elétrons não são puramente ondas, porque são individualmente detectados (localizados).

Nesta situação, onde os elétrons são emitidos um a um, temos, portanto fenômenos independentes uns dos outros. Se os elétrons fossem corpúsculos, deveriam, forçosamente, passar por uma das fendas, e o fato da outra fenda estar aberta ou fechada não deveria ter qualquer influência sobre o seu comportamento. No entanto, a experiência mostra que os estados, aberto ou fechado, das fendas condicionam a distribuição espacial dos elétrons na tela detectora como se o fato de uma segunda fenda aberta, oferecendo uma possibilidade de passagem suplementar ao elétron, impedisse-o de chegar a determinados pontos, caracterizados pelas franjas escuras (interferência destrutiva). Isto é, as propriedades atribuídas a uma partícula dependem das características do dispositivo para o qual ela se encaminha. Salienta-se, ainda, que nesta situação não se pode determinar por qual, das fendas um determinado elétron passará.

Fenda dupla com elétrons com fenda determinada

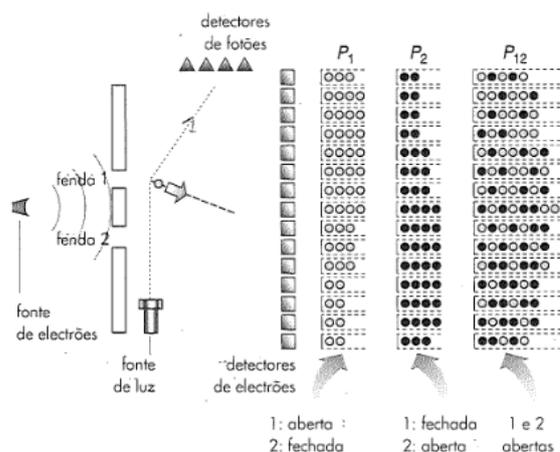
Propõe-se, então, outra situação com a experiência anterior da fenda dupla com elétrons, agora determinando por qual das fendas cada elétron passará. Esta determinação poderá ser feita através de uma fonte luminosa colocada entre a placa que contém as fendas e a tela detectora, iluminando os elétrons que passam, por exemplo, pela fenda 1. Desta forma, detectando a luz proveniente da fenda 1, fica determinado a fenda por qual determinado elétron passou. Do mesmo modo podemos determinar os elétrons que passam pela fenda 2.

O experimento poderá ser feita na seguinte ordem:

- Com a fenda 1 aberta e a fenda 2 fechada e P_1 indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora passando pela fenda 1.
- Com a fenda 1 fechada e a fenda 2 aberta e P_2 indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora passando pela fenda 2.
- Com as duas fendas abertas e P_{12} indicando a probabilidade de um elétron chegar numa determinada posição da tela detectora com as duas fendas abertas.

Notamos que a distribuição dos elétrons com uma das fendas fechada são simétricas entre si e quando as duas fendas estão abertas não se observa o padrão de interferência, isto é, encontramos um comportamento semelhante ao das esferas.

Fig. 6 – fenda dupla para elétrons com fenda determinada



Fonte: Klein (1996, p.26)

Desta sequência, verifica-se quando a fenda pela qual passa cada elétron é determinada, o padrão de interferência não é mais observado, portanto, não é permitido supor que se possa, simultaneamente, observar interferências e identificar a fenda utilizada por cada

elétron. Tais resultados são universais e são válidos para todas as partículas, sejam elas de luz (fótons) ou de matéria (elétrons, prótons, nêutrons, átomos...). Ao determinar a fenda pela qual passam os elétrons a figura de interferência é perturbada.

Toda medição aparece pois como uma interação entre o objeto microscópico sobre o qual efectuamos a medição e o aparelho de medição propriamente dito, que é macroscópico. Existe pois entre os dois uma espécie de ligação indestrutível, uma união mínima, que nunca é nula. Esta relação obrigatória impede de levar em conta o que pertence ao próprio objecto medido e o que pertence ao próprio aparelho de medição. As propriedades das partículas já não parecem poder ser separadas das condições de sua manifestação (KLEIN, 1996, p.28).

Podemos concluir, após esta sequência de experimentos, que um determinado aparelho de medição pode tornar evidente uma grandeza específica, mas não outra. Se colocarmos uma questão de natureza ondulatória (difração) em relação a uma partícula, sua resposta será de natureza ondulatória (interferência). Se colocarmos uma questão de natureza corpuscular (detecção pontual) a sua resposta será de natureza corpuscular (impacto localizado). A natureza dos aparelhos utilizados determina o tipo de fenômenos observados. Nenhuma experiência nos mostra uma partícula se comportando simultaneamente como uma onda e como um corpúsculo, no entanto necessitamos destas duas imagens para traduzir os resultados experimentais.

A noção de trajetória também fica abalada após estas experiências, pois observando as interferências, não podemos precisar qual foi o percurso das partículas, nem mesmo a fenda por qual elas passaram. Isto é, mesmo conhecendo as condições iniciais não é possível determinar o movimento ulterior como na física clássica. O que podemos calcular é a probabilidade de que a partícula se manifeste neste ou naquele ponto da tela detectora.

Na experiência da fenda dupla com elétrons, ao acompanhar a formação do padrão de interferência em telas fosforescentes, observamos os pontos aparecendo um após o outro, isto é, observamos cada fóton sendo detectado de maneira localizada, uma característica corpuscular. No entanto, estes pontos se agrupam em bandas destacando o padrão típico da interferência, característica ondulatória.

Desta forma temos um objeto quântico exibindo propriedades contraditórias, caracterizando a contradição lógica entre onda e partícula já comentada anteriormente.

A versão fraca da dualidade onda-partícula afirma que: “Para qualquer objeto microscópico, pode-se realizar um experimento tipicamente ondulatório (como um de

interferência), mas a detecção sempre se dá através de uma troca pontual de um pacote mínimo de energia”.

Note que nessa versão não é afirmado que os fótons ou os elétrons são sempre indivisíveis em sua propagação, mas que apenas na sua detecção eles aparecem de maneira indivisível e pontual e, também, não é afirmado que um objeto quântico sempre se comporta como uma onda, mas sim que ele pode exibir interferência.

Como é possível um objeto quântico apresentar ambas as características, ondulatória e corpuscular, num mesmo experimento?

Veremos agora como cada uma das quatro principais interpretações da Teoria Quântica responde a esta questão. Embora a interpretação ortodoxa da mecânica quântica seja não realista, existem interpretações realistas. As mais usadas são:

Interpretações realistas:

Interpretação Ondulatória: Antes da detecção, o objeto quântico propaga-se como onda, mas durante a detecção ele torna-se mais ou menos bem localizado, parecendo uma partícula. Isto é, durante certo tempo temos uma onda espalhada, e depois temos uma partícula, sem que ambos coexistam simultaneamente, eliminando, assim, a possível contradição lógica.

Interpretação Corpuscular: O fóton e o elétron são na realidade uma partícula, o que é manifestado na respectiva detecção. Não existe onda associada e o padrão de interferência é explicado a partir da interação da partícula com o anteparo que contém as duas fendas, desta forma não há contradição.

Interpretação Dualista Realista: O objeto quântico se divide em duas partes, uma partícula com trajetória bem definida (mas desconhecida), e uma onda associada. A probabilidade da partícula se propagar em uma determinada direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula. Aqui a contradição é eliminada, pois o objeto quântico se divide em duas partes, uma sendo só partícula, e a outra só onda.

Nas interpretações acima afirma-se algo sobre a natureza do ente físico em questão, no caso elétrons ou fótons. Esta natureza manifesta-se na experiência, mas independe dela. Existe uma distinção clara entre o objeto de estudo e o experimento. Notem que o postulado

quântico não desenvolve um papel importante nestas interpretações.

Vejamos agora a interpretação ortodoxa da mecânica quântica, a interpretação positivista de Bohr, também conhecida como interpretação da complementaridade:

Interpretação da Complementaridade: O fenômeno em questão é ondulatório, e não corpuscular, pois não podemos inferir a trajetória passada do quantum detectado. O aspecto corpuscular observado na detecção se deve ao postulado quântico, de Max Planck, o qual afirma que existe uma descontinuidade essencial em qualquer processo atômico, como por exemplo, na ionização de átomos de prata na chapa fotográfica devido à ação da luz.

Notem que nesta interpretação nada se afirma sobre a realidade do ente físico que está sendo observado. Apenas afirma-se que o fenômeno é ondulatório. O fenômeno inclui o aparato de medida e o objeto que está sendo medido. O que é real aqui? O real é o fenômeno. Nada se afirma sobre a realidade do objeto que está sendo medido. Dentro desta perspectiva a física descreve fenômenos e não a realidade intrínseca de algum ente físico. Por isto esta interpretação é não realista. Para você, o que é real?

Agora vamos estudar a dualidade através de outro experimento, que envolve, também, o fenômeno da interferência.

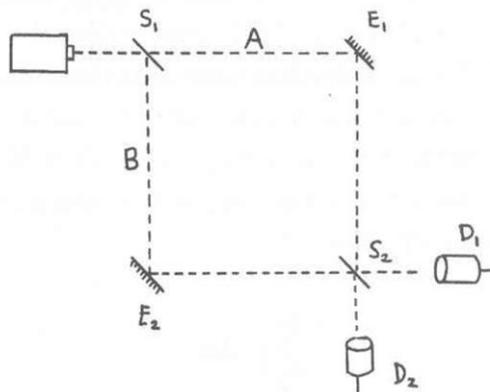
INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER CLÁSSICO

A intenção agora é dar continuidade à discussão da dualidade onda- partícula, através do problema conceitual do caminho percorrido pelo fóton na interferência quântica e destacar o enunciado da versão forte para a dualidade.

O interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) é um arranjo experimental relativamente simples de espelhos e semi-espelhos que demonstra o fenômeno da interferência da luz pela divisão de um feixe luminoso, parecido com o experimento da fenda dupla, porém mais simples, idealizado independentemente por Ludwig Zehnder e Ludwig Mach.

O feixe luminoso, considerado como consistindo de ondas em uma dimensão, monocromática de comprimento de onda λ , é dividido em um primeiro semi-espelho e então recombinado em um segundo semi-espelho onde, dependendo da fase relativa adquirida pelos feixes ao longo dos caminhos, exibirá interferência construtiva.

Fig. 1 – Desenho do IMZ



Fonte: Pessoa (2006, p. 19)

Sob condições idealizadas, os espelhos, E1 e E2, são considerados perfeitamente refletores e os semi-espelhos, S1 e S2, refletem e transmitem exatamente 50% da luz neles incidente. Deste modo, se a amplitude do feixe inicial é Ψ_0 a amplitude do feixe transmitido e do feixe refletido será $\Psi_0/\sqrt{2}$. Cada reflexão da luz em um espelho ou semi-espelho introduz uma diferença de fase correspondente a $\lambda/4$, provocando um avanço de $1/4$ de comprimento de onda em relação à onda transmitida.

Desta forma o feixe A se aproxima de S2 com uma amplitude $\Psi_0/\sqrt{2}$ e com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/4$. O espelho semi-refletor S2 divide o feixe A em duas partes iguais, a parte refletida sofre mais um deslocamento de fase de $\lambda/4$ chegando no

detector D1 com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/2$ e com amplitude de $\Psi_0/2$. A outra parte do feixe A, transmitida pelo espelho semi-refletor S2, chega no detector D2 com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/4$ devido à reflexão no espelho E1 e com amplitude de $\Psi_0/2$. **Resumido: AD1 $\lambda/2$ e AD2 $\lambda/4$.**

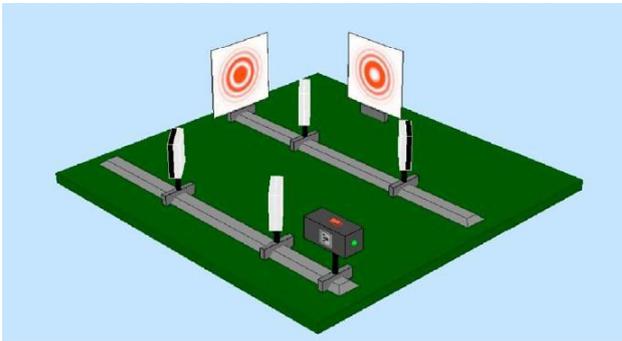
O feixe B também se aproxima de S2 com uma amplitude $\Psi_0/\sqrt{2}$ e com um deslocamento de fase relativo de $\lambda/2$ devido às reflexões no espelho semi-refletor S1 e no espelho E2. O feixe B ao incidir sobre o espelho semi-refletor S2 é dividido em duas partes: A parte transmitida ao detector D1 mantém o deslocamento de fase de $\lambda/2$ e amplitude de $\Psi_0/2$, a parte refletida ao detector D2 sofre mais um deslocamento de fase de $\lambda/4$, resultando, portanto, num deslocamento de fase relativo de $3\lambda/4$ e amplitude de $\Psi_0/2$. **Resumindo: BD1 $\lambda/2$ e BD2 $3\lambda/4$.**

Assim é possível concluir que as partes dos feixes A e B que chegam no centro do detector D1 não têm diferença de fase entre si, resultando, portanto, numa interferência construtiva com amplitude Ψ_0 , correspondendo a 100% do feixe original. Conclui-se, também, que as partes dos feixes A e B que chegam no centro do detector D2 apresentam a seguinte diferença de fase, $3\lambda/4 - \lambda/4 = \lambda/2$, resultado numa interferência destrutiva, correspondendo à 0% do feixe original.

Podemos, também, concluir que só é possível superpor construtivamente dois componentes de onda se ao mesmo tempo outros dois componentes estejam se superpondo destrutivamente.

Se substituirmos os detectores por telas e considerarmos a pequena abertura angular característica da fonte, o feixe emitido não será mais paralelo. Assim, poderemos ter interferências pela defasagem ocasionada tanto pela diferença de caminho ótico como pelas reflexões sucessivas nos espelhos e semi-espelhos. Dessa forma, observaremos, em ambas as telas, a formação de anéis luminosos típicos do fenômeno de interferência. Os pontos localizados na região central dos anteparos estão de acordo com a previsão feita na situação idealizada discutida anteriormente.

Fig. 2 – IMZ em regime clássico.



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER QUÂNTICO (Interferometria para Um Fóton)

A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime monofotônico, ou seja, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez.

Para transformar o experimento clássico anteriormente descrito num experimento quântico devemos inicialmente ajustar a fonte luminosa diminuindo a intensidade do feixe original até que poucos fótons incidam em S1, isto é, ajustar a fonte de modo que ela passe a emitir um fóton de cada vez, por exemplo, um fóton por segundo (regime monofotônico). Outra providência necessária é a utilização de detectores de fótons, supostamente ideais, sensíveis à presença de um único fóton (fotomultiplicadora).

Deste modo o interferômetro estará funcionando em regime quântico, isto é, num regime de baixas intensidades, quando propriedades corpusculares passam a aparecer.

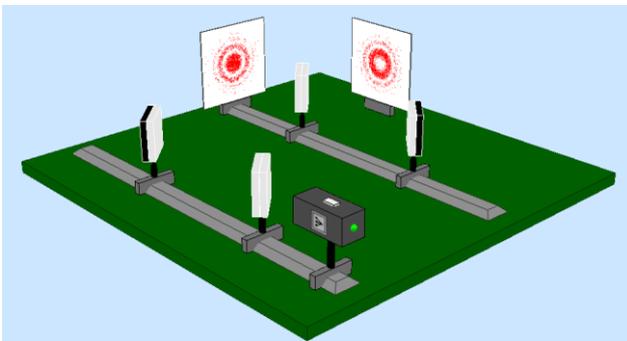
Num primeiro momento, considerando apenas os fótons que incidem na região central dos detectores D1 e D2, poderíamos esperar que em cada um dos detectores fossem coletados 50% dos fótons emitidos pela fonte, isto é, 50% em D1 e 50% em D2. No entanto, não é isto que acontece. Todos os fótons, 100%, são detectados em D1, e nenhum em D2. Portanto, podemos afirmar que o interferômetro de Mach-Zehnder para fótons únicos tem o mesmo comportamento que o caso clássico, apresentando um padrão tipicamente ondulatório, interferência construtiva no detector D1 e interferência destrutiva no detector D2. Deste modo podemos concluir que, em certo sentido, cada fóton interfere consigo mesmo.

Considerando todos os fótons emitidos pela fonte, inclusive aqueles que rumam em direção a uma região bastante afastada do centro dos detectores e colocando anteparos no

lugar dos detectores, observarmos uma distribuição de fótons aparentemente aleatória em cada tela. No entanto, com o passar do tempo, observaremos um padrão de anéis de interferência se formando em cada uma das telas, o qual nos mostra que existem regiões na tela que são inacessíveis aos fótons e regiões nas quais sua incidência é mais provável.

Este fenômeno é ondulatório, pois só podemos descrever o fato de que nenhum fóton foi detectado em D2 através de um modelo ondulatório, isto é, através de interferências destrutivas a partir de S2, ou ainda, porque não podemos inferir qual o caminho seguido pelo fóton dentro do interferômetro.

Fig.3 - IMZ em regime quântico



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

Não há informação de qual caminho, então há interferência e o fenômeno é ondulatório.

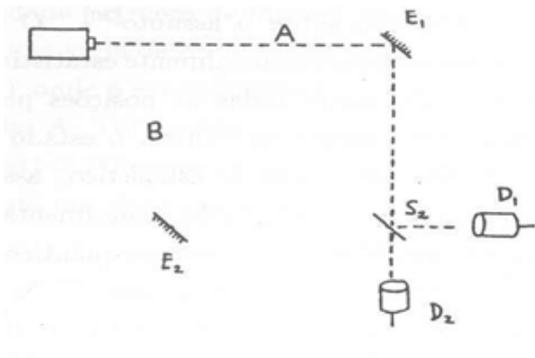
Determinando a trajetória seguida pelo fóton- Por qual caminho rumou o fóton?

Colocamos, agora, a seguinte questão: No experimento do interferômetro de Mach-Zehnder em regime quântico, depois que o fóton passou pelo semi-espelho S1, mas antes de chegar ao semi-espelho S2, em qual caminho, A ou B, ele se encontra?

Para essa discussão vamos seguir o seguinte roteiro:

- Retirar o espelho semi-refletor S1. Nesse caso podemos concluir que o fóton está no caminho A e não está no caminho B e após passar pelo espelho semi-refletor S2 poderá ser detectado pelo detector D1 (50% de probabilidade) ou pelo detector D2 (50% de probabilidade), não ocorrendo, portanto, interferência dos componentes.

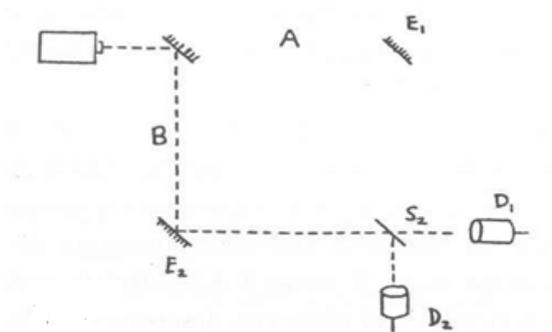
Fig. 4 – IMZ- os fótons seguem pelo caminho A



Fonte: Pessoa (2006, p. 13)

- Substituir o espelho semi-refletor S1 por um espelho de reflexão total. Nesse caso podemos concluir que o fóton está no caminho B e não está no caminho A e após passar pelo espelho semi-refletor S2 poderá ser detectado pelo detector D1 (50% de probabilidade) ou pelo detector D2 (50% de probabilidade), não ocorrendo, portanto, interferência dos componentes.

Fig. 5 – IMZ- os fótons seguem pelo caminho B



Fonte: Pessoa (2006, p. 13)

Se com o fóton no caminho A a probabilidade de ser detectado em D2 é 50%, e com o fóton no caminho B a probabilidade de ser detectado em D2 também é 50%, pela definição do conectivo “ou” a probabilidade do fóton estar “ou em A ou em B” tem que ser 50%. Porém o experimento, em regime quântico, do interferômetro de Mach-Zehnder nega a afirmação de que o fóton está “ou em A ou em B”, visto que no experimento citado a probabilidade do

fóton ser detectado pelo detector D2 não é 50%, mas é 0%. Logo é falsa a afirmação de que o fóton está ou em A ou em B.

Assim, parece que podemos concluir que os fótons não seguem trajetórias bem definidas. Tal conclusão não era esperada quando pensamos a luz sendo detectada na forma de partículas (fótons) e que tais partículas existem durante a propagação da luz, seguindo trajetórias bem definidas, embora, desconhecidas. Temos aqui um impasse!

Como podemos, então, interpretar o fenômeno de interferência quântica demonstrado nos experimentos anteriores?

A interpretação da complementaridade considera que o arranjo experimental determina o comportamento do fóton. Se, em princípio, for possível determinar o caminho percorrido pelo fóton, então o fenômeno é corpuscular e o fóton uma partícula. Se, por outro lado, o experimento apresenta aspectos ondulatórios tal como um padrão de interferência, o fóton é considerado como sendo uma onda, e *não tem sentido* perguntar onde está o fóton. Em outras palavras, o sistema apresenta aspectos corpusculares ou ondulatórios, dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.

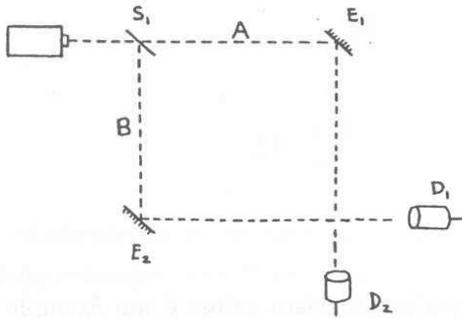
Fenômeno corpuscular

É importante destacar que para Bohr a palavra fenômeno designa a “totalidade” que inclui o objeto quântico e aparelhagem experimental e que ele só se completa quando o resultado experimental é registrado em nível macroscópico, isto é, quando o experimento termina.

Destacamos, ainda, que um determinado fenômeno é corpuscular, não porque o é detectado pontualmente como uma quantidade bem localizada de energia, visto que isto é comum também aos fenômenos ondulatórios, mas por ter uma trajetória bem determinada associada.

Podemos observar um fenômeno corpuscular com o interferômetro de Mach-Zehnder retirando o espelho semi-refletor S2.

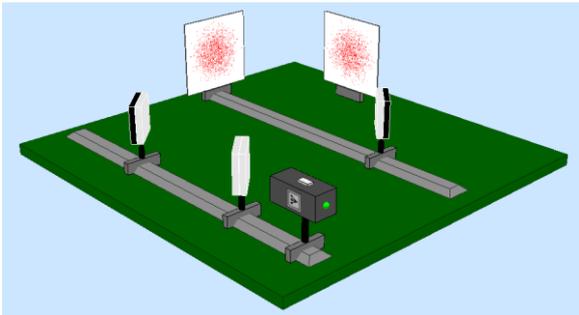
Fig. 5 – IMZ com caminho conhecido – fenômeno corpuscular



Fonte: Pessoa (2006, p. 16)

Nessa situação, se o fóton é detectado pelo detector D_1 , podemos inferir que o fóton percorreu o caminho B; se for detectado em D_2 , a trajetória inferida é A. Isto é, o fenômeno apresenta trajetória determinada, portanto, é **corpuscular**.

Fig. 6 – IMZ com caminho conhecido – fenômeno corpuscular



Fonte: Ostermann e Prado (2005)

Há informação de qual caminho, então o fenômeno é corpuscular e não há interferência.

Para a interpretação da complementaridade, uma vez completada a medição, o fenômeno é corpuscular. O fóton é considerado uma partícula que seguiu uma trajetória bem definida. Esta inferência com relação à trajetória passada do quantum detectado é conhecida como “retrodição”.

Dualidade onda-partícula: versão forte

Agora podemos enunciar a versão que Bohr deu para a dualidade onda-partícula, que é chamada de “versão forte”:

Um sistema quântico ou exhibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.

Esta versão expressa a noção de que onda e partícula são aspectos mutuamente exclusivos, mas *complementares*, da natureza. Isto é, na representação de um objeto quântico como um elétron ou um fóton, podemos considerá-lo ou como uma partícula, para certas situações experimentais, ou como onda, para outras situações.

Segundo Bohr, é impossível montar uma situação experimental que exiba simultaneamente esses dois aspectos da natureza (por isso é que são *mutuamente exclusivos*). Porém, só podemos compreender um objeto quântico de maneira completa quando levamos em conta esses dois aspectos complementares. Isto é, não conseguimos representar um objeto quântico em um “quadro único”: precisamos de descrições complementares. Isto se deve ao fato de estarmos usando uma linguagem clássica para descrever um fenômeno quântico.

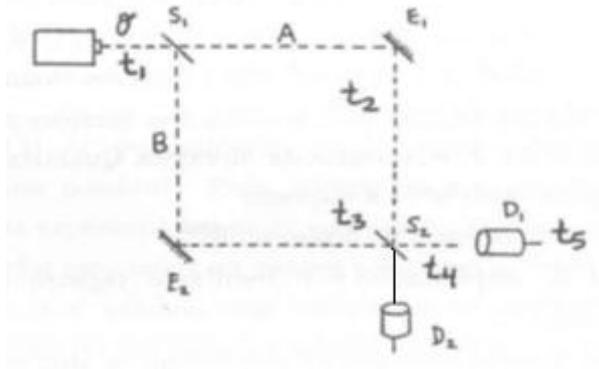
Experimento de escolha demorada

Como vimos anteriormente a presença ou não do espelho semi-refletor S2 no interferômetro de Mach-Zehnder é determinante para se obter um fenômeno ondulatório ou corpuscular respectivamente.

O experimento de escolha demorada usando o IMZ foi estudado pelo físico norte-americano John Wheeler, a partir de 1978, buscando responder a questão sobre a possibilidade de colocar ou retirar o espelho semi-refletor S2 enquanto o fóton estiver percorrendo o interferômetro, ou seja, até que instante o cientista pode escolher entre deixar ou retirar S2, de forma a fazer o fenômeno ser ondulatório ou corpuscular?

Vamos agora então examinar algumas consequências deste *experimento de escolha demorada* para as diferentes interpretações que já conhecemos. Para tanto, consideremos alguns instantes temporais ao longo do percurso do fóton, na montagem da Fig. 7. No instante t_1 , o fóton incide em S1; em t_2 , ele se encontra dentro do interferômetro; em t_3 ele passa pela posição do espelho semi-refletor S2; em t_4 ele se aproxima do detector; em t_5 ele gera um sinal macroscópico no osciloscópio.

Fig. 7 - Fig. Desenho do interferômetro no qual estão indicados diferentes instantes temporais.



Fonte: Pessoa (2006, p. 16)

De acordo com a interpretação da complementaridade não podemos afirmar nada sobre o fóton no instante t_2 , quando o fóton já está dentro do interferômetro. Não se pode dizer que o objeto quântico é onda, nem que ele é partícula. Isto só poderá ser feito quando o “fenômeno” se completa, e um registro macroscópico for obtido no aparelho de medição, no instante t_5 . Isto é, somente no instante t_5 , após o registro macroscópico obtido pelo aparelho de medida, é que poderemos dizer o que estava acontecendo no instante t_2 , o que estava acontecendo no passado.

Devemos chamar atenção para o fato de que mesmo que o semi-espelho não esteja presente no instante t_3 , o fenômeno em t_4 ainda não se constitui como corpuscular, visto que ainda há possibilidade do semi-espelho ser colocado, antes do registro macroscópico, de forma a recombinar os componentes, resultando em um fenômeno ondulatório. Só com registro macroscópico é que esta possibilidade pode ser excluída.

Segundo a interpretação da complementaridade é proibido que se fale algo sobre o fenômeno no instante t_2 e é possível acontecer de o passado se atualizar no presente. Isto, porém, não ocorre com as interpretações realistas. De acordo com a interpretação ondulatória, em t_2 o pacote de onda se divide em duas posições (no caminho A e no B); o que ocorre no futuro (em t_3) em nada afeta a realidade em t_2 . O mesmo ocorre com a interpretação da dupla solução.

O princípio da complementaridade e a linguagem clássica.

O ser humano desenvolveu seu aparelho cognitivo para se adaptar aos corpos “macroscópicos”, ou seja, aos corpos que nos rodeiam e que percebemos. Concomitantemente, desenvolveu uma linguagem que permite a ele se comunicar com os outros e lhes informar do estado de coisas do mundo. Esta foi chamada de “linguagem clássica”, pois é a linguagem própria da Física Clássica. No entanto, nada garante que as entidades microscópicas tenham o mesmo comportamento das clássicas, podendo ser classificadas como ondas ou partículas. De fato, não temos razões para acreditar que nossa linguagem e mente clássica, que classificam os objetos como ondas ou partículas, possam capturar adequadamente todos os aspectos das entidades microscópicas. O que podemos fazer, segundo Bohr, é ora utilizar uma representação corpuscular para descrever um experimento (fenômeno), ora utilizar um quadro ondulatório para descrever outro experimento. Cada experimento envolvendo entidades microscópicas pode ser compreendido ou num quadro corpuscular (quando elas exibem trajetórias bem definidas), ou num ondulatório (quando elas manifestam padrões de interferência), nunca ambos ao mesmo tempo. Notem que o resultado do experimento sempre é uma grandeza microscópica, sendo entendida dentro do ambiente da linguagem clássica. Assim, o princípio da complementaridade surge como uma tentativa de se interpretar o resultado de um experimento de forma objetiva, usando a linguagem clássica. Para tanto precisamos abrir mão do realismo. Não temos mais acesso ao objeto em si. Apenas descrevemos um fenômeno e o fenômeno envolve o objeto e o aparato de medida. Não faz sentido mais afirmar algo sobre a natureza de algum objeto antes deste ser medido.

APENDICE D**QUESTÕES UTILIZADAS NO TESTE DE AVALIAÇÃO DA APREENDIZAGEM.**

1) Quando uma teoria não consegue explicar um determinado fenômeno observado, o que devemos fazer?

- a) Abandonar a teoria.
- b) Tentar ajustar a teoria.
- c) Utilizar outra teoria e abandonar a anterior.
- d) Utilizar outra teoria e não abandonar, necessariamente, a anterior.

2) Considerando a metáfora da árvore discutida em sala de aula, qual a sua opinião?

- a) Realista, emiti o mesmo som que sempre emitu, haja alguém para ouvir ou não.
- b) Antirrealista, somente ao estar lá para escutá-la é que a presença ou a ausência de som ganha existência.
- c) Instrumentalista, pouco importa se a árvore iria ou não fazer barulho e qual seria se ninguém estivesse ouvindo, pois o importante é se o modelo utilizado para descrever sua queda funciona ou não.
- d) Empirista, a pergunta não faz sentido, pois somente as observações seriam um modo seguro de se ter conhecimento.

3) Um dos assuntos trabalhado em sala de aula foi a interação radiação eletromagnética com a matéria através do efeito fotoelétrico, onde vimos que a luz quando incide sobre determinadas matérias poderá arrancar elétrons deste material. Vimos que a Física Clássica não era capaz de explicar a totalidade do fenômeno. A teoria que é capaz de explicar este efeito:

- a) Considera esse fenômeno ondulatório.

- b) Considera esse fenômeno corpuscular.
- c) Considera esse fenômeno ondulatório e corpuscular.

4) Para explicar o efeito fotoelétrico é necessário considerar a interação da luz com a matéria, como uma interação do tipo:

- a) Partícula-partícula.
- b) Onda –onda
- c) Partícula-onda
- d) Onda-partícula

5) A constante de Planck determina o limite onde a mecânica clássica não pode ser aplicada. A ordem de grandeza dessa constante:

- a) Faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópicos.
- b) Não faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópicos porque é um número muito grande.
- c) Não faz parte da escala de ordem de grandeza dos sistemas macroscópicos porque é um número muito pequeno.

6) Quando um fenômeno (objeto+arranjo experimental) registra um padrão de interferência, podemos afirmar:

- a) O fenômeno é corpuscular.
- b) O fenômeno é ondulatório.
- c) O fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular.
- d) O fenômeno não é ondulatório e nem corpuscular.

7) No experimento da fenda dupla com esferas não houve o registro do padrão de interferência. No experimento da fenda dupla com ondas produzidas na superfície na água numa cuba, bem como, no experimento com elétrons, houve o registro do padrão de interferência. No entanto, quando era localizada a fenda pela qual o elétron passava através de

um iluminação adequada, o padrão de interferência não era mais registrado. Sobre o experimento da fenda dupla com elétrons, podemos afirmar:

- a) Trata-se de um fenômeno exclusivamente corpuscular, pois o elétron é uma partícula.
- b) Trata-se de um fenômeno exclusivamente ondulatório, pois o elétron é uma onda.
- c) Trata-se de um fenômeno ondulatório e o fato de iluminar o elétron não altera sua natureza.
- d) Inicialmente trata-se de um fenômeno ondulatório, mas quando o elétron é localizado, através de uma iluminação adequada, o fenômeno passa a ser corpuscular pois a natureza do elétron foi alterada.
- e) Inicialmente trata-se de um fenômeno ondulatório, mas quando o elétron é localizado, através de uma iluminação adequada, o fenômeno passa a ser corpuscular pois a natureza do experimento foi alterada.

8) No experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder, tanto no regime clássico como no regime quântico, um dos detectores registrou uma contagem de 100% enquanto o outro, registrou 0%. Isto só pode ser explicado pelo fenômeno da interferência. Neste caso o experimento, na sua totalidade, caracteriza um fenômeno:

- a) Ondulatório.
- b) Corpuscular.
- c) Ondulatório e corpuscular.
- d) Ondulatório ou corpuscular.

9) Num experimento do Interferômetro de Mach-Zehnder, no regime quântico, o caminho pelo o qual o fóton percorre foi determinado. Cada um dos detectores registrou uma contagem de 50%. Neste caso o experimento, na sua totalidade, caracteriza um fenômeno:

- a) Ondulatório.
- b) Corpuscular.
- c) Ondulatório e corpuscular.
- d) Ondulatório ou corpuscular.

10) De acordo com o postulado quântico, a interação entre a matéria e a radiação eletromagnética se dá pela troca de energia de maneira _____, com a matéria absorvendo _____, cuja energia é proporcional a _____ da radiação.

Assinale a alternativa correta que, pela ordem, preenche corretamente as lacunas:

- a) Contínua – quanta – amplitude.
- b) Discreta – prótons – frequência.
- c) Discreta – fótons – frequência.
- d) Contínua – elétrons – intensidade.
- e) Contínua – nêutrons – amplitude.

ANEXO A: ROTEIRO EXPLORATÓRIO PARA O INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER

1- Com o software aberto, localize o *menu* LANGUAGE e selecione o idioma.

2- Selecione a opção VER FEIXES e observe o caminho que é seguido pela luz no interferômetro.

Em seguida selecione novamente esta opção para desativar este comando.

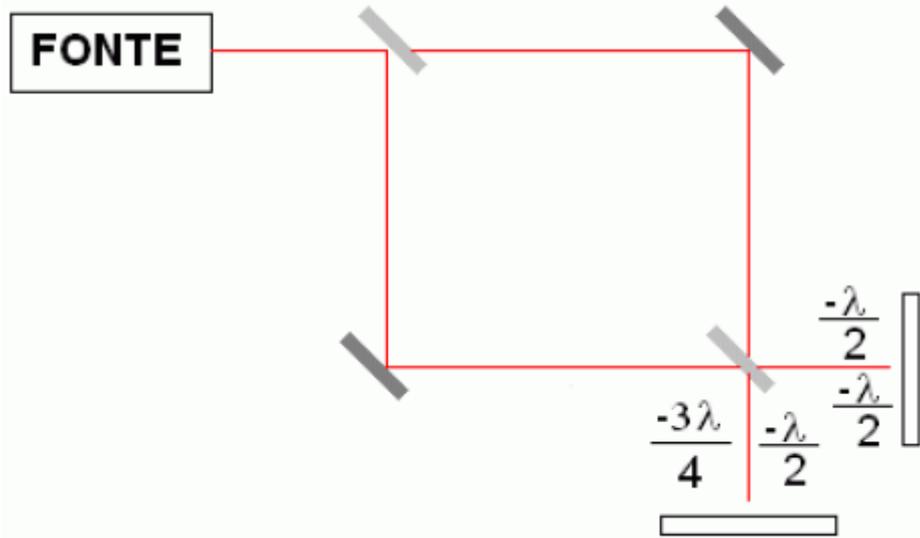
3- Vamos agora identificar as estruturas que compõem o interferômetro. Para isso basta você passar o *mouse* sobre cada uma delas. Localize a fonte, os espelhos, espelhos semi-refletores e os anteparos.

4- Selecione a opção LASER e em seguida LIGADO. Observe o que aparece na tela do interferômetro. Descreva o que você observa nos anteparos.

Formam-se figuras de interferência circulares nos dois anteparos. Observe que as figuras são complementares, isto é, onde há interferência construtiva em um anteparo, há interferência destrutiva na posição equivalente do outro anteparo. Pode-se dizer que onde há uma região escura no anteparo 1, forma-se uma região clara no anteparo 2 e vice-versa. A complementaridade dos padrões de interferência é resultado da conservação de energia – a intensidade total da luz que chega aos dois anteparos é igual a intensidade da luz emitida pela fonte, considerando que estamos supondo que não haja nenhuma dissipação do laser no trajeto até os anteparos e na interação com o material do anteparo.

5- Procure explicar a formação dos padrões de interferência observados. (**Dica:** uma reflexão em um espelho semi-refletor introduz um deslocamento de fase na luz correspondente a um quarto de comprimento de onda da mesma. Faça a soma dos deslocamentos de fase dos feixes que chegam a cada anteparo.)

Observe as frentes de onda provenientes dos dois caminhos no interferômetro chegam ao ponto central dos anteparos (esquema abaixo). Uma análise simples mostra que em um dos anteparos, as frentes de onda chegam com um atraso de $\lambda/2$ (meio comprimento de onda) em relação ao feixe emitido pela fonte. Ambos os feixes, no entanto, estão em fase entre si e na superposição, depois do segundo semi-espelho, resultam numa interferência construtiva. A mesma análise simples, mostra que no outro anteparo, as duas frentes de onda apresentam uma defasagem de $\lambda/4$ (um quarto do comprimento de onda) revelando, portanto, uma interferência destrutiva.



6- Retire do interferômetro o espelho semi-refletor 2 (opção ESPELHO SEMI-REFL. 2). Qual a relação entre as intensidades da luz nos anteparos e a intensidade da luz emitida pela fonte?

Considerando-se espelhos ideais em que não haja nenhuma perda da intensidade da luz, a intensidade nos anteparos é a mesma e corresponde a metade da intensidade da luz emitida pela fonte. Observe que quando falamos em intensidade da luz ou de onda em geral, falamos em uma grandeza diretamente proporcional ao quadrado da amplitude da onda.

7- Recoloque o espelho semi-refletor 2 no interferômetro.

8- A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime monofotônico, ou seja, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez. Selecione a opção FÓTONS ÚNICOS e observe os anteparos. (**Dica:** no *menu* FÓTONS/SEGUNDO, a simulação poderá ser acelerada se for colocado o valor 10, para que a emissão de fótons a cada segundo seja maior.)

9- Compare os padrões que vão se formando nos anteparos com os que foram observados quando o interferômetro foi utilizado com a opção LASER. Como é feita a detecção dos fótons nos anteparos? Após a detecção de um grande número de fótons, como podemos descrever a distribuição dessas detecções nos anteparos? (**Dica:** para responder a esta última pergunta, observe no canto superior direito da tela a contagem de fótons.)

A detecção dos fótons é puntual - representada na forma de pontos - os quais atingem os anteparos em determinadas regiões. A distribuição das detecções é aleatória (ora em um, ora em outro anteparo), mas segue uma distribuição em torno de 50% para cada anteparo.

Conforme o número de detecções aumenta, é possível observar o aparecimento de um padrão de interferência igual ao obtido com a fonte laser.

10- Coloque um detector num dos braços do interferômetro (opção DETECTOR 1). Observe novamente a contagem de fótons, nos anteparos e no detector. O que você observa? (**Dica:** clique no botão ACELERAR.)

Cerca de 50% dos fótons são detectados no detector 1 e os 50% restantes se dividem quase que igualmente entre os anteparos. Com o uso de detectores, os fótons têm o atributo posição definido, isto é, podemos dizer por qual braço do interferômetro o fóton seguiu e o fóton apresenta um comportamento corpuscular. Os anteparos não exibem mais um padrão de interferência.

11- Observe agora os anteparos. O padrão de impactos revela interferência? Explique.

Não se observa interferência, pois quando se pode dizer o trajeto do fóton por meio de uma medida (no caso ao se usar um detector em um dos braços do interferômetro), o fóton se comporta como uma partícula. Esse é a problemática da dualidade onda-partícula na Física Quântica.

12- Coloque mais um detector no interferômetro (opção DETECTOR 2). O que se observa na contagem de fótons nos detectores e nas luzinhas dos detectores e da fonte? E na tela? Clique uma vez no botão ACELERAR. O que se observa nas contagens dos detectores?

Cerca de 50% dos fótons é absorvida em cada detector e, cada detecção é representada por uma luzinha sobre o detector. Estas luzinhas nunca acendem simultaneamente. Não se observa figura de interferência nos detectores, visto que os fótons são absorvidos. Acelerando-se as emissões verifica-se que a distribuição das detecções continua em cerca de 50% para cada detector.

13- Considerando apenas um fóton sendo emitido na fonte, descreva como se comporta um espelho semi-refletor. Obs.: um espelho semi-refletor (separador de feixe) divide um feixe luminoso em dois feixes de igual intensidade.

Tudo depende do arranjo experimental que o fóton encontra. No caso descrito acima, em que há um detector em um dos braços ou um detector em cada um dos braços do interferômetro, a trajetória do fóton fica bem definida e o fóton se comportará como partícula. Assim, o fóton será refletido ou transmitido com a mesma probabilidade, seguindo por um dos caminhos do detector.

14- Se um fóton atravessa o aparelho de cada vez, como você descreve a formação do padrão de interferência observado na tela? (**Dica:** o padrão não foi formado pela interferência

entre diferentes fótons, pois, a cada instante apenas um fóton atravessa o interferômetro e chega aos anteparos).

Primeiramente, observe que para haver um padrão de interferência, não há detectores nos braços do interferômetro. Isso significa que, ao mandarmos um único fóton de cada vez para o interferômetro, não podemos dizer com certeza, qual o caminho que o fóton seguiu. Tudo se passa como se o fóton seguisse pelos dois braços ao mesmo tempo. Como o fóton não se divide, abrimos mão de conceber o fóton como uma partícula e pensamos no fóton como uma onda. A onda então, se divide em duas frentes de onda e cada uma segue por um braço. As ondas se reencontram, então, após o segundo espelho semi-refletor e podem exibir as interferência destrutiva ou construtiva que determinam as probabilidades de detecção do fóton em cada posição do anteparo.

15- Vamos agora testar a atuação dos filtros polaroides. Clique na janela FILTRO POLAROIDE 1 e selecione a opção FÓTONS ÚNICOS. Que padrão é observado nos anteparos?

Observa-se o mesmo padrão de interferência obtido com luz laser ou com os fótons únicos. Nesse simulador, a fonte operando no modo LASER emite luz linearmente polarizada. Você poderá usar dois polarizadores perpendiculares entre si para determinar a polarização da luz e conseqüentemente, a polarização do fóton.

16 Coloque, agora, o filtro polaroide 2 no interferômetro. Houve alguma alteração em relação ao que você observou antes?

A presença do polaroide 2 não afetou as figuras de interferência.

17- Mude a inclinação de um dos filtros polaroides, digitando um valor para o ângulo ou girando-o diretamente. Descreva os padrões de interferência observados. Houve alguma alteração em relação ao que foi observado nas questões 2 e 3? Tente explicar o que você observou.

Os fótons são absorvidos quando se altera a inclinação do filtro polaroide. Dessa forma, observa-se que quanto maior é o ângulo de inclinação do filtro polaroide, mais o padrão de interferência se distancia do padrão observado anteriormente. As figuras de interferência começam a ficar borradas.

18- A detecção de cada fóton nos anteparos ocorre de forma localizada, numa posição definida. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição bem definida? Proponha uma maneira de descobrir isto usando uma combinação de filtros polaroides.

Sim, é possível descobrir por onde o fóton passou. Quando o filtro polaroide está em 90^0 as detecções não formam padrão de interferência. Se colocarmos um filtro polaroide perpendicular ao outro podemos saber por qual dos caminhos o fóton passou.

19- Vamos tentar descobrir por qual caminho passa o fóton usando dois filtros polaroides, um em cada braço do interferômetro, com uma inclinação relativa de 90^0 entre eles. Assim, se o fóton passar por apenas um dos braços, terá que sair do interferômetro, necessariamente, com sua polarização dada pelo eixo de polarização do filtro polaroide que se encontra naquele braço. Como você poderá descobrir qual o estado de polarização do fóton emergente?

Colocando-se os três filtros polaroides no interferômetro e inclinando todos eles em 90^0 , observa-se que todos os fótons são absorvidos. Quando os três filtros polaroides estão com inclinação 0^0 nenhum fóton é absorvido. Verifica-se, portanto, que o fóton tem polarização horizontal. Assim, se colocarmos o primeiro e o terceiro filtro polaroide com 90^0 de inclinação e o segundo com 0^0 , observamos que o fóton passou pelo caminho onde está o segundo filtro polaroide.

Também é possível orientar o segundo e terceiro filtro polaroide, deixando o primeiro com 0^0 , verifica-se que o fóton segue o caminho do primeiro filtro.

20- Selecione a orientação do filtro polaroide 1 para 0^0 ou 360^0 e posicione o filtro polaroide 3 de modo que fique com orientação paralela ao primeiro. O que se observa nos anteparos?

Se o filtro polaroide 2 também estiver em 0^0 ou em 360^0 , os fótons serão detectados nos anteparos, formando figuras de interferência. Caso o filtro polaroide 2 esteja com uma inclinação diferente de 0^0 ou 360^0 , observa-se que as figuras de interferência começam a desaparecer, vindo a ser representadas simplesmente por pontos que não revelam figuras de interferência nos anteparos.

21- O fóton tem ou não o atributo posição definido?

Sim, ele segue pelo caminho onde o filtro polaroide está com a mesma inclinação do filtro polaroide 3.

22- E então, por onde passou o fóton? (**Dica:** cruze os eixos dos polaroides.)

Se o filtro polaroide 1 está paralelo a filtro polaroide 3, o fóton segue o caminho 1. Caso o filtro polaroide 2 esteja paralelo ao filtro polaroide 3, o fóton irá seguir o caminho 2.

23-

a) O que o resultado obtido no experimento até agora significa para o nosso modelo mental do fóton como um objeto que possui o atributo posição dentro do interferômetro?

b) Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo dentro do interferômetro?

c) E quando não se observa um padrão de interferência? Por quê? (Dica: se os fótons possuísem o atributo posição quando dentro do aparelho, então cada fóton só poderia interagir com um dos polaroides nos braços do aparelho, certo?).

a) O fóton é uma partícula que “carrega” a informação posição.

b) Quando se observa o padrão de interferência, o fóton não tem o atributo posição no interferômetro, podendo ter passado por qualquer um dos caminhos.

c) Quando não se observa o padrão de interferência é possível descobrir o caminho seguido pelo fóton. A possibilidade de cada fóton só poder interagir com um dos polaroides nos braços do aparelho não se sustenta. Para o fóton “saber” se ele está destinado a atingir a tela onde antes de termos cruzado os eixos dos polaroides havia um mínimo de interferência e não chegava luz, ele teria que dispor da informação sobre os eixos de polarização de ambos os polaroides e não apenas daquele pelo qual ele teria passado, de acordo com o modelo mental de partícula possuidora do atributo posição.

24- Coloque os detectores 1 e 2 no interferômetro. Verifique se os dois detectores registram simultaneamente a entrada de cada fóton individual no interferômetro. O que você observa?

O fóton segue o caminho 1 ou 2, visto que não ocorre detecção simultânea.

25- Com os dois detectores de fótons colocados no interferômetro, qual a probabilidade de detecção do fóton no detector 1? E no detector 2?

A probabilidade de detecção é de cerca de 50% em cada detector.

26- Considerando o item acima tente dar uma explicação em torno da dualidade onda-partícula para o que ocorre com o estado do fóton quando tentamos descobrir por qual dos braços ele passa.

Quando usamos polarizadores ou detectores de forma que o arranjo experimental permita saber qual o caminho seguido pelo fóton, então podemos inferir qual caminho o fóton seguiu. Nesse caso, dizemos que o fóton tem o atributo posição. Tendo o atributo posição, tudo acontece como se o fóton fosse uma partícula e como consequência, não verificamos nenhum padrão de interferência. Vale ressaltar que somente ondas exibem um padrão de interferência e ondas não têm o atributo posição definido.