

Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder

Fernanda Ostermann, Cláudio J. H. Cavalcanti, Sandra D. Prado e Trieste dos S. F. Ricci

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física. Porto Alegre. Brasil. E-mails: fernanda.ostermann@ufrgs.br, claudio.cavalcanti@ufrgs.br, prado@if.ufrgs.br, ricci@if.ufrgs.br.

Resumo: Neste artigo sustentamos que a dualidade onda-partícula deve ser o conceito central na introdução da física quântica no ensino médio. Do ponto de vista teórico-metodológico, propomos que a “porta de entrada” para o mundo quântico seja a óptica ondulatória, tendo-se como recurso didático principal um software livre do tipo “bancada virtual”, que simula o fenômeno da interferência quântica em um aparato denominado de Interferômetro de Mach-Zehnder.

Palavras-chave: Conceitos de física quântica, interferômetro de Mach-Zehnder; formação de professores.

Title: Fundamentals of quantum physics in the light of a virtual Mach-Zehnder interferometer.

Abstract: In this work we defend the wave-particle duality as the central concept in the introduction of Quantum Physics at high school classes. From the methodological and theoretical viewpoint, we present the ondulatory optics as a main door to the quantum world. The main didactical resource in this approach is a free software which simulates quantum interference phenomena in an apparatus called Mach-Zehnder Interferometer.

Keywords: Mach-Zehnder interferometer, quantum physics, quantum interference, epistemological interpretations.

Introdução

Este artigo tem por objetivo apresentar os fundamentos que sustentam o Interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ), e as possibilidades oferecidas como recurso didático para a introdução do conceito de dualidade onda-partícula e da interpretação probabilística da física quântica. O que é relatado neste artigo faz parte de investigações desenvolvidas há mais de cinco anos por um grupo de professores do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IF-UFRGS), docentes do Programa de Pós-graduação em ensino de física desta instituição, referentes à questão da inserção da física quântica na formação de professores e no ensino médio. Estes estudos inserem-se no âmbito de um projeto sobre o ensino de Tópicos de Física Moderna e Contemporânea na formação de professores (apoio parcial do CnPq/Edital Universal 08/2004), que envolveu, sobretudo, a elaboração de um questionário sobre conceitos de física quântica (Ostermann e Ricci,

2004), a construção e a avaliação de uma unidade didática, na formação de professores, baseada em experimentos virtuais (Ostermann e Ricci, 2005) e o desenvolvimento de um software livre do tipo "bancada virtual" que simula o fenômeno da interferência quântica em um aparato denominado de Interferômetro de Mach-Zehnder (Ostermann *et al.*, 2008; Ostermann *et al.*, 2006). Como decorrência dessas pesquisas, discussões sobre interpretações da física quântica também foram proporcionadas com base em simulações realizadas com o interferômetro virtual (Ostermann e Prado, 2005). Todos esses recursos, em permanente desenvolvimento, fazem parte da unidade didática, além de um texto de apoio (Ricci e Ostermann, 2003). Neste projeto há ainda trabalhos sobre o ensino de supercondutividade (Ostermann e Ferreira, 2006) e o desenvolvimento de hiperfídmias para a *internet* sobre este fenômeno quântico em escala macroscópica.

É importante explicitar as idéias centrais que vêm norteando, de forma recorrente, nossas investigações. Em primeiro lugar, defendemos a concepção de que a física quântica deva ser introduzida, na formação de professores, a partir de seus fundamentos e explorando, por meio de analogias, quais são suas diferenças em relação à física clássica. Isso implica, por um lado, abordar a dualidade onda-partícula de forma mais profunda do que a encontrada na maioria dos livros didáticos de ensino médio, onde o caráter corpuscular é privilegiado, em detrimento dos aspectos tipicamente ondulatórios dos objetos quânticos. Por outro lado, implica também renunciar a uma abordagem histórica da física quântica, em que os conceitos e a fenomenologia quântica são abordados na ordem cronológica das propostas teóricas e das descobertas experimentais - justamente o tipo de abordagem adotada, via de regra, nos livros didáticos e nos cursos de física de graduação. Essa estratégia (seqüência histórica e comportamento corpuscular enfatizado) pode reforçar noções clássicas que o estudante já traz consigo ao iniciar o curso, constituindo-se em um obstáculo epistemológico (Bachelard, 1984) para o desenvolvimento de uma legítima "visão quântica de mundo", preterindo-se uma abordagem de cunho predominantemente histórico, pois essa acaba por ressaltar as concepções corpusculares trazidas pelos alunos dos conteúdos prévios de física e química se não for além da velha mecânica quântica. Uma descrição histórica do desenvolvimento da teoria quântica foi defendida por Heisenberg em seu livro Física e Filosofia (Heisenberg, 1981) como *talvez a melhor maneira de abordar os problemas da Física Moderna* e pode, sim, ser uma estratégia com resultados efetivos para se ensinar física quântica quando o professor dispõe de muito conhecimento no assunto e de muito tempo para reflexão com os alunos. Para tal, a nosso ver, é necessário evitar, ao máximo, por exemplo, analogias com a mecânica newtoniana (caráter corpuscular) e, ao mesmo tempo, abordar com maior ênfase os aspectos ondulatórios (interferência, difração e polarização) dos objetos quânticos.

A formulação ondulatória (sem o uso do formalismo de Dirac ou do *picture* de Heisenberg) é amplamente adotada na graduação em Física justamente pelas analogias quase que naturais com a Óptica Ondulatória, que permitem assim associar-se formalmente determinados problemas de MQ a problemas análogos de Óptica. É natural que o argumento das

analogias pode ser enfraquecido se considerarmos (a) que as analogias têm um caráter não-comprobatório; e (b) o fato que elementos de conjuntos que apresentam comportamentos análogos ou duais (no sentido de que alguns de seus atributos ou grandezas obedecem à mesma equação) não possuem, necessariamente, a mesma natureza. No entanto, ao se analisar um experimento imaginário de dupla fenda de Young com partículas, considerou-se a distribuição resultante das partículas como a evidência de que possuíam a mesma natureza que os fótons, e não como a manifestação de comportamentos análogos de sistemas compostos por elementos distintos. Esse argumento foi crucial para que fossem aceitos, no final do século XIX, o caráter ondulatório e a natureza contínua dos fenômenos ópticos firmando assim, a formulação ondulatória da MQ. Assim, embora evitando o emprego de analogias com a mecânica newtoniana, enfatizamos analogias da física quântica com a óptica ondulatória. Uma abordagem em que a óptica ondulatória desempenha o papel de "âncora" no mundo clássico familiar aos estudantes. Em outras palavras, nessa estratégia, a óptica ondulatória constitui uma espécie de "porta de entrada" para o mundo quântico, e a física quântica é abordada no âmbito na formulação de Schrödinger, a mecânica ondulatória. Essas *não são*, no entanto, as condições de contorno típicas do ensino médio brasileiro. Desse modo, preterimos a abordagem histórica em favor da introdução direta da interferência quântica e do conceito de dualidade onda-partícula vistos à luz da formulação de Schrödinger ou, simplesmente, Mecânica Ondulatória (MO), concluída em 1926.

A dupla fenda para partículas foi um experimento imaginário consagrado por Feynman em sua série de livros publicada em 1963 (Feynman *et al.*, 1963), tornando-se base para a discussão do princípio da superposição em livros didáticos. A preferência majoritária para a introdução de conceitos quânticos com o arranjo da fenda dupla não se dá por ser esse um arranjo livre de quaisquer dificuldades conceituais, mas em grande parte pelas suas referências históricas às experiências de Young em 1801, que a tornou, portanto, um exemplo recorrente no contexto da Óptica Ondulatória. Apesar de sua relativa simplicidade matemática no limite de Fraunhofer (quando o anteparo está longe das fendas) e do contato prévio do estudante com esse experimento imaginário, optamos por introduzir o conceito da interferência quântica via um IMZ virtual, como será descrito posteriormente.

O IMZ possui dois divisores de feixes e é totalmente equivalente a uma dupla fenda, o que se contraporia à introdução de um modelo "novo" para professores e estudantes, já acostumados com a dupla fenda. Há, no entanto, fortes argumentos e suporte na literatura (Müller e Wiesner, 2002; Pessoa Jr., 1997, 2003) em favor da proposta de usar o IMZ como uma releitura mais didática e mais moderna da dupla fenda (Cabral *et al.*, 2004; Ricci *et al.*, 2007). Do ponto de vista conceitual e técnico, o IMZ pode operar em regime clássico, com uma fonte LASER, e em regime monofotônico, quando a intensidade da fonte é reduzida ao limite de um fóton emitido por vez. Em regime quântico, a questão "Por qual braço rumou o fóton?" pode naturalmente ser problematizada sem as complicações adicionais relacionadas a escalas microscópicas envolvidas e a possíveis interações do fóton com as paredes e/ou com o material da dupla fenda, como ocorre muitas vezes no caso do emprego da fenda dupla. Essas

complicações adicionais são fatores que podem representar um obstáculo à aprendizagem, uma vez que o estudante, ao invés de se aperceber do “fato novo” (o comportamento quântico) simulado pelo arranjo, pode vir a atribuir os resultados ou o padrão observados na tela a possíveis ruídos externos, imperfeições e interações desconhecidas. Embora o IMZ clássico introduza maiores dificuldades matemáticas se considerado a largura do feixe, essa complicação adicional é de natureza completamente diferente da anterior e pode ser sobrepujada sem perdas conceituais.

Há outros fatores recentes ligados à física do cotidiano dos alunos e dos professores que favorecem a adoção do IMZ no ensino de física quântica. O esquema do IMZ tem sido extensivamente mostrado e explorado tanto em artigos técnicos da área de computação e da criptografia quânticas (Cabral *et al.*, 2004) quanto em artigos e revistas de divulgação científica voltados para um público menos especializado. A possibilidade da computação quântica, fundamentada no princípio da superposição, vir a permitir o desenvolvimento de computadores quânticos tem fascinado tanto cientistas quanto leigos pela promessa de uma revolução tecnológica sem precedentes, uma vez que computadores quânticos seriam muito mais rápidos do que os atuais. Nesse ínterim, já se observa livros recentes de física quântica para um público mais geral que introduzem o princípio da superposição usando o IMZ (Scarani, 2006). O IMZ é justamente um exemplo simples, mas não-trivial, de um sistema de um *qubit* (do inglês *quantum bit*, a unidade básica de informação do computador quântico). A operação quântica mais básica do computador quântico é a obtenção de um estado de superposição, um *qubit*, obtido na operação de Hadamard, isto é, um IMZ (Cabral *et al.*, 2004; Oliver *et al.*, 2005; Sarkar *et al.*, 2006). É, então, mais do que apropriado levá-lo ao ensino médio em uma modalidade virtual, pois este *software* pode ser um recurso importante que venha a proporcionar condições para que os alunos compreendam o princípio básico da computação quântica.

Nas próximas seções apresentamos nosso referencial teórico e vários aspectos da física quântica a serem explorados à luz do IMZ virtual no ensino médio.

A introdução da física quântica na perspectiva sociocultural

As pesquisas sobre a introdução de física quântica no nível médio e na formação de professores parecem ainda muito enfocadas no conteúdo, sem maiores considerações sobre fundamentos teóricos na área de educação. O construtivismo, apesar de representar um guarda-chuva que tem dado origem a diferentes propostas educativas, tem sido pouco utilizado, de fato, para orientar o desenvolvimento de materiais didáticos que incorporem fundamentos de física quântica. O fato de a abordagem construtivista ser hoje predominante no meio educacional não significa uma tendência única refletida nos materiais didáticos, mesmo porque a idéia de construção do conhecimento está presente na obra de vários autores, como Piaget, Vygotsky, Paulo Freire, Freud entre outros e, dependendo de qual deles seja o referencial eleito, configura-se uma proposta pedagógica um pouco diferenciada.

Apesar das diferenças entre as concepções teóricas sobre o construtivismo, há elementos comuns que são fundamentais. Talvez o mais marcante seja a consideração do indivíduo como agente ativo de seu próprio conhecimento, o que no contexto educativo desloca a preocupação com o processo de ensino (visão tradicional) para o processo de aprendizagem. Na visão construtivista, o estudante constrói representações de acordo com suas experiências e conhecimentos anteriores sobre os quais novos conhecimentos são edificados. Apesar de individual, este processo se dá, necessariamente, pela interação com os outros e com a realidade. Em particular, a perspectiva sociocultural na pesquisa em Educação em Ciências tem indicado um caminho promissor para a superação da predominância do caráter individual e cognitivista tanto no que se refere à aprendizagem do aluno quanto à formação de professores. Essa abordagem concebe ciência, educação em ciências e pesquisa científica como atividades sociais humanas inseridas num sistema cultural e institucional, o que implica atribuir um peso teórico significativo ao papel da interação social (Vygotski, 1984, 1989), vendo-a como necessária ao processo de aprendizagem e não meramente como auxiliar (Lemke, 2001). O que caracteriza a psicologia humana para Vygotsky (1984) é o fato de que o desenvolvimento se dá pela "internalização" de atividades socialmente enraizadas e historicamente construídas" (p. 64). O aprendizado humano pressupõe uma natureza social específica na medida em que todas as funções intelectuais superiores originam-se das relações entre indivíduos.

Um dos aspectos mais importantes da perspectiva sociocultural é a primazia da linguagem no entendimento dos processos humanos (Wertsch, 1993). Ao compreender os processos educativos atribuindo à linguagem um papel constitutivo na elaboração conceitual, e não meramente uma dimensão comunicativa ou de instrumento, o referencial sociocultural muda radicalmente o olhar dos pesquisadores, que passam a integrar, necessariamente, a mediação do outro e de ferramentas culturais como parte do processo de aprendizagem. Nesta perspectiva, busca-se enfocar, principalmente, a construção de significados na interação verbal entre sujeitos que, trabalhando em duplas e com a ajuda de membros mais competentes (no caso, o professor), constroem significados cada vez mais ricos e culturalmente válidos acerca do fenômeno da interferência quântica, a partir do uso de uma ferramenta cultural em particular – o *software* IMZ. A consideração do experimento virtual como ferramenta cultural permite problematizar em que medida sua mediação conforma a ação educativa.

Do ponto de vista da introdução da física quântica, assumimos, portanto, como pressuposto teórico básico a concepção de que o novo conhecimento é construído, pelo estudante, a partir de seu conhecimento prévio e também da interação com parceiros mais capazes ou mais maduros (Vygotski, 1984, 1989). Esse pressuposto nos levou à adoção da chamada "vertente metodológica espanhola" (Gil e Solbes, 1993), que advoga que a física quântica seja ensinada de forma relacionada à Física Clássica, seja numa relação de continuidade ou de ruptura. Em nosso estudo, essa escolha, como mencionado, significou utilizar a Óptica Ondulatória como uma espécie de "porta de entrada" para o mundo quântico através da abordagem de analogias entre situações da Óptica e da física quântica, e também da exploração de semelhanças formais entre as duas teorias. O

papel destacado da Óptica Ondulatória na concepção da unidade conceitual, como "pano de fundo" clássico para a abordagem da física quântica, está baseado na própria formulação histórica da mecânica ondulatória por Schrödinger, em 1925-26 (Ostermann e Ricci, 2005). Em relação a outras abordagens desenvolvidas (Ostermann e Ricci, 2004; Ostermann e Ricci, 2005), incorporamos, na situação de ensino, diferentes interpretações da física quântica, além da ortodoxa (Escola de Copenhague).

O ensino da física quântica também pode proporcionar uma visão contemporânea da prática científica, na qual a ciência é encarada como construção humana e, portanto, inacabada, aberta e historicamente datada. À medida que avança pelo currículo escolar de física, o estudante deveria ser levado a compreender que os cientistas trabalham com modelos da realidade; que eles não "descobrem" as leis da natureza, em lapsos de genialidade, leis que seriam instituídas por algum demiurgo e que seriam, portanto, definitivas e imutáveis; e que os modelos matemáticos propostos pelos cientistas e os enunciados por eles formulados (leis e princípios) podem ser avaliados a partir de sua utilidade em descrever o que de fato se observa na natureza, mais do que por sua "veracidade" (Laudan, 1986).

A formação do professor de Física e a introdução da física quântica no ensino médio

Recentemente, tem sido admitido cada vez mais que há um corte epistemológico entre o conhecimento de Física com o qual o licenciando lida na universidade e o que ele terá que ensinar no ensino médio. A pouca discussão do significado conceitual e da interpretação qualitativa do formalismo matemático nos cursos de Física, essencial para o professor de nível médio, e a falta de relação deste conteúdo com a realidade escolar induzem o estudante a deixar de lado o conteúdo abordado nos cursos de licenciatura e a ter como referência o conteúdo dos livros didáticos de nível médio. O aprofundamento do conteúdo físico, na formação, relacionando-o interdisciplinarmente a conteúdos pedagógicos e aos resultados das pesquisas em ensino de Física, para gerar novas metodologias de ensino não tem sido fomentado. Em particular, em relação à temática da física quântica no ensino médio, essa ruptura epistemológica ocorre de forma mais aguda na formação de professores, na medida em que o isomorfismo de conteúdo, em analogia ao princípio do isomorfismo metodológico defendido por Porlán e Rivero (Porlán Ariza e Rivero, 1998), não tem sido respeitado.

Em analogia com o princípio do isomorfismo metodológico, o isomorfismo referente ao conteúdo da física quântica implica que a própria formação de professores deverá contemplar, desde seu início, conteúdos mais atuais e fundamentais da teoria. Sem respeitar esse princípio, não podemos esperar que elementos da física quântica sejam ensinados nas escolas.

No que diz respeito à introdução da física quântica no ensino médio, é reconhecida a pouca tradição didática destes conteúdos mais atuais de Física. Essa linha de investigação, tanto no exterior como em nosso país, como já ressaltado, tem focalizado bem mais o conteúdo específico em detrimento de aspectos metodológicos e fundamentos teórico-epistemológicos, nas publicações, o que acaba representando mais um

obstáculo na construção do conhecimento pedagógico do conteúdo da física quântica pelos professores em formação inicial e continuada.

Do ponto de vista das políticas públicas em nosso país, a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996) defende o ensino da física quântica a partir de um objetivo para o ensino formal: o destaque dado à educação tecnológica básica, a compreensão do significado da ciência, o domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna. Particularmente no que se refere à área de "Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias" na qual se insere a disciplina de Física, os parâmetros curriculares nacionais (Brasil, 2006), sem mencionar uma lista de conteúdos a serem trabalhados no ensino médio, ressaltam que as disciplinas científicas têm omitido os desenvolvimentos realizados do século XX em diante, propondo uma atualização de conteúdos que proporcione aos alunos as condições para desenvolver uma visão de mundo mais atualizada. Já temas de física quântica estão explicitamente expressos em muitos dos aspectos das "Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais" (Brasil, 2006). A integração entre diferentes áreas da Física é também uma preocupação das novas orientações curriculares, uma vez que estas defendem uma releitura das áreas tradicionalmente trabalhadas, estabelecendo que competências e habilidades desenvolvem-se por meio de ações concretas, que se referem a temas estruturadores. Nesse caso, tópicos de física quântica podem se inserir, naturalmente, no tema estruturador "Matéria e Radiação" (Brasil, 2006), no qual está contemplada a necessidade de proporcionar aos estudantes uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria e sobre os diferentes modelos de explicação propostos. Vê-se, portanto, que também do ponto de vista da nova legislação há uma tendência de promover a introdução de física quântica, buscando no conhecimento científico recente subsídios para que o aluno venha a compreender o mundo criado pelo homem atual. A formação (inicial e continuada) de professores deverá contemplar essas discussões, sob pena de condenarmos o ensino da física quântica ao que está proposto na maioria dos livros didáticos de Física para o ensino médio. Nuances da "velha" física quântica são os conteúdos abordados nos últimos capítulos das obras disponíveis no mercado brasileiro

No âmbito da formação inicial e continuada de professores, é crucial que se busque também uma abordagem mais conceitual e qualitativa da física quântica. Ao contrário de ser uma desvalorização para essa formação, esse tipo de ensino requer do professor profundo conhecimento do conteúdo. Além disso, possíveis transposições didáticas para o ensino médio dependem fortemente de uma sólida formação conceitual. A concepção desta formação deve estar fundamentada em discussões epistemológicas e ontológicas.

O interferômetro de Mach-Zehnder no ensino médio

Algumas considerações iniciais

Ao contrário da maioria dos livros didáticos de Física para o ensino médio, que direcionam seus tópicos de física quântica em grande parte à

quantização de energia (radiação térmica, efeito fotoelétrico e átomo de Bohr, entre outros tópicos), adota-se aqui um outro caminho. A essência da física quântica não reside necessariamente na quantização de energia, sendo esta uma consequência de seus princípios mais gerais. No nível médio, a discussão da física quântica pode residir em dois de seus aspectos fundamentais:

- *Dualidade onda-partícula* (que está relacionado com, por exemplo, a superposição de estados, o princípio da incerteza, a quantização de energia e a energia de ponto zero);
- *Interpretação probabilística da física quântica* (relação entre o formalismo e a medida).

A dualidade onda-partícula é um aspecto bastante emblemático da física quântica, quase soando como um paradoxo quando se trata de explicar o comportamento de objetos quânticos. Em nível médio, este conceito pode ser abordado qualitativamente, ajudando a promover uma visão mais adequada do que aquela normalmente veiculada pelos livros didáticos de Física, nos quais se afirma que as partículas e a radiação apresentam comportamento dual sem explicitar exatamente como isso realmente pode ser entendido. Essa discussão, bastante pertinente, pode ser iniciada a partir do uso do interferômetro virtual que será discutido a seguir. Nesse caso, o *software* seria mais um elemento mediador e gerador de discussões, essenciais na abordagem de conceitos de física quântica, do que uma ferramenta destinada à simples visualização de resultados já conhecidos; um recurso didático, e não um simples recurso visual.

A Dualidade Onda-Partícula foi qualificada por Richard Feynman, quando aborda o fenômeno da interferência quântica no *Lectures on Physics* como "o único mistério" da Física Quântica. Segundo Feynman (1963):

[...] um fenômeno que é impossível, absolutamente impossível, de se explicar por qualquer maneira clássica, e que tem em si o coração da mecânica quântica. Na realidade, ele contém o único mistério. (Feynman *et al.*, 1963, p. 1-1)

A Dualidade Onda-Partícula foi considerada, durante um bom tempo, o aspecto fundamental da Física Quântica. Ela levantou problemas conceituais e filosóficos bastante desafiadores (Aspect, 2006) e um exemplo clássico de um desses problemas é a interferência quântica. A formulação probabilística da Física Quântica (que foi finalizada em 1927) descreve matematicamente o fenômeno da interferência quântica, mas a ontologia do objeto quântico é assunto de discussão. Embora a Física Quântica seja bastante preditiva, pois tem sucesso em prever diversos resultados obtidos experimentalmente (inclusive a interferência quântica), ela é bastante enigmática e as interpretações filosóficas, subjacentes à teoria, têm então um papel importante no sentido de melhor compreender a natureza do mundo microscópico. Segundo Pessoa Jr. (1997, 2002, 2003, 2006) tais interpretações possuem basicamente o caráter ontológico (natureza ondulatória ou corpuscular do objeto quântico) e epistemológico (basicamente positivista ou realista).

Com relação à ontologia, uma interpretação pode conceber um objeto quântico de maneira corpuscular, ondulatória ou dualista. Quanto às atitudes epistemológicas, as duas básicas são realismo e positivismo. Com estas categorias, encontramos quatro grandes grupos interpretativos (Pessoa Jr., 2002, p. 108). Segundo Pessoa Jr. (Pessoa Jr., 2006), existem pelo menos quinze interpretações diferentes propostas da Física Quântica. Isso mostra a Filosofia adjacente a uma teoria científica muito bem sucedida, no sentido de interpretar a natureza dos sistemas quânticos.

Com a percepção, em 1935, de que o formalismo da Física Quântica permitia o estranho efeito do emaranhamento, novamente a teoria mostrava seu caráter enigmático e completamente não intuitivo (o famoso paradoxo EPR, formulado por Einstein e seus colaboradores Boris Podolsky e Nathan Rosen). Essa estranha correlação que existe entre partículas separadas parecia realmente indicar que a teoria estava incompleta. Anos se passaram e John Bell, em 1964, publicou um artigo reavaliando o paradoxo EPR. A partir desse ponto, viu-se que o emaranhamento não poder ser reduzido à Dualidade Onda-Partícula: é, de fato, um novo mistério e é tido hoje como o segundo aspecto fundamental da Física Quântica e foi o que deflagrou a chamada *segunda revolução quântica* (Aspect, 2006, p. xii). É interessante notar que o emaranhamento e os problemas conceituais levantados (como o paradoxo EPR) fizeram com que se desenvolvessem métodos de observação dos objetos quânticos que esclareceram muito a respeito do seu comportamento.

O interferômetro virtual de Mach-Zehnder

Aspectos básicos

O IMZ virtual tem se mostrado uma ferramenta didática promissora para o ensino de fundamentos de física quântica. Ele tem sua inspiração maior nos trabalhos de Pessoa Jr. (Pessoa Jr., 1997, 2003) e dos alemães Müller e Wiesner (Müller e Wiesner, 2002). Estes últimos foram pioneiros no desenvolvimento de um *software* semelhante, mas menos elaborado e com menor quantidade de recursos.

O IMZ está representado de forma esquemática na figura 1. Sob condições ideais, os espelhos E_1 e E_2 são considerados perfeitamente refletores e os semi-espelhos S_1 e S_2 são divisores idênticos de feixes que refletem exatamente 50 por cento da intensidade da luz incidente e transmitem o restante. Considere ainda que a fonte emita um feixe de luz monocromática, coerente e de intensidade $2I_0$, polarizado na direção horizontal (um feixe de laser).

Assim, o primeiro semi-espelho separa a luz incidente em duas componentes de intensidade I_0 , cada uma viajando por um dos dois caminhos, denominados braço A (transmitida, cor laranja na figura) e braço B (refletida, cor azul na figura). Cabe esclarecer que as cores são apenas indicativas na figura 1, pois a fonte é supostamente monocromática e nem os espelhos ou os semi-espelhos alteram sua frequência. Cada um desses feixes incide sobre um espelho totalmente refletor (E_1 no braço A, e E_2 no B), sofrendo nova reflexão.

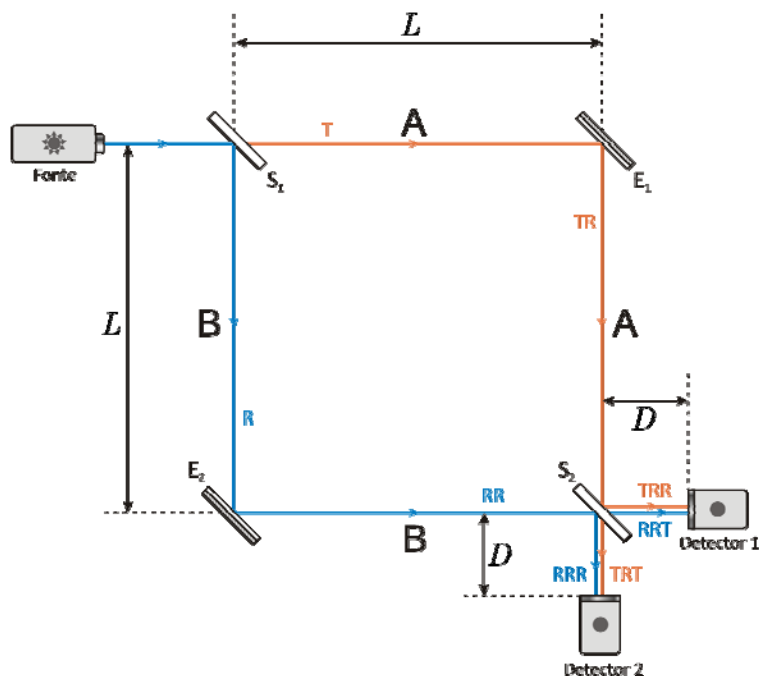


Figura 1.- Representação esquemática do IMZ. Ele é composto por uma fonte monocromática e coerente, dois espelhos 100 por cento refletor (E₁ e E₂) e dois semi-espelhos idênticos, que transmitem 50 por cento da luz incidente, refletindo os 50 por cento restantes (S₁ e S₂).

Após, ambos os feixes incidem no segundo semi-espelho, sendo recombinados em duas novas componentes, que incidem nos detectores 1 e 2. O detector 1 é atingido pela luz que vem do braço B, *transmitida* pelo semi-espelho S₂, (cor azul) e pelo que vem pelo braço A, *refletida* pelo mesmo semi-espelho (cor laranja). O detector 2 também é atingido pelos feixes que vêm pelos dois braços sendo que, nesse caso, a luz que vem pelo braço A é *transmitida* por S₂ (cor laranja), e a que vem pelo braço B é *refletida* pelo mesmo semi-espelho (cor azul). Em cada etapa, na figura 1 é mostrado o número de reflexões e transmissões, através das siglas R e T, que cada componente sofre ao longo do percurso. A luz que incide no centro do detector 1 é uma composição de duas ondas que sofreram números iguais de reflexões e transmissões (RRT e TRR). No detector 2 a situação é distinta, pois uma componente sofre três reflexões (RRR) e a outra duas transmissões e uma reflexão (TRT).

Na configuração mostrada na figura 1, cada reflexão acarreta em um deslocamento de fase de $\pi/2$ (Degiorgio, 1980), o que corresponde a um quarto de um comprimento de onda ($\lambda/4$). A transmissão por um meio refringente, como no caso dos semi-espelhos, introduz diferença de caminho óptico ao longo do percurso. Mas como cada um dos feixes componentes passa uma vez por cada semi-espelho e os mesmos são supostamente idênticos, o caminho óptico é o mesmo para cada componente. Sendo assim, os dois feixes que chegam ao detector 1 chegam em fase, pois ambos sofrem um mesmo número de reflexões e transmissões. Logo, haverá interferência construtiva entre os dois feixes recombinados em S₂ e o primeiro detector vai detectar 100 por cento da intensidade do feixe original. Conseqüentemente, o detector 2 não detectará nada do feixe original. Isso ocorre porque um dos componentes

do feixe original sofre três reflexões, o que acarreta em um deslocamento de fase de $3\pi/2$. O outro feixe sofre duas transmissões e uma reflexão, o que acarreta um deslocamento de fase de $\pi/2$. Ambos os feixes têm entre si uma diferença de fase de π , que corresponde a $\lambda/2$, ou seja, interferência destrutiva. Por esse motivo, nada é detectado pelo detector 2.

O IMZ virtual no regime clássico

Entende-se aqui por regime clássico, o regime onde a intensidade da fonte é tal que um número muito grande de fótons é emitido por vez. Nota-se que aparece um padrão típico de interferência com regiões anelares claras (interferência construtiva) e escuras (interferência destrutiva) nos dois anteparos. Uma descrição mais detalhada do interferômetro no regime clássico e dos padrões anelares pode ser encontrada no trabalho de Ricci *et al.* (2007).

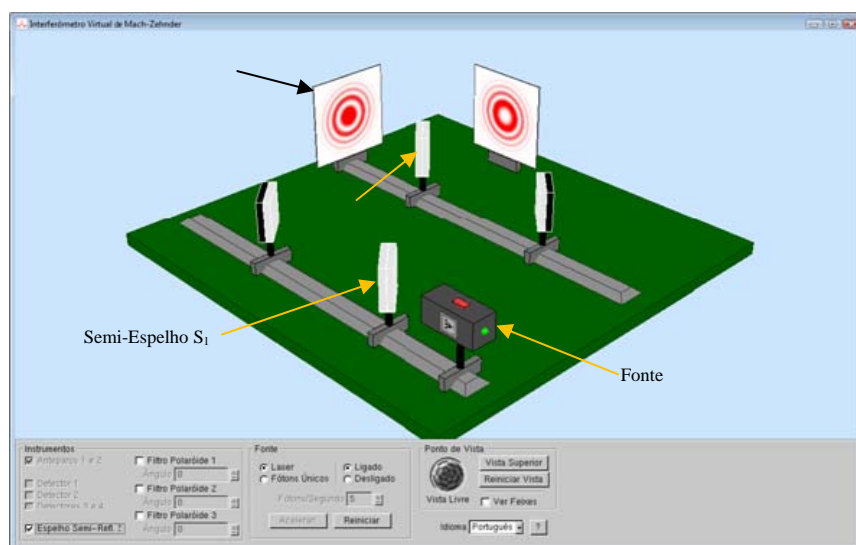


Figura 2.- O IMZ virtual no regime clássico. São mostrados aqui os espelhos e semi-espelhos, bem como os anteparos e a fonte. O idioma da interface gráfica do programa pode ser escolhida entre português, inglês e espanhol. O IMZ virtual pode ser obtido no endereço <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda>.

Os detectores descritos anteriormente são capazes de mostrar o que acontece apenas na região central de cada anteparo. Assim, o anteparo 1 apresenta uma região clara no centro, pois ali os dois feixes interferem construtivamente.

O IMZ virtual consiste no arranjo mostrado na figura 1, com uma visualização tridimensional cujo ponto de vista pode ser escolhido. A sua interface gráfica está mostrada na figura 2. No regime clássico há várias possibilidades que podem ser exploradas. Pode-se, por exemplo, retirar o segundo semi-espelho, o que faz com que o padrão de interferência desapareça. A razão é simples: é justamente o segundo semi-espelho que, ao recombinar o feixe em dois componentes, faz com que essas componentes interfiram em cada anteparo e gerem os padrões ali observados. Sem esse dispositivo, cada componente que vem por um dos braços não se recombina com a que vem pelo outro, e acaba incidindo sozinha no correspondente anteparo (ver figura 1).

Essa configuração está mostrada na figura 3. Nela é visto apenas uma mancha em cada anteparo, com intensidade maior no centro e que diminui para pontos mais afastados dele, e não um padrão de máximos e mínimos típicos de um fenômeno de interferência. Vale a pena ressaltar melhorias, em termos de recursos e de multiplicação das possibilidades, desenvolvidas no nosso *software* em relação ao de Müller e Wiesner (Müller e Wiesner, 2002).

A versão alemã possui apenas o anteparo 1 (no nosso caso, temos dois anteparos), não permitindo a visualização do padrão complementar que se forma no anteparo 2, presente no *software* que desenvolvemos. Isso permite, com o *software* operando em regime quântico, que seja enfatizado com mais clareza o princípio da superposição quântica, um dos conceitos centrais da física quântica.

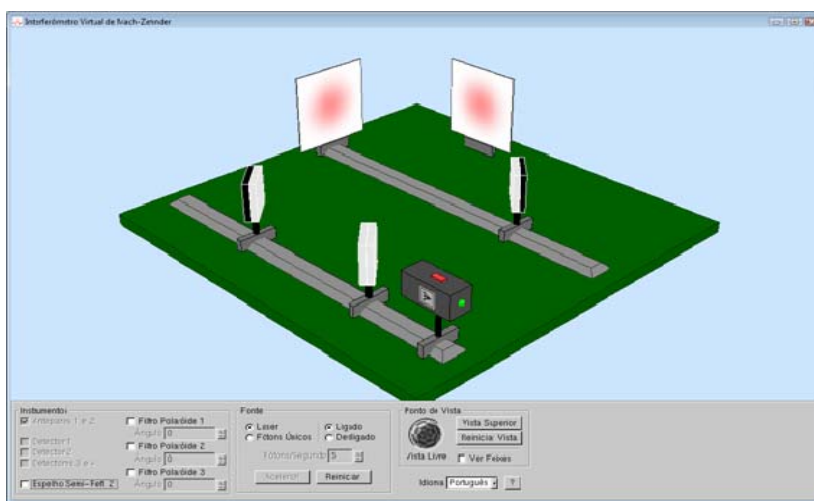


Figura 3. O IMZ virtual no regime clássico sem o segundo semi-espelho. Note que os padrões de interferência que apareciam na figura 3 desapareceram dos anteparos.

Em relação a esse conceito, outro recurso adicional, não disponível no *software* alemão, é a possibilidade de se retirar o segundo semi-espelho, o que vemos na figura 3, no regime clássico. Esta é uma forma interessante de explorar, neste regime, a destruição do padrão de interferência pela impossibilidade de se recombinar os feixes no segundo semi-espelho. No regime quântico, a retirada do segundo semi-espelho, como veremos mais adiante, permite ilustrar o comportamento corpuscular ao se impedir a superposição de estados para o fóton (Galvez *et al.*, 2005; Holbrow *et al.*, 2002; Ostermann e Prado, 2005; Ostermann *et al.*, 2006).

Como antes ressaltado, a luz supostamente emitida pela fonte virtual, no nosso *software*, é polarizada na direção horizontal, o que simula de maneira mais realística o funcionamento de um laser de boa qualidade. Além disso, este recurso adicional proporciona maiores possibilidades quanto ao uso dos polaróides, tanto no regime clássico quanto no quântico.

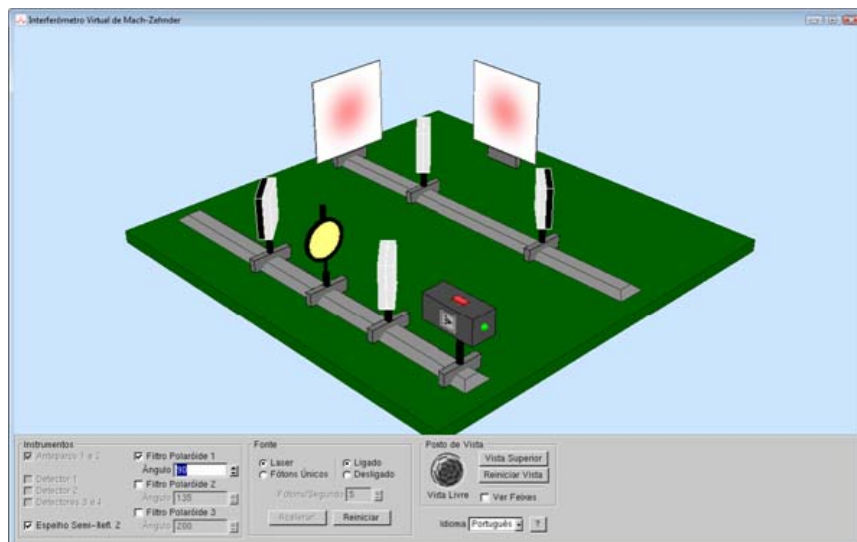


Figura 4. Um polaróide orientado de forma que seu eixo de polarização seja vertical, ou seja, perpendicular à direção de polarização do feixe emitido pela fonte.

Dos três polaróides disponíveis no IMZ virtual, dois deles podem ser introduzidos ao longo dos percursos realizados por cada componente, um em cada braço, e um terceiro pode ser colocado entre o segundo semi-espelho e o anteparo 1. Quando se inclui um polaróide no braço A, por exemplo, pode-se destruir o padrão de interferência nos dois anteparos se o polaróide for configurado de forma que o eixo de transmissão fique vertical (lembrar que a fonte emite luz polarizada na direção horizontal). Essa situação está mostrada na figura 4. Nesse caso, o polaróide simplesmente bloqueia a componente do feixe que segue pelo braço A, fazendo com que não haja recombinação dos feixes no segundo semi-espelho.

Pode-se obter o mesmo resultado colocando-se um polaróide no braço B, configurado novamente com seu eixo de transmissão na vertical. Nessas condições, o feixe que percorre o braço B é que será bloqueado, novamente fazendo desaparecer o padrão de interferência nos anteparos.

Uma forma interessante de se destruir o padrão de interferência nos dois anteparos é colocar, simultaneamente, um polaróide no braço A e outro no braço B, com seus eixos de polarização orientados perpendicularmente um em relação ao outro (cruzados), mas de forma que nenhum dos dois seja orientado com seu eixo de transmissão na direção vertical. Ou seja, os dois permitem a passagem de parte da intensidade do feixe, pela Lei de Malus (Nussenzveig, 2003).

Por exemplo, pode-se alinhar o eixo do polaróide do braço A em ângulo de 45° em relação à horizontal, e o polaróide do braço B, em 135° . Nesse caso, além de polarizarem o feixe original de acordo com suas respectivas orientações, ambos permitem, pela Lei de Malus, a passagem de metade da intensidade do feixe original. Assim, eles estão cruzados entre si ($135^\circ - 45^\circ = 90^\circ$), ou seja, a componente do feixe que percorre o braço A tem seu plano de polarização ortogonal ao plano da componente que percorre o braço B. Quando o feixe é recombinado no segundo semi-espelho, as duas componentes possuem planos de polarização ortogonais e, segundo a óptica ondulatória, não podem interferir. Esse aspecto está mostrado na figura 5.

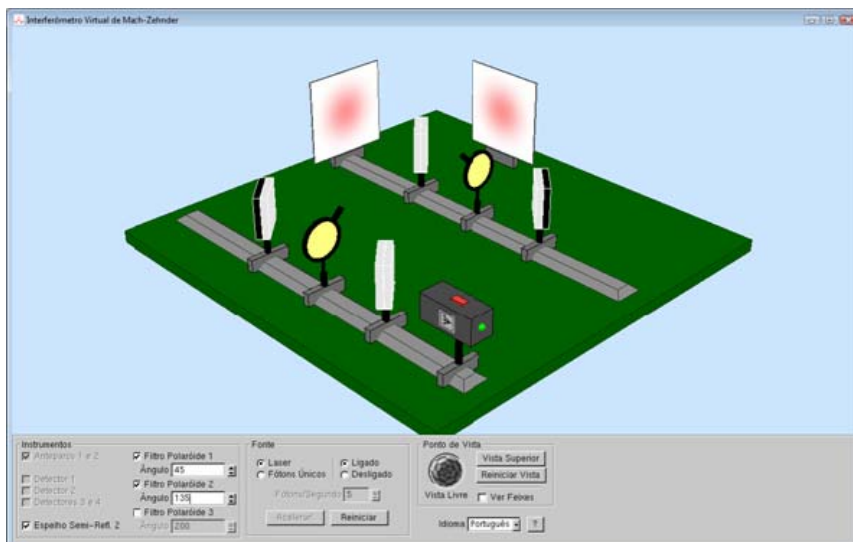


Figura 5.- Dois polaróides cruzados entre si são inseridos em cada um dos braços A e B. Os polaróides do braço A (esquerda) e do braço B (direita) possuem seus eixos de polarização orientados, respectivamente, a 45° e 135° em relação à horizontal.

Como vimos, a utilização do IMZ virtual no regime clássico pode ser útil na revisão de tópicos de Óptica Ondulatória. O padrão de interferência em forma de anéis pode ser facilmente entendido no ensino médio, mas deve-se evitar a introdução da função de Airy (Ricci et al., 2007) para explicar o decaimento da intensidade para pontos afastados do centro dos anteparos. Neste caso, pode-se apenas argumentar, qualitativamente, que esse efeito se origina do fato da largura do feixe não ser nula.

Além disso, a discussão envolvendo situações complexas com polaróides não necessariamente precisa ser levada ao ensino médio. As situações representadas da figura 2 à figura 5 são suficientes para a compreensão dos fenômenos que ocorrem no interferômetro, tanto em regime clássico quanto em regime quântico.

O IMZ virtual no regime quântico

Em 1986, na França, foi realizada uma experiência com o IMZ no regime de intensidades muito baixas de luz (Grangier et al., 1986). Como estabelecido por Einstein em seu trabalho seminal sobre o efeito fotoelétrico em 1905, a luz é formada por quanta de energia denominados fótons. Quando a intensidade luminosa da fonte é diminuída ao ponto de um fóton ser emitido por vez, diz-se que a mesma está operando em regime monofotônico. No caso do regime quântico, as expressões das intensidades reproduzem não a intensidade do feixe, mas a densidade de probabilidade de detecção do fóton nos anteparos (Galvez et al., 2005; Holbrow et al., 2002; Ostermann e Prado, 2005), que depende da diferença de fase introduzida pelos espelhos (Ricci et al., 2007).

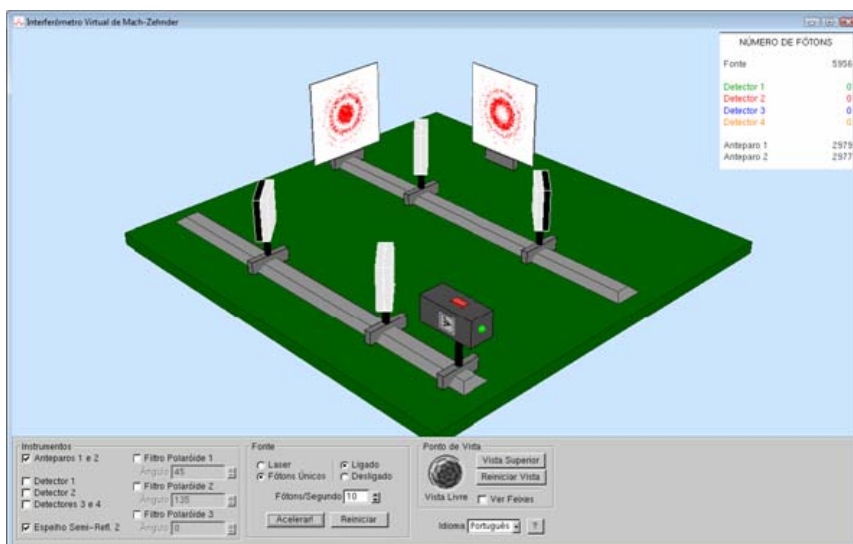


Figura 6.- O IMZ virtual no regime quântico. Os fótons emitidos pela fonte gradativamente formam um padrão de interferência semelhante ao mostrado na figura 2, evidenciando o comportamento ondulatório do fóton.

É nesse regime que residem dois dos aspectos mais fundamentais da física quântica: dualidade onda-partícula e interpretação probabilística proposta por Max Born. Esses aspectos podem ser observados nos anteparos ou detectores do IMZ virtual. Cada marca puntiforme registra a detecção de um fóton, de modo que a distribuição das detecções nos anteparos reproduz, após um tempo suficientemente longo, os padrões mostrados na figura 2. Ou seja, quando um fóton incide na tela dos anteparos, libera um quantum de energia que marca a posição no anteparo em que ele incidiu. No entanto, as chances de os fótons atingirem qualquer ponto da tela não são as mesmas, pois há uma probabilidade maior de eles atingirem certas regiões do que outras, sendo quase nula em torno dos mínimos de interferência.

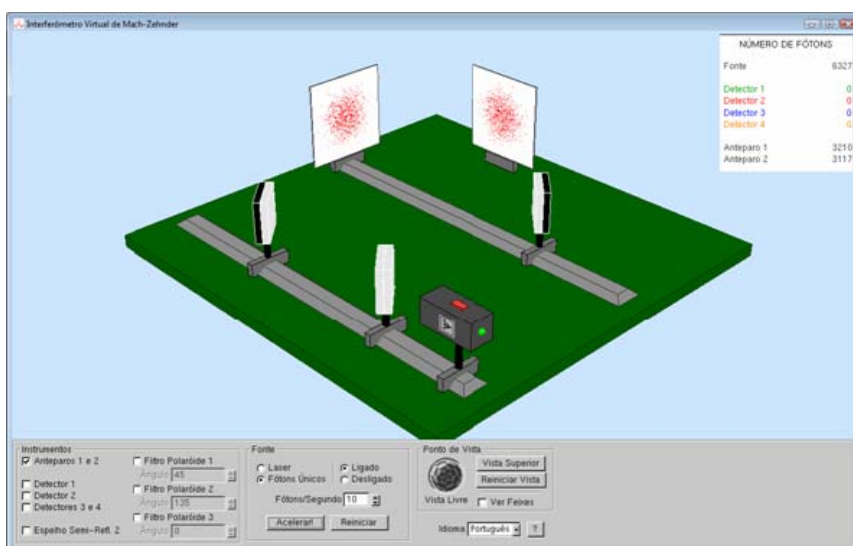


Figura 7.- Retirando-se o segundo semi-espelho, destrói-se o padrão de interferência e revela-se o comportamento corpuscular do fóton.

É essa probabilidade que explica a distribuição segundo a qual os pontos se acumulam nos anteparos. Isso evidencia o comportamento ondulatório do fóton já que, claramente, há um padrão de interferência quântica que se forma gradativamente nos dois anteparos. Essa situação está mostrada na figura 6. Ao ser retirado o segundo semi-espelho, o padrão de interferência observado na figura 6 desaparece. Nesse caso, o fóton que percorre o braço A é detectado no anteparo 2 e o que ruma pelo braço B é detectado no anteparo 1, evidenciando seu comportamento corpuscular. Como há uma probabilidade de 50 por cento de um fóton ser transmitido pelo semi-espelho S_1 , cerca de 50 por cento dos fótons emitidos pela fonte incidirão, em média, em cada um dos anteparos.

De acordo com a interpretação ortodoxa da física quântica, ou *interpretação de Copenhagen*, uma vez concluído o experimento, se for possível inferir por qual caminho rumou o fóton, seu comportamento será corpuscular (Ostermann e Prado, 2005; Pessoa Jr., 1997, 2003). Isso é exatamente o que está mostrado na figura 7.

Quando se insere um polaróide ao longo do braço A, orientado com seu eixo de transmissão na direção vertical, novamente é destruído o padrão de interferência dos anteparos. Nesse caso, sabe-se que apenas os fótons que rumam pelo braço B chegarão ao segundo semi-espelho, novamente evidenciando-se o comportamento corpuscular do fóton, como mostra a figura 8. Aqui, há uma probabilidade de 25 por cento para o fóton ser detectado em cada anteparo.

A figura 9 mostra que o comportamento corpuscular também pode ser evidenciado quando um detector que absorve o fóton é posicionado em um dos braços A ou B. Nesse caso, aparece uma situação análoga à descrita na figura 8.

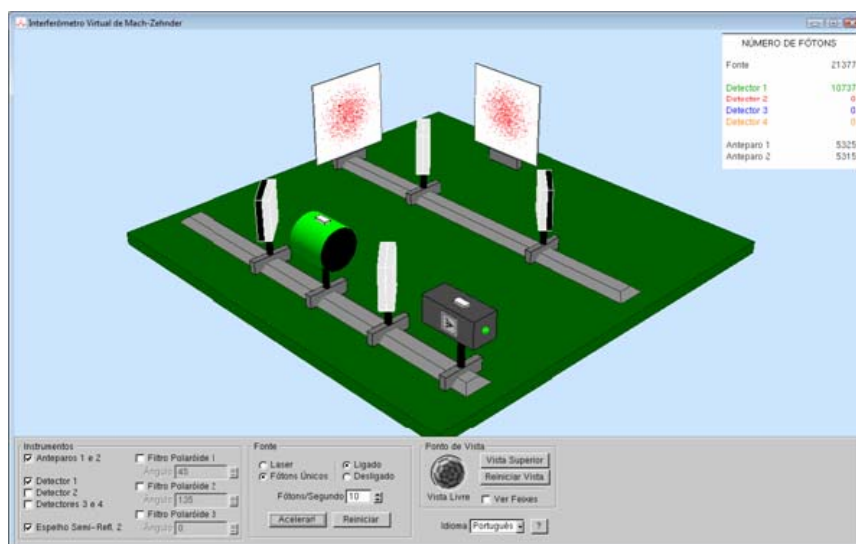


Figura 8.- A inserção de um polaróide no braço A, com seu eixo de transmissão alinhado perpendicularmente à direção da polarização da luz emitida pela fonte (horizontal), faz desaparecer o padrão de interferência e novamente evidencia o comportamento corpuscular do fóton.

Supondo que se coloque o detector no braço A, entre o primeiro semi-espelho S_1 e o espelho E_1 (ver figura 1) o fóton que atinge os anteparos só pode ter rumado pelo braço B e, como na situação descrita na figura 8, impede-se a superposição e, como consequência, destrói-se o padrão de interferência. Esse comportamento é tipicamente corpuscular, a exemplo do que ocorre também na situação descrita pela figura 8.

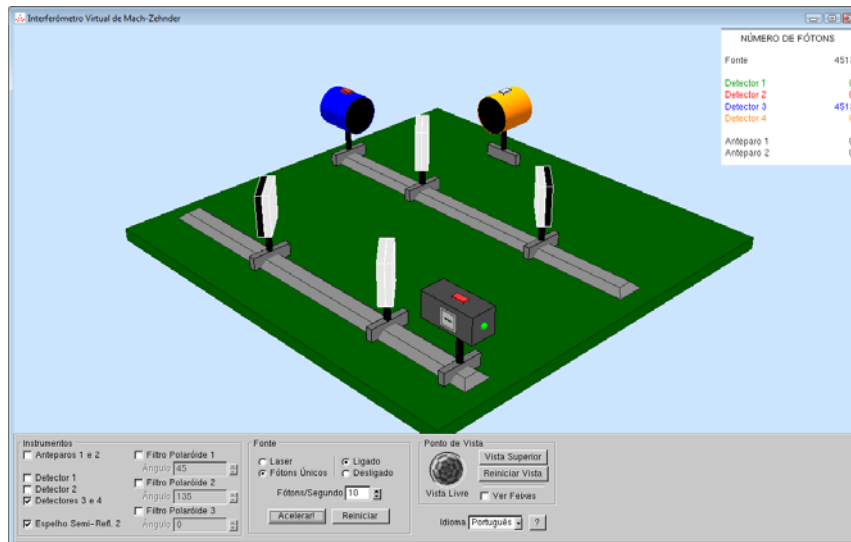


Figura 9.- Um detector, que absorve cada fóton detectado, é posicionado ao longo do braço A. Novamente é destruído o padrão de interferência e evidencia-se o caráter corpuscular do fóton.

No ensino médio, pode-se adotar uma estratégia para contornar a necessidade de explicar matematicamente o padrão mostrado na figura 2. Essa estratégia consiste em substituir os anteparos por detectores (esse procedimento só pode ser adotado no regime quântico). Assim, fica eliminada a necessidade de se argumentar justificando o padrão de anéis cuja intensidade (no caso quântico, probabilidade) decresce para regiões mais afastadas do centro do anteparo.

Os comportamentos corpuscular e ondulatório do fóton também podem ser discutidos com o auxílio dos detectores. Na figura 10 está mostrada uma situação análoga à que está mostrada na figura 6, onde os anteparos 1 e 2 foram substituídos, respectivamente, pelos detectores 3 e 4. Ao contrário da situação mostrada na figura 6, supõe-se que a fonte emite fótons perfeitamente colimados.

Nessa figura, o fóton evidencia um comportamento ondulatório: a fonte emite fótons originalmente no raio central, sendo todos eles acusados pelo detector 3 e nenhum pelo detector 4. A explicação desse fenômeno reside na interferência quântica: o ponto central do detector 3 corresponde a uma probabilidade de 100 por cento de detecção e o ponto central do detector 4 corresponde a uma probabilidade de detecção nula.

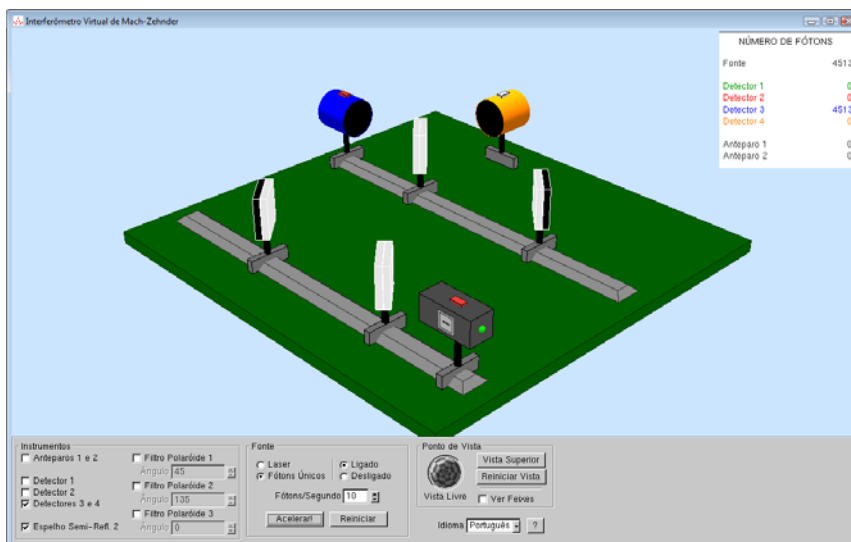


Figura 10.- Situação análoga à mostrada na figura 6, onde os anteparos 1 e 2 foram substituídos pelos detectores 3 (cor azul) e 4 (cor laranja). Nessa situação se evidencia o comportamento ondulatório do fóton.

Na figura 11 está mostrada a situação onde um detector é posicionado no braço B, entre o espelho E₂ e o semi-espelho S₂. Assim, tanto o detector 3 quanto o 4 acusam aproximadamente 25 por cento do total emitido pela fonte. Aproximadamente 50 por cento do total de fótons emitidos pela fonte são absorvidos pelo detector 2. Nesse caso, o fóton evidencia um comportamento corpuscular.

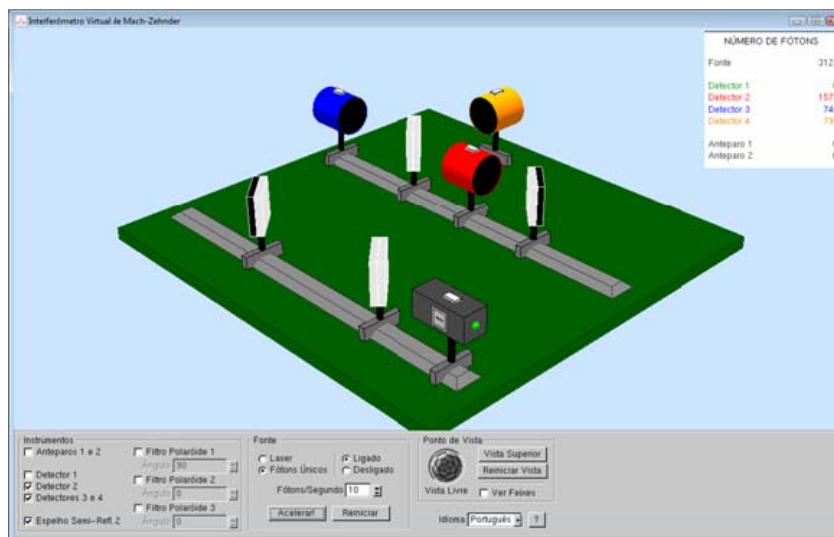


Figura 11.- Um detector (detector 2, cor vermelha) é posicionado no braço B, entre o espelho E₂ e o semi-espelho S₂. O comportamento corpuscular do fóton é evidenciado e os detectores 3 e 4 acusam a incidência de aproximadamente 25 por cento dos fótons emitidos pela fonte.

O regime quântico aqui descrito, embora reproduza padrões análogos aos vistos no regime clássico nos anteparos, exige uma explicação completamente diferente daquela do regime clássico, pois ao invés de um padrão de intensidade, o que se tem nos anteparos são densidades de

probabilidade de detecção. Ou seja, o regime clássico não deve ser encarado apenas como um caso particular do regime quântico, quando um imenso número de fótons atinge os anteparos quase instantaneamente, produzindo um padrão contínuo como os da figura 2.

Além disso, no regime quântico, há a possibilidade de proporcionar discussões apenas em torno dos detectores, sem uso dos anteparos, contornando a necessidade de explicar o padrão de anéis. O regime clássico pode ser explicado apenas com conceitos da óptica ondulatória (clássica, portanto), o que absolutamente não ocorre com o regime quântico, onde se deve fazer uso de interpretações epistemológicas, de axiomas e de postulados nada intuitivos da física quântica, como dualidade onda-partícula, interpretação probabilística e não localidade. Esses aspectos são tipicamente atribuídos a *objetos quânticos*, como os fótons.

Interpretações epistemológicas do regime quântico do IMZ virtual

No ensino de física quântica em nível médio, é adequado que se busquem abordagens que priorizem aspectos conceituais, na medida em que o formalismo matemático da física quântica está além dos conhecimentos exigidos nesse nível de escolarização. No entanto, a conceituação de objetos quânticos, tais como os fótons, só pode ser feita à luz de uma postura filosófica que, se não estiver explicitada, pode levar a visões ingênuas e acríticas, ou à idéia de que só é possível usar uma dada interpretação epistemológica. Portanto, qualquer tentativa de discussão dos conceitos envolvidos na física quântica traz à tona elementos de sua epistemologia, sem os quais toda sua conceituação não teria significado. Pode-se considerar que, em resumo, a ontologia da física quântica refere-se ao fato de que o objeto quântico pode ser concebido de maneira corpuscular, ondulatória ou dualista (onda e partícula) e a epistemologia na física quântica implica atitudes realistas (o mundo existe independente do sujeito que o percebe) ou positivistas (todo o conhecimento deriva dos sentidos) (Bastos Filho, 2003; Jammer, 1974; Ostermann e Prado, 2005; Pessoa Jr., 2003). Cada interpretação epistemológica da física quântica contém um elemento que escapa a uma descrição completa e detalhada do arranjo experimental envolvido e, por isso, diferentes interpretações podem coexistir (Ostermann e Prado, 2005). Todas elas concordam umas com as outras quando se referem à predição do resultado de um experimento e, portanto, não há meios - pelo menos imediatamente - de se diferenciá-las no laboratório. Entre as várias interpretações epistemológicas encontradas na literatura, podemos destacar (Ostermann e Prado, 2005): a interpretação ondulatório-realista, a interpretação dualista-realista, a interpretação da Complementaridade ou Escola de Copenhague, a interpretação dos muitos mundos.

Para detalhes sobre cada uma dessas interpretações, recomenda-se ao leitor os trabalhos de Pessoa Jr. (1997, 2003), de Ostermann e Prado (2005) e, mais recentemente, de Freitas e Freire Jr. (2008). É importante observar que ainda não existe consenso na comunidade científica a respeito de qual dessas interpretações seria a mais completa ou adequada. Para o caso do IMZ virtual em regime quântico, a interpretação de Copenhague parece ser a que é "finalmente eleita" pelos professores cursando mestrado profissional (Ostermann *et al.*, 2008).

Considerações finais

O impacto da física quântica, na sociedade moderna, foi bastante profundo. No entanto, quando os estudantes brasileiros de ensino médio entram em contato com o assunto, a abordagem adotada geralmente enfatiza a assim chamada “velha” física quântica, com destaques para o efeito fotoelétrico, o modelo de Bohr e o problema do espectro da radiação de um corpo negro, como resolvido por Planck. O que propomos é que a “nova” física quântica (que vai muito além da quantização de energia) deveria ser a essência de qualquer transposição didática para o ensino médio, pois aí estão, efetivamente, os novos e revolucionários conceitos e as aplicações tecnológicas mais recentes. Em particular, sustentamos que a dualidade onda-partícula deve ser o conceito central da introdução da física quântica no ensino médio. Esse conceito é um dos pilares da teoria, uma vez que está fortemente relacionado a conceitos revolucionários tais como superposição de estados e não-localidade. Do ponto de vista teórico-metodológico, estamos propondo que a “porta de entrada” para o mundo quântico deva ser a óptica ondulatória, na medida em que assumimos como pressuposto teórico básico, a concepção vygotskyana de que o novo conhecimento é construído, pelo estudante, a partir de seu conhecimento prévio e também da interação com parceiros mais capazes ou mais maduros. Como diz Freud (1933), “analogies prove nothing, that is quite true, but they can make one feel more at home”. O IMZ virtual é um *software* construído segundo esse referencial, pois, concebido como uma ferramenta cultural, a partir de seus resultados pode-se visualizar o regime quântico de um feixe luminoso, estabelecendo-se analogias com o paradigma ondulatório. A possibilidade de exploração dos dois regimes no mesmo *software* permite a construção do conceito de interferência quântica por parte do estudante. A partir daí, conceitos como dualidade onda-partícula e até mesmo não-localidade podem ser abordados mais facilmente. Os resultados obtidos com o *software* nos dois regimes, embora análogos para o mesmo arranjo experimental, demandam explicações de natureza completamente distinta. No caso quântico, sua explicação requer um rompimento com noções intuitivas, o que leva à necessidade de se investir em interpretações epistemológicas para se reconhecer a natureza do mundo microscópico. Por esse motivo, esse projeto também tem, como um de seus objetos de estudo, as várias interpretações filosóficas da física quântica. Estudos em andamento (Pereira, Cavalcanti *et al.*, 2009; Pereira, Ostermann *et al.*, 2009a, 2009b) dizem respeito ao estudo de concepções relativas à dualidade onda-partícula de professores em formação; estudo do discurso, na perspectiva bakhtiniana, utilizado por alunos e professores durante a exploração do IMZ virtual no contexto de sala de aula; à investigação de como essa ferramenta conforma a ação educativa à luz do referencial sócio-cultural; à produção de hiper mídias que tenham o IMZ como recurso central; e à análise de planejamentos de aula sobre fundamentos de física quântica, por parte de professores em formação (presencial e a distância).

Referências bibliográficas

- Aspect, A. (2006). One century of quantum revolutions. In: Valerio Scarani. *Quantum physics, a first encounter: interference, entanglement, and reality* (p. ix-xiv). Oxford: Oxford University Press. (Prefácio).
- Bachelard, G. (1984). *A filosofia do não*. Lisboa: Presença.
- Bastos Filho, J.B. (2003). Os problemas epistemológicos da realidade, da compreensibilidade e da causalidade na teoria quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 25, 2, 125-147.
- Brasil (2006). *Orientações curriculares para o ensino médio: Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias* (Vol. 2). Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica.
- Cabral, G.E.M., Lima, A.F.D. e Lula Jr., B. (2004). Interpretando o algoritmo de Deutsch no interferômetro de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 26, 2, 109-116.
- Degiorgio, V. (1980). Phase shift between the transmitted and the reflected optical fields of a semireflecting lossless mirror is $\pi/2$. *American Journal of Physics*, 48, 1, 81-82.
- Feynman, R.P., Leighton, R.B. e Sands, M. (1963). *The Feynman lecture on Physics* (Vol. 3). New York: Addison-Wesley.
- Freitas, F. e Freire Jr., O. (2008). A formulação dos 'estados relativos' da teoria quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30, 2, 1-15.
- Freud, S. (1933). *New introductory lectures on psycho-analysis*. London: Hogarth Press and the Institute of Psycho-analysis.
- Galvez, E.J., Holbrow, C.H., Pysher, M.J., Martin, J.W., Courtemanche, N., Heilig, L. e Spencer, J. (2005). Interference with correlated photons: five quantum mechanics experiments for undergraduates. *American Journal of Physics*, 73, 2, 127-140.
- Gil, D.P. e Solbes, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15, 3, 255-260.
- Grangier, P., Roger, G. e Aspect, A. (1986). Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences. *Europhysics Letters*, 1, 4, 173-179.
- Heisenberg, W. (1981). *Física e Filosofia*. Brasília: Editora da Universidade de Brasília.
- Holbrow, C.H., Galvez, E. e Parks, M.E. (2002). Photon quantum mechanics and beam splitters. *American Journal of Physics*, 70, 3, 260-265.
- Jammer, M. (1974). *The philosophy of quantum mechanics: the interpretations of quantum mechanics in historical perspective*. New York: Wiley.
- Laudan, L. (1986). *El progreso y sus problemas: hacia una teoría del crecimiento científico*. Madrid: Ediciones Encuentro.

Lemke, J.L. (2001). Articulating Communities: Sociocultural Perspectives on Science Education. *Journal of Research in Science Teaching.*, 38, 3, 296-316.

Müller, R. e Wiesner, H. (2002). Teaching Quantum Mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics*, 70, 3, 200-209.

Nussenzveig, H.M. (2003). *Curso de Física básica* (Vol. 4). São Paulo: Edgard Blücher.

Oliver, W.D., Yu, Y., Lee, J.C., Berggren, K.K., Levitov, L.S. e Orlando, T.P. (2005). Mach-Zehnder interferometry in a strongly driven superconducting qubit. *Science*, 310, 5754, 1653-1657.

Ostermann, F. e Ferreira, L.M. (2006). Preparing teachers to discuss superconductivity at high school level: a didactical approach. *Physics Education*, 41, 1, 34-41.

Ostermann, F., Prado, S. e Ricci, T.F. (2008). Investigando a aprendizagem de professores de física acerca do fenômeno da interferência quântica. *Ciência & Educação*, 14, 1, 35-54.

Ostermann, F. e Prado, S.D. (2005). Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27, 2, 193-203.

Ostermann, F., Prado, S.D. e Ricci, T.F. (2006). Desenvolvimento de um software para o ensino de fundamentos de Física Quântica. *A Física na Escola*, 7, 1, 22-25.

Ostermann, F. e Ricci, T.F. (2004). Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. *Ciência & Educação*, 10, 2, 235-257.

Ostermann, F. e Ricci, T.F. (2005). Conceitos de física quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 22, 1, 9-35.

Pereira, A., Cavalcanti, C. e Ostermann, F. (2009). Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de Física. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 8, 1, 72-92.

Pereira, A., Ostermann, F. e Cavalcanti, C. (2009a). O ensino de física quântica na perspectiva sociocultural: uma análise de um debate entre futuros professores mediado por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Electrónica de Enseñanza de Las Ciencias*, 8, 2, 376-398.

Pereira, A., Ostermann, F. e Cavalcanti, C. (2009b). On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. *Physics Education*, 44, 3, 281-291

Pessoa Jr., O. (1997). Interferometria, interpretação e intuição: uma Introdução conceitual à Física Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 19, 1, 27-48.

Pessoa Jr., O. (2002). Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7, 2, 107-126.

Pessoa Jr., O. (2003). *Conceitos de Física Quântica*. São Paulo: Livraria da Física.

Pessoa Jr., O. (2006). What is an essentially quantum mechanical effect? *Revista Eletrônica Informação e Cognição*, 3, 1, 1-13.

Porlán Ariza, R. e Rivero, A. (1998). *El conocimiento de los profesores: una propuesta formativa en el área de ciencias*. Sevilla: Díada Editora.

Ricci, T. F. e Ostermann, F. (2003). *Uma Introdução Conceitual à Mecânica Quântica para professores do ensino médio* (Vol. 14). Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS.

Ricci, T. F., Ostermann, F. e Prado, S. D. (2007). O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da Física Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29, 1, 81-90.

Sarkar, A., Bhattacharyya, T. K. e Patwardhan, A. (2006). Quantum logic processor: implementation with electronic Mach-Zehnder interferometer. *Applied Physics Letters*, 88, 21, 213113-213111 - 213113-213113.

Scarani, V. (2006). *Quantum physics, a first encounter: interference, entanglement, and reality*. Oxford: Oxford University Press.

Vygotski, L.S. (1984). *A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores*. São Paulo: Martins Fontes.

Vygotski, L.S. (1989). *Pensamento e linguagem*. São Paulo: Martins Fontes.

Wertsch, J.V. (1993). *Voces de la mente: un enfoque sociocultural para el estudio de la acción mediada*. Madrid: Visor distribuciones.