

Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de Física

Alexsandro Pereira de Pereira, Cláudio J. de H. Cavalcanti e
Fernanda Ostermann

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física. Porto Alegre. Brasil. E-mails: alexandro.pereira@ufrgs.br; claudio.cavalcanti@ufrgs.br; fernanda.ostermann@ufrgs.br

Resumo: Este trabalho apresenta os resultados de uma investigação sobre as concepções de futuros professores de física acerca da dualidade onda-partícula. Para tanto, foi necessário elaborar, validar e aplicar um instrumento constituído de 16 questões objetivas envolvendo o efeito fotoelétrico, o experimento de dupla-fenda e o interferômetro de Mach-Zehnder. Os resultados mostraram que a maioria dos estudantes tem dificuldades em reconhecer em quais situações os objetos quânticos (fótons e elétrons) apresentam um comportamento tipicamente corpuscular ou ondulatório.

Palavras-chave: Concepções alternativas, dualidade onda-partícula, futuros professores de física.

Title: Misconceptions about wave-particle duality: a research performed on a physics teacher preparation course.

Abstract: This paper presents the results of a research about pre-service teacher's conceptions of wave-particle duality. We have developed, validated and applied an instrument consisting of 16 objective questions about photoelectric effect, double-slit experiment and Mach-Zehnder interferometer. The results have shown that most students can't clearly identify in which experimental situations the quantum objects (photons and electrons) behave like a particle or like a wave.

Keywords: Misconceptions, wave-particle duality, pre-service physics teacher.

Introdução

Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados da aplicação de um teste de concepções relativas à dualidade-onda partícula em uma turma de 14 alunos da sétima etapa do curso de licenciatura em física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, realizada no segundo semestre de 2007. Para tanto, foi necessário elaborar e validar um instrumento constituído de 16 questões sobre o efeito fotoelétrico, o experimento de dupla fenda e o interferômetro de Mach-Zehnder.

Este estudo é parte de um projeto mais amplo de investigação sobre o ensino de física quântica (FQ) na formação inicial de professores. Essa

pesquisa foi desenvolvida através do Estágio Docente, realizado pelo primeiro autor desse trabalho, junto à disciplina Seminários sobre Tópicos Especiais em Física Geral III (Pereira *et al.*, 2008). A disciplina consiste de uma revisão conceitual dos principais tópicos de física moderna e contemporânea a partir da apresentação de seminários ministrados pelos próprios alunos. Após o levantamento inicial das idéias prévias dos alunos acerca do conceito de dualidade onda-partícula (tema do presente trabalho), realizou-se uma seqüência de oito seminários sobre alguns temas da óptica ondulatória (reflexão e refração, interferência, polarização e difração) e da física quântica introdutória (radiação térmica e a quantização da energia, efeito fotoelétrico e o efeito Compton, dualidade onda-partícula, princípio da incerteza, a equação de Schrödinger).

Inspirados nos trabalhos de Müller & Wiesner (2002) e baseados na abordagem conceitual da mecânica quântica proposta por Pessoa Jr. (2005), implementamos, após a seqüência inicial de seminários, uma atividade virtual centrada no uso de um *software* livre, tipo bancada virtual, que simula o interferômetro de Mach-Zehnder (Ostermann *et al.*, 2006). Apresentando uma releitura mais moderna do experimento de dupla fenda, o interferômetro de Mach-Zehnder tornou-se um dos experimentos mais cruciais para a compreensão dos fundamentos da física quântica ao provocar naturalmente reflexões sobre o problema conceitual do caminho percorrido pelo fóton (Scarani e Suarez, 1998). Seu uso em simulação virtual justifica-se plenamente pela falta de recursos nos laboratórios didáticos que possibilitem a preparação de estados monofotônicos (emissão de fótons únicos pela fonte), tecnologia alcançada somente a partir dos anos 80 em laboratórios avançados de física. Adotando a óptica ondulatória como “porta de entrada” para o mundo microscópico (Ostermann e Ricci, 2004), utilizamos a dualidade onda-partícula como o eixo central das discussões sobre os aspectos fundamentais da FQ em sala de aula.

O levantamento de dados consistiu-se basicamente de gravações de vídeo (duas aulas de 90 minutos por semana durante aproximadamente 10 semanas). A atividade de ensino centrada no uso do interferômetro virtual de Mach-Zehnder foi realizada no laboratório de informática do Instituto de Física da UFRGS e teve a duração aproximada de três horas, distribuídas em dois encontros. Os estudantes presentes nessa atividade de ensino (11 no total) dispuseram de cinco computadores equipados com o simulador virtual, um microfone e um gravador de som. Os diálogos estabelecidos por cada grupo foram registrados em áudio e posteriormente transcritos para análise.

Assumindo ao longo de toda a pesquisa a dualidade onda-partícula como sendo “o coração da física quântica” (Feynman *et al.*, 1963), consideramos necessária a construção de um instrumento que pudesse levantar algumas noções prévias dos estudantes acerca desse conceito. Esse instrumento, constituído de 16 questões conceituais e objetivas sobre situações que evidenciam o comportamento dual da matéria, foi validado através da aplicação em uma amostra de 80 estudantes de graduação e pós-graduação que cursaram pelo menos alguma disciplina introdutória de FQ. Os principais aspectos do instrumento e os resultados da sua aplicação no grupo de 14 licenciandos em física serão discutidos nas próximas seções.

Em uma revisão bibliográfica sobre o ensino de física moderna e contemporânea (FMC), realizada a partir da consulta às principais revistas internacionais de ensino de ciências no período de 2001 a 2006 (Pereira e Ostermann, 2008), foi possível identificar apenas seis trabalhos em que os autores fizeram um levantamento das concepções de estudantes e professores sobre temas de FQ. Uma síntese desses trabalhos é apresentada a seguir.

Olsen (2002) examinou como estudantes pré-universitários (18-19 anos de idade) da Noruega lidam com o conceito de dualidade onda-partícula. Os resultados de um teste (duas questões objetivas e uma questão aberta) aplicado a 236 estudantes recém formados em nível médio mostraram que, para a maioria dos indivíduos da amostra, elétrons são partículas enquanto que a luz apresenta natureza dual. As concepções mais frequentes, segundo esse estudo, foram: (a) elétrons são partículas (27,9%); (b) elétrons são partículas, mas possuem algumas propriedades ondulatórias (22,0%); (c) luz são partículas que se movem em ondas (8,1%); (d) luz são ondas (6,7%); (e) elétrons são partículas que se movem em ondas (6,4%). Segundo o autor, 59,2% dos estudantes formularam uma dualidade muito vaga para luz.

Greca e Herscovitz (2002) analisaram as concepções de 69 alunos de uma turma de graduação durante a resolução de três problemas abertos envolvendo alguns conceitos fundamentais da teoria quântica (princípio da incerteza, densidade de probabilidade e superposição linear de estados). Apesar de 17 estudantes mostrarem evidência da construção de modelos adequados para abordagem de problemas de FQ, a maioria baseou-se nos modelos clássicos ou "híbridos" para descrever o comportamento quântico dos sistemas microscópicos.

Montenegro e Pessoa Jr. (2002) investigaram as interpretações epistemológicas que alunos de FQ desenvolveram sobre a teoria. O instrumento utilizado pelos autores foi aplicado em cinco turmas de graduação e em três turmas de pós-graduação e constitui-se de questões abertas e fechadas sobre: (a) o experimento de dupla fenda; (b) princípio da incerteza; (c) estado quântico; (d) retrodição; (e) postulado da projeção. Os resultados mostraram, entre outros aspectos, que as interpretações adotadas pelos alunos acerca da teoria quântica mudam conforme a situação-problema apresentada.

Greca e Freire Jr. (2003) levantaram as concepções de 69 estudantes de física e engenharia (grupo experimental) acerca da natureza dos objetos quânticos. A coleta de dados foi realizada através da aplicação de três problemas abertos e um teste de associação conceitual envolvendo os seguintes conceitos: estado de um sistema físico; observável; efeito túnel; superposição linear de estados; distribuição de probabilidades; autovalor; trajetória de uma partícula quântica; elétron; efeito fotoelétrico; função de onda; resultados de medida; dualismo onda-partícula; observáveis simultâneos; valor esperado; princípio da incerteza. Segundo os autores, os resultados mostraram que: (a) 25% dos estudantes incorporaram os principais conceitos introduzidos para descrever o mundo microscópico; (b) 40% dos estudantes incorporaram alguns dos conceitos mais importantes – princípio da incerteza (dualidade) e probabilidades; (c) 18% dos estudantes

utilizaram um modelo clássico para visualizar os fenômenos quânticos; (d) para 17% foi impossível identificar qualquer padrão de resposta.

Num trabalho realizado no Brasil com um grupo de alunos de um curso de mestrado profissionalizante, Ostermann e Ricci (2004) levantaram concepções de professores de física acerca da natureza dos objetos quânticos a partir de um questionário contendo seis questões abertas, um teste objetivo contendo 11 questões e uma escala Likert. Segundo os autores, para a maioria dos professores da amostra (dezoito no total): falta clareza sobre os limites de validade da FQ e da física clássica; massa é uma propriedade exclusiva da física clássica; as leis de conservação de massa e momentum só se aplicam aos objetos clássicos; os objetos quânticos são necessariamente relativísticos; os objetos quânticos possuem necessariamente propriedades físicas discretas; a impossibilidade de se observar diretamente os objetos quânticos está associada à sua natureza probabilística; os fótons só existem nas transições atômicas.

Ke *et al.* (2005) investigaram a evolução das concepções de estudantes sobre a estrutura atômica. Através de um questionário do tipo papel e lápis e de entrevistas envolvendo temas de FQ, os autores compararam as concepções de estudantes de diferentes níveis de instrução (graduandos, mestrandos e doutorandos) com os três estágios do desenvolvimento histórico da FQ (velha FQ, transição para mecânica ondulatória e mecânica ondulatória probabilística). Os resultados mostraram que uma porção substancial dos entrevistados (17 dos 28 estudantes) encaixa-se em mais de uma categoria.

Os resultados da revisão da literatura mostraram que, apesar de haver cerca de dezesseis trabalhos que levantam concepções de professores e estudantes acerca de algum tema de FMC, nenhum desses estudos se ocupou com noções prévias acerca do comportamento de fótons e elétrons em experimentos cruciais tais como o efeito fotoelétrico, o experimento de dupla fenda e o interferômetro de Mach-Zehnder, com exceção do trabalho de Montenegro e Pessoa Jr. (2002) que utilizou o experimento de dupla fenda para analisar as interpretações privadas dos alunos. Outro resultado importante é o fato de que apenas quatro dos trabalhos consultados envolveram professores em formação inicial ou continuada (Kalkanis *et al.*, 2003; Ostermann e Moreira, 2004; Ostermann e Ricci, 2004; Ostermann e Ricci, 2005). Esse resultado aponta para a escassez de estudos relativos ao ensino de FQ na formação de professores, processo de fundamental importância para a construção de estratégias capazes de promover mudanças significativas na educação básica. Possíveis transposições didáticas dos fundamentos da FQ para o ensino médio dependem fortemente de uma sólida formação conceitual por parte dos professores de física.

Partindo de uma investigação na formação inicial de professores, buscamos, através do presente trabalho, colocar disponível na literatura um instrumento que levante concepções sobre a dualidade onda-partícula a partir de situações envolvendo experimentos mais modernos, tal como o interferômetro de Mach-Zehnder, e temas avançados de FQ como o uso de detectores de "não-demolição" e o experimento da escolha demorada.

Esperamos, dessa maneira, contribuir para o debate sobre a inserção de fundamentos de FQ no ensino médio e na formação de professores.

Fundamentação teórica

Este trabalho fundamenta-se em alguns aspectos do construtivismo de L. S. Vygotsky (1896-1934). Para Vygotsky a formação de conceitos, por parte dos sujeitos, é o resultado de uma atividade complexa, em que todas as funções intelectuais básicas tomam parte (Vygotsky, 1998). Segundo ele, esse processo não pode ser simplesmente reduzido à associação, à atenção, à formação de imagens, às inferências ou às tendências determinantes. Todas são indispensáveis, porém insuficientes sem o uso do signo, ou palavra, como o meio pelo qual conduzimos as nossas operações mentais, controlamos o seu curso e as canalizamos em direção à solução do problema enfrentado (Vygotsky, 1998).

Vygotsky define signo como sendo estímulos artificiais ou autogerados que atuam como um instrumento da atividade psicológica (Vygotsky, 1994). A simples operação de dar um nó num laço ou marcar um pedaço de madeira no intuito de lembrar-se de alguma coisa modifica a estrutura psicológica do processo de memória. Ela estende a operação de memória para além das dimensões biológicas do sistema nervoso humano. Uma das características mais importantes da teoria de Vygotsky é a crença de que a ação humana é mediada por instrumentos e signos (Wertsch, 1993). O desenvolvimento dessa capacidade de usar a linguagem (signo) como um instrumento para a solução de problemas ocorre no instante em que o discurso social é internalizado. A partir desse momento, a linguagem, de uso interpessoal, passa a adquirir também uma função intrapessoal.

Um dos aspectos da teoria de Vygotsky mais utilizados na pedagogia é o conceito de *zona de desenvolvimento proximal* (Vygotsky, 1994). Segundo Vygotsky, existem dois níveis de desenvolvimento cognitivo no ser humano: desenvolvimento real, isto é, o nível em que o sujeito consegue resolver problemas por si mesmo, e o nível de desenvolvimento potencial, ou seja, o nível em que o sujeito só consegue resolver problemas em colaboração com um parceiro mais capaz. A zona de desenvolvimento proximal define a distância entre estes dois níveis de desenvolvimento.

Uma das implicações educacionais mais importantes da teoria de Vygotsky é a noção de que o bom ensino é aquele que ocorre na zona de desenvolvimento proximal do aluno. Para Vygotsky, é no processo de aprendizagem que o sujeito se desenvolve. Tendo isso em vista, consideramos extremamente importante um levantamento inicial das noções prévias dos estudantes acerca do conceito de dualidade onda-partícula. Desta maneira, podemos levar em conta o conhecimento prévio dos estudantes na elaboração de atividades que estejam dentro da zona de desenvolvimento proximal de cada aluno. Além disso, esses resultados nos serviram de parâmetros para avaliar em que medida o conceito de dualidade onda-partícula formulados pelos estudantes evoluem durante os seminários e ao longo da atividade centrada na exploração do interferômetro virtual de Mach-Zehnder.

Dualidade onda-partícula

Segundo Richard Feynman, a dualidade onda-partícula é um fenômeno absolutamente impossível de se explicar classicamente, e contém em si o coração da FQ (Feynman *et al.* 1963). Certamente, há outros aspectos da FQ que a torna radicalmente diferente da física clássica como, por exemplo, o princípio da incerteza de Heisenberg que afirma que a posição e o momentum de uma partícula não podem ser simultaneamente determinados com precisão superior a $\hbar/2$. Um dos grandes mistérios da FQ é a *não-localidade*, explicitada pela desigualdade de Bell. Entretanto, assim como Richard Feynman, adotaremos a dualidade onda-partícula como ponto de partida para o ensino de FQ.

Segundo Pessoa Jr. (2005), as partículas clássicas podem ser pensadas como sendo pequenas esferas que se movem no espaço. Para cada instante de tempo, essas pequenas esferas ocupam uma posição precisa no espaço e possuem uma velocidade instantânea bem determinada, descrevendo uma trajetória bem definida. As ondas clássicas, por outro lado, são perturbações que se propagam em um meio, como as ondas planas na superfície de um lago. Longe de serem bem localizadas ou descreverem trajetórias bem definidas, as ondas são espalhadas no espaço e podem exibir alguns comportamentos tipicamente ondulatórios como o fenômeno de interferência. Assumir que um objeto é ao mesmo tempo onda e partícula é uma contradição lógica, pois isto implicaria afirmar que algo é bem localizado no espaço e espalhado ao mesmo tempo e que segue uma trajetória bem definida no espaço e não segue (Pessoa Jr., 2005). A teoria quântica precisa conciliar comportamento de onda e partícula sem sustentar essa contradição.

Se acompanhássemos a formação do padrão de interferência numa tela fosforescente, no experimento de dupla fenda, observaríamos, para um feixe de baixa intensidade, pontos aparecendo um após o outro. É importante ressaltar que a formação desse padrão de interferência, ponto a ponto, ocorre mesmo quando a fonte emite um único fóton de cada vez (regime monofotônico). Uma primeira versão para a dualidade onda-partícula pode ser enunciada da seguinte forma:

“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” (Pessoa Jr. 2005, p. 3).

É importante notar que esse enunciado não afirma que os fótons ou os elétrons são sempre pontuais ou bem localizados; apenas afirma que, quando detectados, eles aparecem de maneira pontual. O enunciado também não afirma que fótons e elétrons sempre se comportam como ondas, mas sim que eles sempre podem exibir interferência.

Segundo Pessoa Jr. (2005), muitos dos mistérios quânticos tais como o princípio da incerteza e efeito túnel são fenômenos que, em nível macroscópico, são descritos pela óptica ondulatória e passam a ser caracterizados como fenômenos quânticos quando reduzimos a intensidade dos feixes de onda. Tendo isso em vista, podemos definir:

"... o regime quântico é a Física das Ondas para baixas intensidades, quando propriedades corpusculares passam a aparecer" (Pessoa Jr. 2005, p. 6).

Para compreendermos o comportamento da luz em regime quântico, é necessário considerar que a energia de um fóton é dada pela equação $E = h\nu$ e que o momento associado ao fóton é dado por $p = h/\lambda$, onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da luz e λ é o comprimento de onda. Na física clássica, a intensidade I de uma onda (energia por unidade de tempo e de área) é proporcional ao módulo quadrado de sua amplitude ψ . Em regime quântico, a intensidade corresponde ao número de quanta detectados de maneira que, se prepararmos apenas um único quantum (fóton, no caso do campo eletromagnético, ou elétron, no caso de um campo de elétrons), a probabilidade de detectá-lo em certa região será proporcional ao quadrado da amplitude da onda associada àquela região, ou seja,

$$\text{Prob.} \propto |\psi|^2.$$

Esta regra representa o postulado de Max Born proposto em 1926.

Metodologia

No intuito de estabelecer uma atividade que estivesse dentro da zona de desenvolvimento proximal dos estudantes, consideramos necessária a elaboração de um teste capaz de evidenciar o conhecimento prévio dos alunos acerca da dualidade onda-partícula. É importante salientar que essa etapa de levantamentos de concepções é apenas uma fase inicial de um estudo muito mais amplo sobre o uso do interferômetro virtual de Mach-Zehnder no ensino de FQ (Pereira, 2008). Apesar desse trabalho apresentar os resultados da aplicação de um teste de concepções, a nossa investigação tem um enfoque qualitativo e as análises discutidas na próxima seção têm um viés subjetivo-interpretativo. Os resultados são apresentados como um estudo de caso, podendo ser comparado com outros resultados da literatura para avaliar sua representatividade.

O instrumento utilizado consiste de 16 questões conceituais e objetivas acerca do comportamento dual da matéria, evidenciado em alguns experimentos cruciais tais como o efeito fotoelétrico, o experimento de dupla fenda e o interferômetro de Mach-Zehnder. A estrutura do instrumento foi baseada no teste de concepções alternativas relativas à força e movimento elaborado por Silveira *et al.* (1992) e o conteúdo das questões foi inspirado nos trabalhos de Pessoa Jr. (2005) e Montenegro e Pessoa Jr. (2002).

Após submeter o instrumento à avaliação de especialistas em física quântica do Instituto de Física da UFRGS, este foi aplicado em uma amostra de 80 estudantes de graduação e pós-graduação. O critério de seleção dos sujeitos da amostra consistiu na escolha de estudantes que tivessem cursado ao menos alguma disciplina introdutória de FQ.

A verificação da consistência interna do instrumento foi estimada através do cálculo do coeficiente alfa de Cronbach, cujo valor obtido foi de 0,77. Esse valor para o coeficiente de fidedignidade é tolerável, uma vez que o propósito de se aplicar o instrumento consiste em comparar sujeitos em médias, e não o de discriminar acuradamente entre diferentes sujeitos, como ocorre nos processos de seleção de concursos vestibulares (Silveira, 1993). O instrumento é apresentado no Apêndice.

As primeiras quatro questões procuram investigar os conhecimentos dos licenciandos acerca do efeito fotoelétrico e de como variações na frequência e na intensidade do feixe de radiação incidente pode influenciar no resultado do experimento. As questões 05 e 06 avaliam os conhecimentos dos estudantes acerca da função trabalho. As questões de 07 a 09 e 11 testam as noções que os estudantes têm acerca do fenômeno de interferência no experimento de dupla fenda em ambos os regimes – clássico (superposição de ondas) e quântico (superposição de estados). A questão 10 aborda especificadamente a noção de medida de trajetória. As questões 12, 14 e 15 investigam o fenômeno de interferência quântica (superposição de estados) no interferômetro de Mach-Zehnder. As questões 13 e 16 abordam, respectivamente, a noção de medida de trajetória e o experimento da escolha demorada.

Este teste foi aplicado em uma turma de 14 alunos da sétima etapa do curso de licenciatura em física da UFRGS, junto à disciplina Seminários de Tópicos Especiais em Física Geral III, no segundo semestre de 2007. A amostra é constituída de estudantes que já haviam cursado duas disciplinas sobre física quântica: Física do século XX – A (quantização da energia; fótons e o efeito fotoelétrico; ondas de matéria: dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza; modelos atômicos; mecânica ondulatória de Schrödinger) e Física do século XX – B (átomo de um elétron; spin, taxas de transição e regras de seleção; átomos multieletrônicos; moléculas; sólidos; modelos nucleares e partículas elementares). Os resultados da aplicação do teste são apresentados na próxima seção.

Resultados da aplicação do instrumento

A análise do resultado da aplicação do teste de concepções relativas ao conceito de dualidade onda-partícula foi realizada em três etapas: análise das respostas às questões sobre o efeito fotoelétrico; análise das respostas às questões referentes ao experimento de dupla fenda; análise das respostas às questões referentes ao interferômetro de Mach-Zehnder. A tabela 1 apresenta a distribuição das respostas dos estudantes ao longo das 16 questões. Os valores em destaque representam a alternativa correta. A média de acertos do grupo foi de 8,21, representando um percentual de 51% e o desvio padrão foi de 2,19.

Efeito fotoelétrico

As questões sobre o efeito fotoelétrico podem ser classificadas em três categorias: a) influência da intensidade da radiação incidente sobre a emissão de elétrons (questões 01 e 02); b) influência da frequência da radiação incidente sobre a emissão de elétrons (questões 03 e 04); e c)

influência da função trabalho do metal sobre a emissão de elétrons (questões 05 e 06).

Questões	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
01	11*	2	1	0	0
02	2	0	7*	4	1
03	5*	0	7	0	1
04	2	10*	2	0	0
05	1	0	3	1	9*
06	3	9*	1	1	0
07	0	3	1	10*	0
08	1	2	3	8*	0
09	3	6*	2	3	0
10	0	3	2*	7	2
11	1	4	3	5*	1
12	9*	3	2	0	0
13	5	3	4*	1	1
14	2	1	10*	0	1
15	4*	1	1	8	0
16	5	1	1	6*	1

Tabela 1.- Distribuição das respostas dos estudantes em cada item do teste.

As respostas referentes à categoria (a) mostram que a grande maioria dos estudantes (78,6%) desvincula corretamente a intensidade da radiação incidente com a energia dos elétrons emitidos pelo metal. No entanto, apenas 50% dos estudantes atribuíram uma redução instantânea do número de elétrons quando ocorre a redução da intensidade da radiação incidente. Aproximadamente 30% dos licenciandos parecem acreditar que essa redução do número de elétrons emitidos deve ocorrer de forma gradual.

Na categoria (b), apenas 35,7% dos estudantes desvincularam corretamente o número de elétrons emitidos pelo metal com a frequência da radiação incidente contra um percentual de 50% que parecem acreditar que uma redução na frequência da radiação incidente pode ocasionar uma redução do número de elétrons emitidos. Na questão 04, 71,4% indicaram corretamente que a energia dos elétrons emitidos pelo metal aumenta com o respectivo aumento da frequência da radiação incidente.

As respostas às questões pertencentes à categoria (c) mostram que 64,3% dos estudantes parecem compreender corretamente o papel da função trabalho do metal em ambas as situações apresentadas.

Experimento da dupla fenda

As questões referentes ao experimento de dupla fenda podem ser classificadas em três categorias: a) interferência clássica (questões 07); b) interferência quântica (questões 08, 09 e 11); e c) a noção de medida de trajetória (questões 10). Em relação à categoria (a), 71,4% dos estudantes

parecem compreender o fenômeno de interferência clássica na óptica ondulatória.

Na categoria (b), por outro lado, apenas 57,1% dos estudantes reconheceram o padrão de interferência para a emissão de fótons únicos, enquanto que 21,4% escolheram o padrão previsto para partículas clássicas. Aproximadamente 43% dos licenciandos reconheceram a existência de locais proibidos para a emissão de um único fóton (regiões que correspondem a locais de interferência destrutiva da função de onda associada). Especificadamente sobre esta questão (questão 09), 21,4% dos alunos escolheram a figura que permite a detecção de um fóton único em qualquer região do anteparo (sem restrições), 14,3% escolheram o padrão previsto para partículas clássicas (à frente de F_1 ou à frente de F_2) e 21,4% parecem acreditar que um único fóton se divide em duas metades, atingindo o anteparo à frente de F_1 e a frente de F_2 , simultaneamente. Com relação à questão 11, apenas 35,7% dos alunos reconheceram o padrão de interferência para elétrons. Esse resultado parece corroborar os achados de Olsen (2002) apresentados em nossa revisão bibliográfica. Além disso, 28% dos estudantes parecem acreditar que os elétrons, diferentes dos fótons, se distribuem em torno da região central do anteparo, enquanto que 21,4% escolheram o padrão previsto para partículas clássicas.

Com relação à questão 10 (categoria c), somente 14,3% compreenderam a questão da medida de trajetória. A metade dos estudantes da amostra escolheu um padrão de interferência para os fótons, apesar da presença de um detector de “não-demolição” em F_1 . O restante da amostra se dividiu entre uma distribuição em torno da região central do anteparo (21,4%) e uma distribuição em torno da região do anteparo que se encontra à frente de F_2 .

Interferômetro de Mach-Zehnder

As questões referentes ao interferômetro de Mach-Zehnder podem ser classificadas também em três categorias: a) interferência quântica (questões 12, 14 e 15); b) a noção de medida de trajetória (questão 13); e c) o experimento de escolha demorada (questões 16).

Em relação à primeira categoria (categoria a), a maioria dos estudantes da amostra (64,3%) parece compreender o fenômeno de interferência quântica no interferômetro de Mach-Zehnder em regime monofotônico. No entanto, as respostas referentes à questão 15 (emissão de um único fóton) mostram que apenas 28,6% reconheceram a existência de locais proibidos para o fóton (D_2), enquanto que a maioria (57,1%) escolheu a situação prevista para uma partícula clássica (50% de chance de atingir qualquer um dos detectores).

Na categoria (b), apenas 28,6% reconheceram o problema da medida de trajetória imposto pela presença de D_0 (detector de “não-demolição”). A maioria dos estudantes da amostra (aproximadamente 57%) se dividiu entre a totalidade de fótons coletados em D_1 e a grande maioria dos fótons detectados em D_1 .

Na categoria referente ao experimento da escolha demorada (categoria c), 43% dos estudantes assinalaram corretamente a alternativa que

evidencia o comportamento corpuscular do fóton. Aproximadamente 35,7% dos estudantes optaram pelo padrão de interferência quântica, que corresponde à totalidade dos fótons detectados em D_1 . Um dos estudantes parece acreditar que a “metade do fóton” seria detectada em ambos os detectores

Discussão dos resultados

Os resultados da aplicação do teste mostraram que na maioria das questões, a alternativa correta foi a mais assinalada pelos estudantes, com exceção das questões 03, 10, 13 e 15 (ver tabela 1, na seção anterior). Não consideramos, no entanto, que esse seja um resultado satisfatório para um grupo de futuros professores. Acreditamos que as questões referentes ao efeito fotoelétrico deveriam ser mais familiares aos estudantes, pois o tema, além de ser abordado em Física do Século XX – A (disciplina obrigatória do curso de licenciatura em Física da UFRGS), é tradicionalmente exigido nas provas de física em concursos vestibulares no Brasil.

Com relação à questão 11, os resultados do teste mostraram que para a maioria dos estudantes, os elétrons e os fótons se comportam de maneira diferente no experimento de dupla fenda. Este resultado vai ao encontro dos resultados obtidos por Olsen (2002) que afirma que, para maioria dos estudantes, os elétrons são partículas enquanto os fótons apresentam uma natureza dual. Com relação às questões 10 e 13, a maior parte dos estudantes mostrou ter extrema dificuldade em avaliar o comportamento do fóton na presença de um detector de “não-demolição”. Esse resultado mostra a existência de uma lacuna conceitual com relação aos processos de medição em FQ.

De um modo geral, a análise das respostas dos estudantes mostrou que, apesar de todos terem demonstrado conhecimento acerca do comportamento dual dos fótons, muitos deles não conseguem reconhecer com clareza quais são as situações em que o fenômeno é essencialmente corpuscular ou tipicamente ondulatório. Esse resultado pode complementar os resultados encontrados em outros estudos disponíveis na literatura (Greca e Herscovitz, 2002; Ke *et al.*, 2003; Olsen, 2002; Osterman e Ricci, 2004). Acreditamos que essa falta de clareza, por parte dos estudantes, seja o reflexo da abordagem semiclassical utilizada nas disciplinas introdutórias de FQ, cujo enfoque é demasiadamente centrado nos aspectos históricos da teoria.

A partir desses resultados, desenvolvemos um roteiro exploratório para ser utilizado em uma atividade centrada no uso de um simulador virtual do interferômetro de Mach-Zehnder (Pereira *et al.*, 2008). Esta atividade poderá mostrar aos estudantes em quais situações o fóton se comporta como onda e em quais ele se comporta como partícula.

Considerações finais

Nesse trabalho, procuramos apresentar as concepções prévias de futuros professores acerca da dualidade onda-partícula. Para tanto, foi necessário elaborar, validar e aplicar um instrumento constituído de 16 questões conceituais e objetivas envolvendo experimentos que evidenciam o

comportamento dual da matéria. A partir de uma revisão na literatura sobre o ensino de FMC, apresentamos uma síntese dos trabalhos que levantam concepções de alunos e professores acerca de algum tema de FQ.

A elaboração de um novo teste de concepções alternativas sobre a dualidade onda-partícula se mostrou necessária na medida em que não foi possível encontrar na literatura nenhum instrumento que abordasse o referido tema no contexto dos experimentos descritos na seção anterior. Cabe destacar nossa preocupação com temas extremamente atuais em FQ, tais como a noção de medida de trajetória e o uso de detectores de “não-demolição”, o experimento da escolha demorada e o fenômeno da interferência quântica no interferômetro de Mach-Zehnder. Nesse sentido, nosso instrumento traz contribuições para as pesquisas em ensino de FQ.

É importante salientar que a dualidade onda-partícula é considerada por alguns autores como sendo a essência da física quântica (Feynman, 1963; Pessoa Jr, 2005). Partindo de uma abordagem mais conceitual, a dualidade pode servir como ponto de partida para o ensino de FQ mediante o uso do interferômetro de Mach-Zehnder na discussão do fenômeno de interferência para um único fóton (Adams 1998, Pessoa Jr. 1997, Scarani e Suarez 1998). A dualidade onda-partícula permite o uso da óptica ondulatória como “porta de entrada” para o mundo microscópico (Ostermann e Ricci, 2004), definindo o regime quântico como sendo o regime de baixas intensidades, quando propriedades corpusculares passam a aparecer (Pessoa Jr., 2005).

Esperamos, através deste trabalho, contribuir também para o debate sobre “física moderna e contemporânea no ensino médio”, chamando a atenção para a importância de se investigar, cada vez mais, o ensino de FQ na formação inicial de professores. Somente a partir de uma sólida formação conceitual dos professores de física poderemos implementar com êxito possíveis transposições didáticas de fundamentos de FQ no ensino médio.

Referências bibliográficas

- Adams, S. (1998). Quantum bombing reality. *Physics Education*, 33, 378-85.
- Feynman, R.P.; Leighton, R.B. e Sands, M. (1963) *The Feynman lecture on Physics*. New York: Addison-Wesley, v.3.
- Greca, I.M. e Freire Jr., O. (2003). Does an emphasis on the concept of quantum state enhance student's understanding of Quantum Mechanics? *Science & Education*, 5-6, 541-557.
- Greca, I.M. e Herscovitz, V.E. (2002). Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las Ciencias*, 2, 327-338.
- Kalkanis, G.; Hadzidaki, P. e Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concept. *Science Education*, 2, 257-279.

Ke, J; Monk, M. e Duschl, R. (2005). Learning Introductory Quantum Physics: Sensori-motor experiences and mental models. *International Journal of Science Education*, 13, 1571-1594.

Montenegro, R.L. e Pessoa Jr., O. (2002). Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 2, 107-126.

Müller, R. e Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of physics*, 3, 200-209.

Olsen, R.V. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education*, 6, 565-574.

Ostermann, F. e Moreira, M.A. (2004). Updating the physics curriculum in high schools: a teaching unit about superconductivity. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 2, 1-13.

Ostermann, F.; Prado, S.D. e Ricci, T.S.F. (2006). Desenvolvimento de um Software para o Ensino de Fundamentos de Física Quântica. *A Física na Escola*, 1, 22-25.

Ostermann, F. e Ricci, T.S.F. (2004). Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. *Ciência & Educação*, 2, 235-258.

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

Pereira, A.P. (2008). *Fundamentos de física quântica na formação de professores: uma análise de interações discursivas em atividades centradas no uso de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Pereira, A.P. e Ostermann, F. (2008). Investigações sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma análise da produção acadêmica recente. Artigo submetido.

Pereira, A.P.; Ostermann, F. e Cavalcanti, C.J.H. (2008) Investigando o ensino de física quântica na perspectiva sociocultural: uma análise de um debate entre futuros professores mediado por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder, 8, 366-388.

Pessoa Jr, O. (2005). *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, v. 1.

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

Scarani, V. e Suarez, A. (1998). Introducing quantum mechanics: One-particle interferences. *American Journal of Physics*, 66, 718-21.

Silveira, F.L. (1993). Validação de testes de lápis e papel. En Moreira, M.A. e Silveira, F.L. (Eds.). *Instrumentos de pesquisa em ensino e aprendizagem* (pp. 1-35). Porto Alegre: EDIPUCRS.

Silveira, F.L.; Moreira, M.A. e Axt, R. (1992). Estrutura interna de testes de conhecimento em Física: um exemplo em Mecânica. *Enseñanza de las Ciencias*, 2, 187-194.

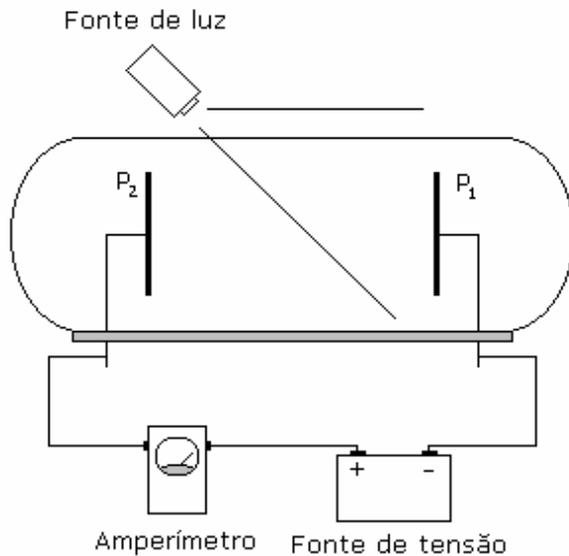
Vygotsky, L.S. (1994). *A formação social da mente*. São Paulo: Martins Fontes.

Vygotsky, L.S. (1998). *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.

Apêndice (Teste de concepções relativas à dualidade onda-partícula)

INSTRUÇÃO: As questões 01 a 06 referem-se ao enunciado abaixo.



A figura abaixo representa uma montagem experimental onde um feixe monocromático de radiação ultravioleta, emitido por uma fonte, atinge uma placa metálica, P₁, contida no interior de uma ampola de vácuo e ligada externamente ao pólo negativo de uma fonte de tensão. Na presença do feixe ultravioleta, P₁ emite elétrons que são coletados por outra placa, P₂, contida no interior da mesma ampola e ligada ao pólo positivo da mesma fonte de tensão.

O amperímetro conectado no circuito registra a corrente elétrica correspondente ao número de elétrons transferidos de P₁ para P₂, através do vácuo da ampola. A fonte de tensão é variável e pode ter sua polaridade invertida para frear os elétrons, e medir a sua energia.

01. Suponha que a intensidade do feixe de radiação ultravioleta seja aumentada. Pode-se afirmar que a energia dos elétrons emitidos de P₁

- (A) permanecerá inalterada.
- (B) aumentará imediatamente.
- (C) permanecerá inicialmente inalterado e, em seguida, aumentará gradualmente.
- (D) diminuirá imediatamente.
- (E) irá imediatamente a zero.

02. Suponha que a intensidade do feixe de radiação ultravioleta seja reduzida. Pode-se afirmar que o número de elétrons emitidos de P₁

- (A) permanecerá inalterado.
- (B) aumentará imediatamente.
- (C) diminuirá imediatamente.
- (D) permanecerá inicialmente inalterado e, em seguida diminuirá gradualmente.
- (E) irá imediatamente a zero.

03. Suponha que a frequência do feixe de radiação ultravioleta seja levemente reduzida. Nesse caso o número de elétrons emitidos de P_1 pode

- (A) permanecer inalterado.
- (B) aumentar gradualmente.
- (C) diminuir gradualmente.
- (D) permanecer inicialmente inalterado e, em seguida, diminuir gradualmente.
- (E) permanecer inicialmente inalterado e, em seguida, aumentar gradualmente.

04. Suponha que a frequência do feixe de radiação ultravioleta seja levemente aumentada. Pode se afirmar que a energia dos elétrons emitidos de P_1

- (A) permanecerá inalterada.
- (B) aumentará imediatamente.
- (C) permanecerá inicialmente inalterado e, em seguida, aumentará gradualmente.
- (D) diminuirá imediatamente.
- (E) permanecerá inicialmente inalterado e, em seguida, diminuirá gradualmente.

05. Suponha que a frequência do feixe de radiação ultravioleta seja bruscamente reduzida até atingir a faixa do espectro visível correspondente à luz vermelha. Nesse caso, o número de elétrons emitidos de P_1 pode

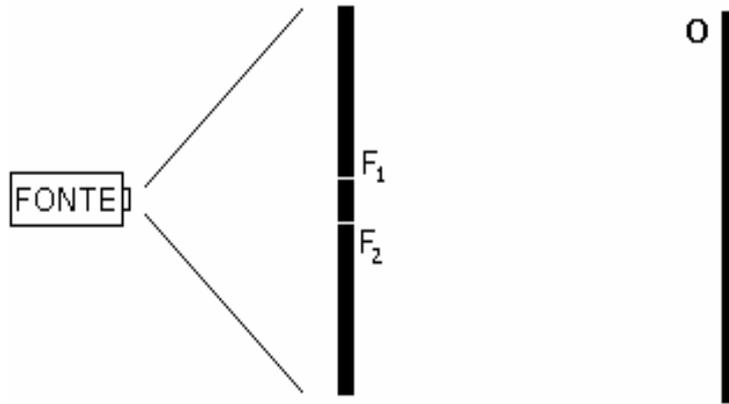
- (A) diminuir gradualmente.
- (B) aumentará gradualmente.
- (C) permanecer inicialmente inalterado e, em seguida, aumentar gradualmente.
- (D) permanecer inicialmente inalterado e, em seguida, diminuir gradualmente.
- (E) zerar imediatamente.

06. Se a intensidade do feixe de radiação ultravioleta emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico). Pode-se afirmar que P_1 emitiria

- (A) um único elétron de cada vez, com energia cinética igual à energia do fóton.
- (B) um único elétron de cada vez, com energia cinética menor que a energia do fóton.
- (C) um único elétron de cada vez, com energia cinética maior que a energia do fóton.
- (D) mais de um elétron simultaneamente, cada um com energia cinética igual a uma fração da energia do fóton.
- (E) mais de um elétron simultaneamente, cada um com energia cinética igual a um múltiplo inteiro da energia do fóton.

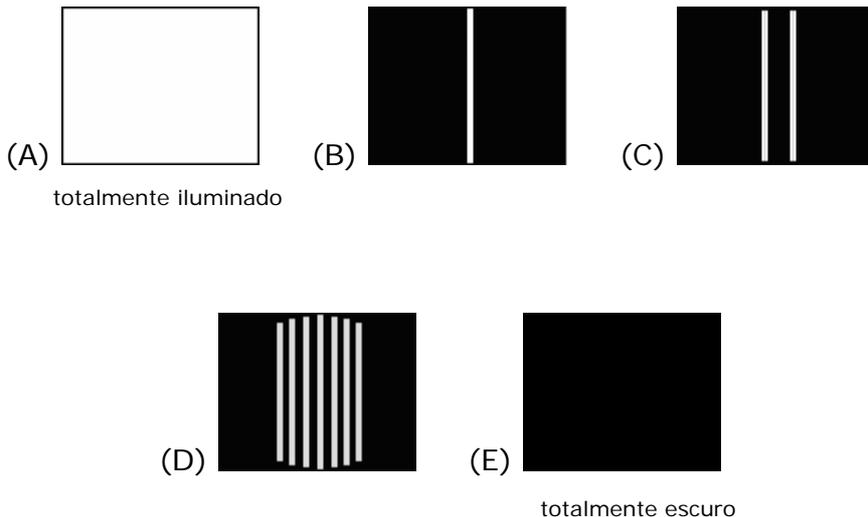
INSTRUÇÃO: As questões 07 a 11 referem-se ao enunciado abaixo.

A figura abaixo representa uma montagem experimental, vista de cima, de um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa. O feixe luminoso passa por duas fendas estreitas e paralelas, F1 e F2, antes de ser projetado num anteparo O, constituído de uma tela fosforescente.

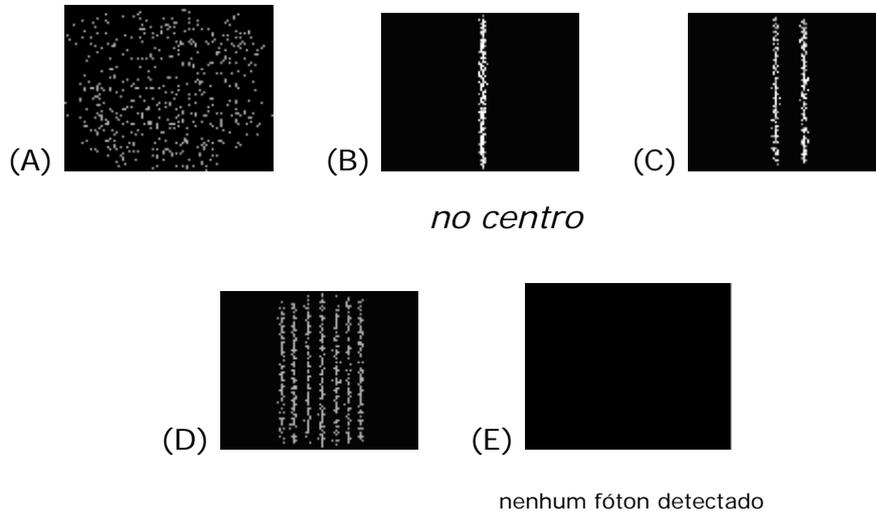


Considere que a espessura das fendas, assim como a separação entre as mesmas, são da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz incidente e muito menor que a distância entre as fendas e o anteparo.

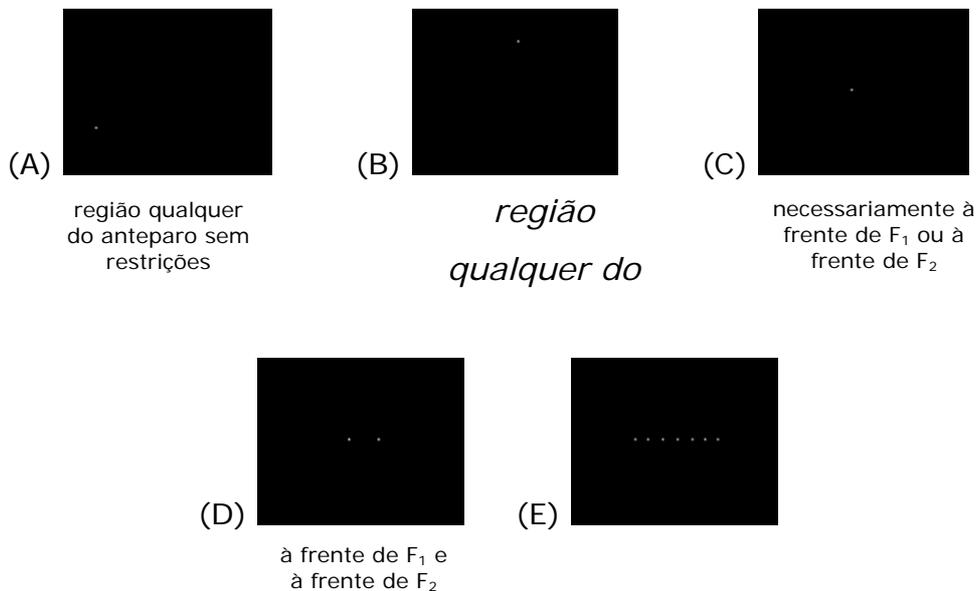
07. Qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, observada no anteparo?



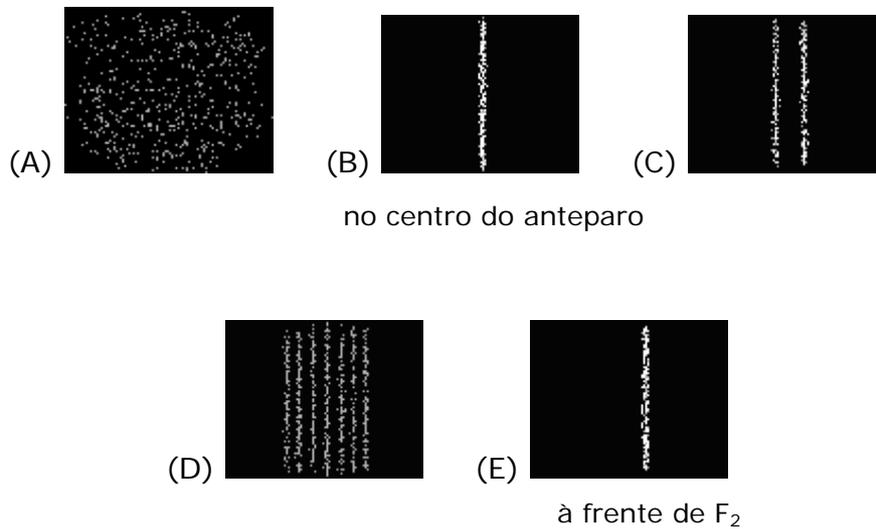
08. Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico), qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após algumas horas? (suponha que a taxa de emissão seja de 1 fóton por segundo)



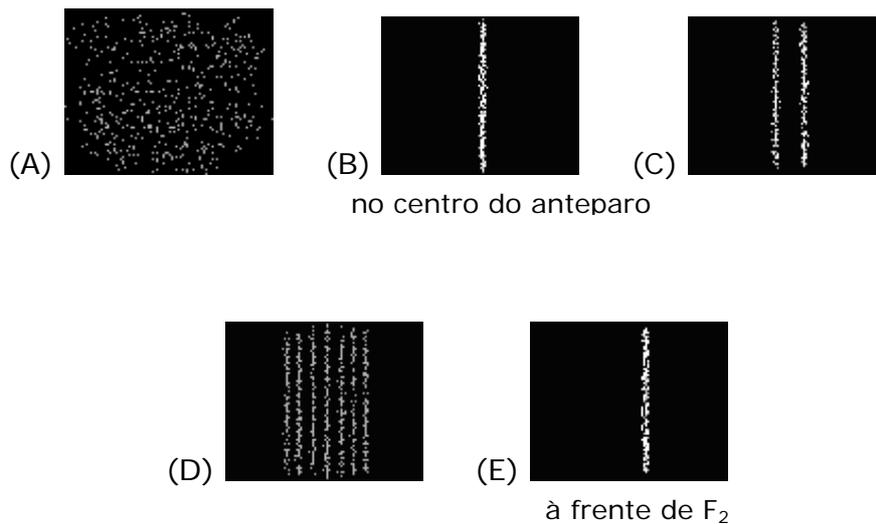
09. Se a fonte emitisse apenas um único fóton, qual das alternativas melhor representa uma possível imagem, vista de frente, que poderia ser vista no anteparo após a sua emissão?



10. Supondo ainda o mesmo regime monofotônico, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo, após algumas horas, se um detector de fótons de não-demolição* fosse colocado em F_1 ?



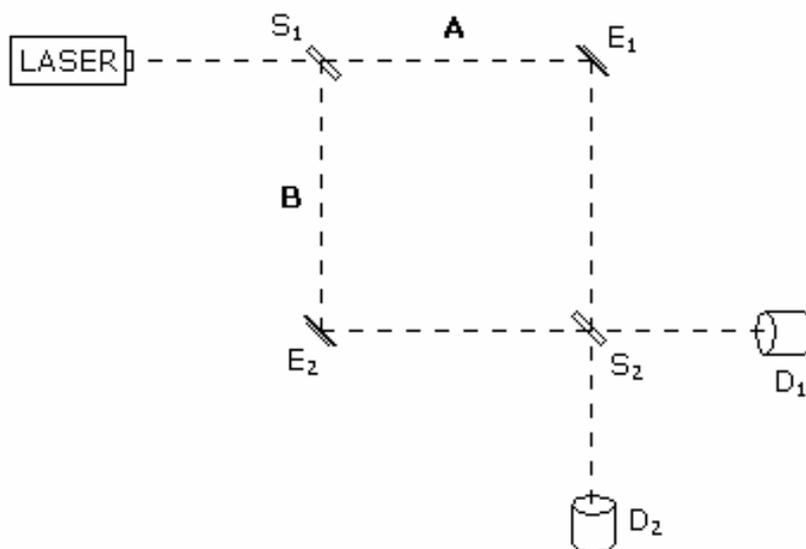
11. Se, na ausência do detector, a fonte emitisse um feixe mono-energético de elétrons (todos de mesma energia) com intensidade suficientemente baixa para que um único elétron seja emitido de cada vez, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após algumas horas? (suponha que a tela seja revestida com tinta que brilha ao ser atingida por um elétron)



*Trata-se de um dispositivo capaz de detectar o fóton sem absorvê-lo.

INSTRUÇÃO: As questões 12 a 16 referem-se ao enunciado abaixo.

A figura abaixo representa um interferômetro de Mach-Zehnder. Um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa, incide sobre um espelho semi-refletor S_1 que divide o feixe em uma componente transmitida (caminho A) e outra componente refletida (caminho B), ambas de mesma intensidade e coerentes. Após serem refletidos pelos espelhos E_1 e E_2 , ambas as componentes recombinam-se num espelho semi-refletor S_2 antes de atingirem os detectores D_1 e D_2 .



Admitindo que as componentes refletidas sofrem um deslocamento de fase de $\pi/2$ (correspondente a uma diferença de caminho óptico de $1/4$ de comprimento de onda), pode-se verificar que as componentes do feixe que incidem em D_1 estão em fase (interferência construtiva), enquanto que as componentes do feixe que incidem em D_2 estão defasados em $\lambda/2$ (interferência destrutiva). Têm-se, portanto, 100% do feixe detectado em D_1 e 0% do feixe detectado em D_2 .

12. Se, no experimento descrito acima, a intensidade da luz emitida pela fonte fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico), a uma taxa de um fóton por segundo, pode-se afirmar que, após algumas horas, D_1 detectaria

- (A) todos os fótons emitidos.
- (B) a grande maioria dos fótons emitidos.
- (C) aproximadamente metade dos fótons emitidos.
- (D) uma pequena minoria dos fótons emitidos.
- (E) nenhum dos fótons emitidos.

13. Suponha que, ainda em regime monofotônico, um detector de fótons de não-demolição, D_0 , fosse colocado entre E_1 e S_2 (caminho A). Pode-se afirmar que, após algumas horas, D_1 detectaria

- (A) todos os fótons emitidos.
- (B) a grande maioria dos fótons emitidos.
- (C) aproximadamente metade dos fótons emitidos.
- (D) uma pequena minoria dos fótons emitidos.
- (E) nenhum dos fótons emitidos.

14. Suponha que, ainda em regime monofotônico, o espelho semi-refletor S_2 fosse retirado do experimento. Pode-se afirmar que, na ausência de D_0 , após algumas horas, D_1 detectaria

- (A) todos os fótons emitidos.
- (B) a grande maioria dos fótons emitidos.
- (C) aproximadamente metade dos fótons emitidos.
- (D) uma pequena minoria dos fótons emitidos.
- (E) nenhum dos fótons emitidos.

15. Se no arranjo experimental descrito no enunciado (ausência de D_0 e presença de S_2) a fonte emitisse um único fóton, pode-se afirmar que

- (A) o fóton seria detectado com certeza em D_1 .
- (B) o fóton seria detectado com certeza em D_2 .
- (C) a metade do fóton seria detectada em cada detector simultaneamente.
- (D) o fóton teria uma probabilidade de 50% de ser detectado em D_1 ou em D_2 .
- (E) o fóton não seria detectado em D_1 nem em D_2 .

16. Suponha que um único fóton seja lançado para o interior do interferômetro, montado segundo o arranjo experimental descrito na questão anterior (questão 15). Se um detector de fótons de não-demolição fosse colocado entre E_1 e S_2 (caminho A) num instante posterior à passagem do fóton por S_1 e anterior à sua reflexão subsequente, pode-se afirmar que

- (A) o fóton seria detectado com certeza em D_1 .
- (B) o fóton seria detectado com certeza em D_2 .
- (C) a metade do fóton seria detectada em cada detector simultaneamente.
- (D) o fóton teria uma probabilidade de 50% de ser detectado em D_1 ou em D_2 .
- (E) o fóton não seria detectado em D_1 nem em D_2 .

GABARITO

- 01) A 02) C 03) A 04) B 05) E 06) B 07) D 08) D
09) B 10) C 11) D 12) A 13) C 14) C 15) A 16) D