

Desenvolvimento de um Software para o Ensino de Fundamentos de Física Quântica

.....
Fernanda Ostermann¹, Sandra D. Prado e Trieste dos S.F. Ricci
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
.....

Introdução

Neste trabalho apresentamos um *software* livre do tipo “bancada virtual”, desenvolvido no âmbito de um projeto sobre tópicos de física moderna e contemporânea na formação de professores¹, que simula o fenômeno da interferência em um aparato denominado de interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ). Trata-se de um arranjo experimental análogo ao experimento das duas fendas, porém mais simples. Pode-se dizer que tal experimento é um dos mais cruciais para o entendimento de conceitos fundamentais em física quântica (FQ), pois revela o caráter quântico dos objetos microscópicos.

Esse aparato, inventado há cerca de 100 anos, vem sendo bastante explorado em experiências recentes de ensino dos fundamentos de FQ, além de aparecer com uma frequência crescente em artigos da área de ensino em Física por ser bastante apropriado em termos didáticos [1-5].

Embora a teoria ondulatória da luz descreva o padrão de franjas claras e escuras na experiência da fenda dupla de Young através da superposição coerente de ondas [6,7], a explicação do efeito fotoelétrico proposta por Einstein em 1905 supõe que a luz seja constituída por corpúsculos de luz indivisíveis (quanta), chamados fótons. Além disso, versões da experiência de Young feitas com feixes de elétrons, de nêutrons e, recentemente,

de moléculas de fulereno (C_{60}) exibiram o mesmo padrão de interferência que os fótons [5]. Como explicar o aparecimento das franjas de interferência quando se trabalha com corpúsculos como fótons, átomos e mesmo moléculas, em vez de ondas? Esse caráter dual ficou amplamente conhecido como dualidade onda-partícula. A luz é, talvez, o caso mais conhecido desse fenômeno. Somente a partir de 1980 foi alcançada a tecnologia que permitia trabalhar em regime monofotônico (um fóton emitido pela fonte de cada vez) em laboratórios avançados de Física [8]. Do ponto de vista do ensino de FQ, como se trata de um arranjo experimental muito sofisticado e de difícil reprodução em laboratórios didáticos, será praticamente impossível, por ora e pelos próximos anos, sua realização de forma não virtual. Neste caso, o desenvolvimento de um *software* para fins didáticos justifica-se plenamente [4].

O *software* do interferômetro aqui apresentado permite que se opere virtualmente com laser (regime clássico) e com fótons individuais (regime quântico), explorando os aspectos corpuscular e ondulatório revelados no arranjo experimental, através da introdução de detectores de fótons ou de filtros polaróides nos braços do aparelho ou de modificações no arranjo experimental (como colocar ou retirar o segundo semi-espelho, por exemplo).

Embora fortemente influenciados pelo trabalho de Müller e Wiesner [1]

A dificuldade para se trabalhar em um arranjo experimental de regime monofotônico justifica plenamente o desenvolvimento de um software onde esse aparato possa ser simulado

¹Alguns experimentos em mecânica quântica exigem um aparato experimental disponível apenas em modernos laboratórios. Assim, justifica-se plenamente a realização de experimentos virtuais como o tratado no presente artigo.

de Pessoa [2], buscamos desenvolver um simulador mais completo do interferômetro de Mach-Zehnder [2], além de proporcionar uma versão em português (além de em inglês e em espanhol) para facilitar sua utilização em cursos de formação de professores no Brasil e em escolas brasileiras de Ensino Médio.

O IMZ em regime clássico

O layout do IMZ apresentado na Fig. 1, operando no regime clássico, mostra que o aparelho é composto de dois espelhos semi-refletores ou semi-prateados (um primeiro semi-espelho próximo à fonte) e um segundo semi-espelho mais próximo dos anteparos. Esses espelhos são, comumente, chamados divisores de feixes, pois transmitem 50% da luz incidente e refletem os restantes 50%. Há também dois espelhos comuns, 100% refletores (um na parte superior do trilho mais à esquerda e o outro na parte inferior no trilho mais à direita) e dois anteparos (para regime monofotônico, é possível substituir os anteparos por detectores). As distâncias entre os espelhos podem ser ajustadas de acordo com o objetivo do experimento, mas os espelhos devem estar precisamente alinhados para que o ângulo de incidência do centro do feixe seja sempre de 45 graus em cada um. No caso do nosso *software*, um padrão de anéis circulares, mostrado nos anteparos da Fig. 1, é formado, devido à largura finita do feixe de luz laser, que pode ser devido à abertura circular da fonte ou ainda obtida com o uso de uma

lente. O adesivo na fonte ilustra as situações em que o uso do feixe estendido (com anteparos) e do feixe colimado (com o uso dos detectores 3 e 4 – observe mais adiante as Figs. 5 e 9) torna-se mais adequado didaticamente. Nesse *software*, optamos também por usar uma fonte polarizada na direção horizontal, por convenção. Vale a pena discutir o padrão de interferência em cada um dos anteparos, explicando por que no centro do primeiro (anteparo sobre o trilho mais à direita) ocorre interferência construtiva, enquanto que no centro do segundo ocorre destrutiva. O regime clássico é explicado com detalhes na Ref. [5].

Observando-se a Fig. 1 podemos ver que, na sua parte inferior, o *software* oferece três conjuntos de recursos: “instrumentos” (anteparos 1 e 2; detectores 1, 2, 3 e 4; espelho semi-refletor 2; filtros polaróides 1, 2 e 3), que podem ser colocados ou removidos²; “fonte” (laser, fótons únicos, ligar e desligar a fonte, reiniciar a simulação e, no caso de fótons únicos, a aceleração da emissão e/ou a modificação do número de fótons emitidos por segundo pela fonte) e “ponto de vista” (vista livre; vista superior e visualização dos feixes). Há também, no canto inferior direito, a possibilidade de se escolher entre três idiomas (por-

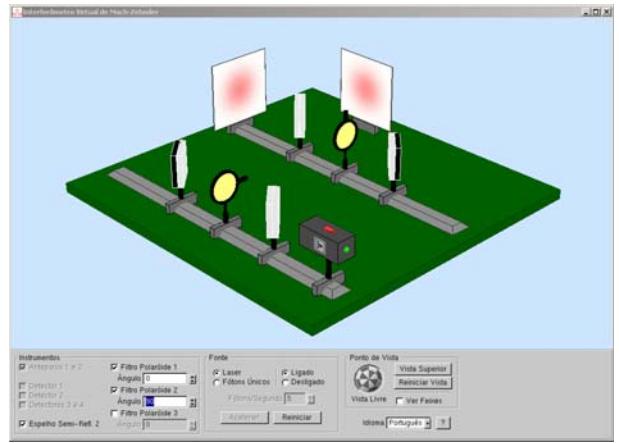


Figura 2: No IMZ clássico, com os polaróides cruzados, não ocorre o padrão de interferência.

tuguês, inglês e espanhol).

Outro recurso que pode ser explorado no regime clássico é a colocação de polaróides nos braços do aparelho, verificando o que ocorre com as intensidades nos anteparos ou se, dependendo da orientação dos eixos ópticos desses filtros, é possível destruir o padrão de interferência (Fig. 2). Nesse caso, o resultado clássico (da óptica ondulatória) nos diz que feixes de luz em direções ortogonais polarizados não interferem entre si [8-9], o que explica o resultado da simulação.

É possível retirar o segundo semi-espelho para verificar que, neste caso, o padrão de interferência também desaparece. Isto se deve ao fato de que no segundo semi-espelho é que há superposição dos feixes que inicialmente haviam sido separados pelo primeiro semi-espelho (Fig. 3).

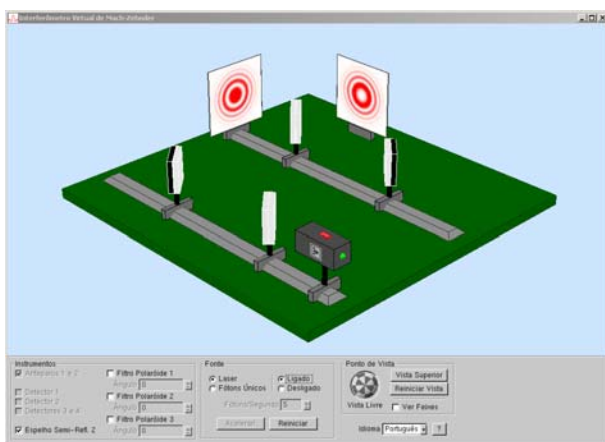


Figura 1: O IMZ operando em regime clássico (luz laser) e com os dois semi-espelhos presentes.

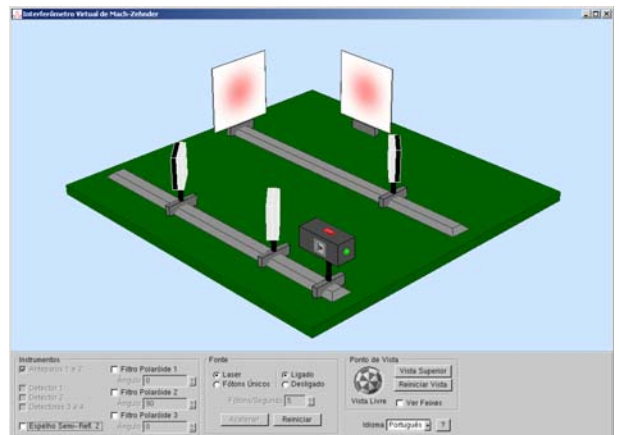


Figura 3: No regime clássico, com a retirada do segundo semi-espelho do arranjo experimental, verifica-se que o padrão de interferência é destruído.

O IMZ no regime quântico - Comportamento ondulatório

Para tornar a experiência da luz no IMZ um experimento quântico, é necessário diminuir a intensidade da fonte. No regime quântico, falamos em intensidade sem mais nos referir à amplitude do campo elétrico, mas sim à taxa de emissão de fótons pela fonte. Os resultados mais interessantes do ponto de vista da FQ emergem no limite da emissão de um fóton por vez - o regime monofotônico, pois quando um único fóton entra no IMZ devidamente alinhado, há detecção puntiforme (na tela, aparece um ponto para cada detecção) somente em certas posições sobre os anteparos. Para entender mais detalhadamente a interferência monofotônica, recomenda-se a leitura do artigo de Ostermann e Prado [5].

O processo de detecção do fóton no anteparo é sempre puntiforme, mas após a detecção de um número muito grande de fótons, um padrão de interferência se forma, como é ilustrado na Fig. 4 para o caso da simulação de 8772 fótons. Diferentemente da mecânica clássica, na qual a posição de detecção do fóton poderia ser, em princípio, pré-determinada se as condições iniciais fossem dadas, a FQ não permite nenhuma previsão em relação à posição de uma única detecção, oferecendo apenas uma previsão precisa para as estatísticas de muitas detecções de fótons identicamente preparados.

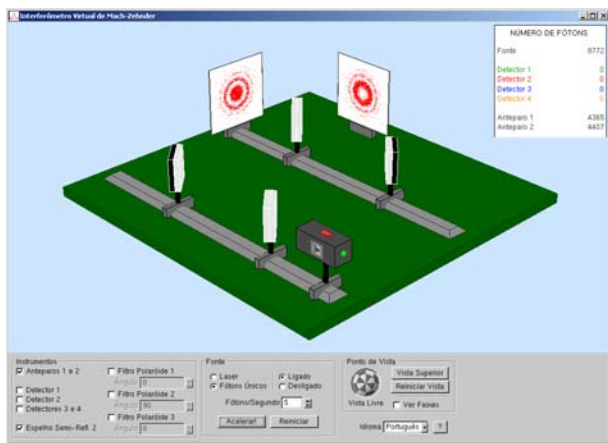


Figura 4: O IMZ operando no regime monofotônico (um fóton emitido de cada vez). Observa-se a formação do padrão de interferência no anteparo. Compare esse resultado com o da Fig. 1 (regime clássico).

Ao substituímos os dois anteparos por dois detectores (o que é possível se estamos em regime monofotônico), observa-se que o detector 3 sempre acusa a presença do fóton (interferência construtiva), enquanto o detector 4 nunca dispara (interferência destrutiva). Isso pode ser verificado por meio da luzinha do detector 3 (Fig. 5). Todos os 129 fótons, como indicados na Fig. 5, são detectados pelo detector 1 (201 disparos).

O IMZ no regime quântico - Comportamento corpuscular

Assim como no caso clássico, o padrão de interferência em regime quântico é destruído quando colocamos dois polaróides cruzados (Fig. 6) e um terceiro polaróide na saída do segundo semi-espelho com orientação igual ao primeiro (mais à esquerda no layout). Observe que, dos cerca de 15331 fótons que a fonte emitiu, apenas cerca de 3800 chegaram em cada anteparo. Isso pode ser explicado com base em que apenas os fótons com polarização igual ao polaróide (no caso, definida como 90°) chegaram aos anteparos.

Igualmente ao verificado para o caso clássico, o padrão de interferência

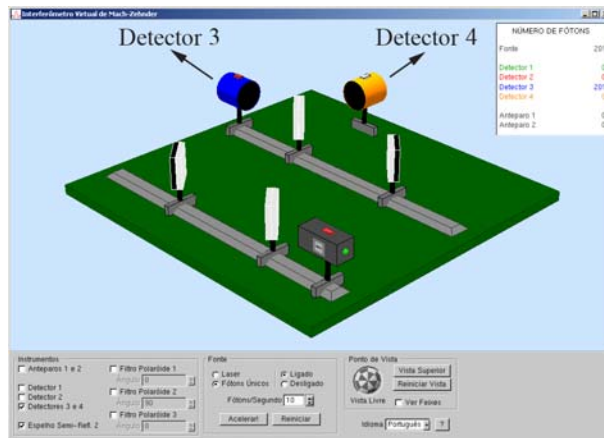


Figura 5: No IMZ quântico, o fenômeno ondulatório é verificado também com a substituição dos anteparos pelos detectores 3 e 4. O detector 3 acusa a presença do fóton (interferência construtiva) e o detector 4 nunca dispara (interferência destrutiva).

no regime quântico é destruído quando retiramos o segundo semi-espelho (Fig. 7). Também nesse caso, passamos a obter o comportamento corpuscular para o fóton. Na interpretação de Copenhagen [2, 5] diz-se que, se pudermos inferir por qual caminho rumou o fóton, seu comportamento será corpuscular. Observe que isso é exatamente o que ocorre na Fig. 7: o fóton que chega ao anteparo 1 (sobre o trilho), por exemplo, foi refletido no primeiro semi-espelho e seguiu pelo trilho mais à direita do layout.

A destruição do padrão de interferência e, conseqüentemente, a observação de comportamento corpuscular para o fóton, também pode ser obtida colocando-se um detector em um dos braços do aparelho e mantendo-se o segundo semi-espelho, como

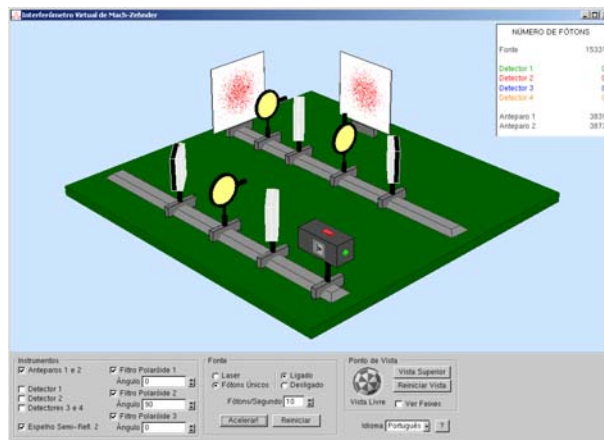


Figura 6: No IMZ monofotônico, ao introduzirmos polaróides cruzados, destruímos o padrão de interferência. Temos, então, o chamado comportamento corpuscular.

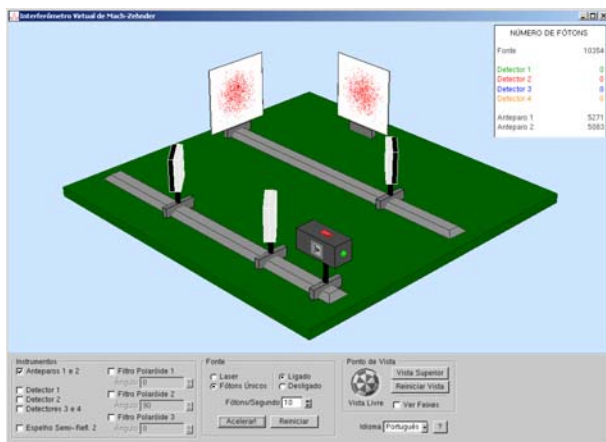


Figura 7: No IMZ quântico, a retirada do segundo semi-espelho faz com que o fóton manifeste um comportamento corpuscular.

mostra a Fig. 8. Uma interpretação seria novamente a idéia de que se sabe por que caminho rumou o fóton, ou seja, se ele chegou ao anteparo, é porque não seguiu pelo braço onde estava o detector (pois este o absorveria). Observe que, dos 8804 fótons emitidos pela fonte, a metade é absorvida pelo detector 1 e a outra metade se divide entre os dois anteparos.

Substituindo os dois anteparos pelos dois detectores e retirando-se o segundo semi-espelho (Fig. 9), o fenômeno passa a ser corpuscular novamente, ou seja, metade dos fótons é detectada no detector 3 e a outra metade detector 4. Novamente, é possível inferir o caminho do fóton neste caso. O que chegou ao detector 4, por exemplo, certamente foi transmitido pelo primeiro semi-espelho, seguindo pelo trilho mais à esquerda do layout. A figura mostra o disparo

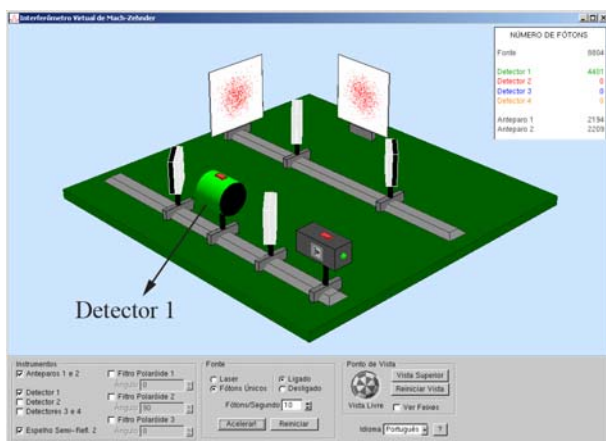


Figura 8: No IMZ quântico, com o arranjo completo, o comportamento corpuscular se manifesta ao colocarmos um detector em um dos braços.

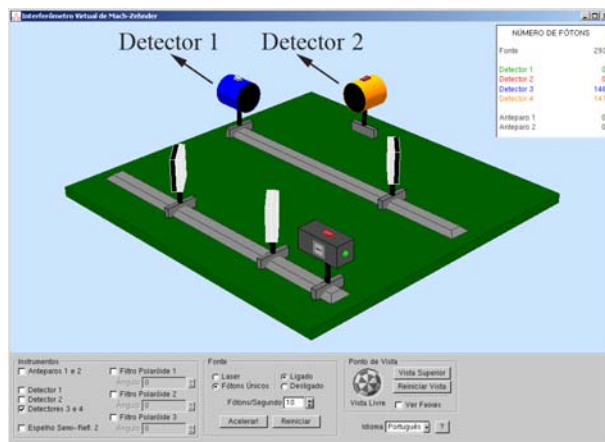


Figura 9: No IMZ quântico sem o segundo semi-espelho, o fenômeno é corpuscular. Ou seja, ambos os detectores (com 50% de chance para cada um) dispararam, acusando a presença do fóton.

ocorrendo também no detector 4 neste caso (50% de chance para cada um).

Considerações finais

Crece a cada dia a preocupação em se atualizar os currículos escolares de Física. No entanto, os recursos pedagógicos em nosso meio são escassos e a ênfase na formação de professores é bastante formal. Os livros didáticos de Física para o Ensino Médio editados no Brasil já começaram a introduzir elementos da FQ, mas ainda apresentam-se bastante presos à abordagem histórica de caráter meramente informativo. É preciso avançar em relação às abordagens tradicionais dos cursos de Licenciatura e de formação continuada, sinalizando possíveis transposições didáticas da FQ para o Ensino Médio que priorizem conceitos e o que há de mais fundamental na teoria.

Uma boa ferramenta, que merece ser mais investigada em sua potencialidade para o ensino de FQ, é o software do IMZ aqui apresentado. Em particular, seu uso em cursos de formação de professores, no Instituto de Física da UFRGS, tem se mostrado extremamente válido tanto em termos de motivação para estudos posteriores (mais formais) quanto em relação a uma visão mais conceitual da FQ.

Notas

Apoio parcial do CNPq.

¹Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda>.

²No regime clássico (laser), os recursos que podem ser utilizados são os dois anteparos, o espelho semi-refletor 2 e três filtros polaróides. No regime quântico, todos os instrumentos podem ser utilizados.

Referências

- [1] R. Müller and H. Wiesner, *American Journal of Physics* 70, 200 (2002).
- [2] O Pessoa Jr., *Conceitos de Física Quântica* (Livraria da Física, São Paulo, 2003).
- [3] F. Ostermann e T.F. Ricci, *Ciência & Educação* 10, 235 (2004).
- [4] F. Ostermann e R.F. Ricci, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* 22, 9 (2005).
- [5] F. Ostermann e S.D. Prado, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 27, 193 (2005).
- [6] R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica* (Editora Campus, Rio de Janeiro, 1994).
- [7] P.A. Tipler, *Física Moderna* (Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2001).
- [8] Para mais detalhes, ver os artigos de C.K. Hogg e L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* 56, 58 (1986) e o de P. Grangier, G. Roger e A. Aspect, *Europhysics Letters* 1, 173 (1986).
- [9] T.F. Ricci e F. Ostermann, in: *Uma introdução conceitual à mecânica quântica para professores do Ensino Médio* (Textos de Apoio ao Professor de Física, n. 14, Porto Alegre, Instituto de Física da UFRGS, 2003).