

## Luz como Fóton e a Física Quântica

### Questão: O que é um fóton?

#### 1. Detecção de Luz como Fótons

No séc. XX ficou claro que, no experimento da fenda dupla para a luz, se a intensidade do feixe se tornasse bem fraca, e se um detector ultra-sensível fosse utilizado, o padrão de interferência óptico se formaria *ponto a ponto*. A Fig. XIX.1 apresenta esse acúmulo para o caso de interferência de elétrons, que é análogo ao caso óptico. Cada pontinho é chamado de “quantum de luz”, ou *fóton*, e ele foi postulado qualitativamente por J.J. Thomson, em 1904, e de maneira exata por Einstein, em 1905. A energia associada a cada fóton de frequência  $\nu$  é a mesma, de valor  $h\nu$ , onde  $h$  é a constante de Planck, em unidades de ação [ $mx^2/t$ ].

A formação ponto-a-ponto do padrão de interferência é surpreendente, pois envolve um aspecto corpuscular – os fótons – junto com o aparecimento de um padrão de interferência, que é tipicamente uma propriedade ondulatória. Uma partícula ou corpúsculo é bem localizado e indivisível (até uma certa energia), ao passo que uma onda clássica é estendida e indefinidamente divisível. Como a física quântica concilia esses aspectos contraditórios?

Antes de responder, notemos que, a rigor, o termo “fóton” só deve ser associado àquilo que é observado ou medido. Todos concordam sobre o que é observado; as discordâncias surgem com relação ao que acontece *antes* (e depois) da medição. Cada “interpretação” da teoria quântica oferece um relato diferente para esta “dualidade onda-partícula” (fraca).

Uma interpretação *ondulatória realista* diria que a luz é uma onda que sofre “colapsos” toda vez que é medida, resultando num pacote de onda bastante comprimido, que seria o fóton. Uma interpretação *dualista realista* diria que o fóton é na verdade um corpúsculo que segue uma trajetória bem definida (mesmo que oscilante), sendo guiado por sua onda associada.

As *interpretações ortodoxas* são mais instrumentalistas, e tendem a se calar sobre o que acontece quando ninguém está observando. Dentro desta classe, a interpretação da complementaridade, proposta por Niels Bohr, associa quadros clássicos (ondulatório ou corpuscular) a diferentes arranjos experimentais.

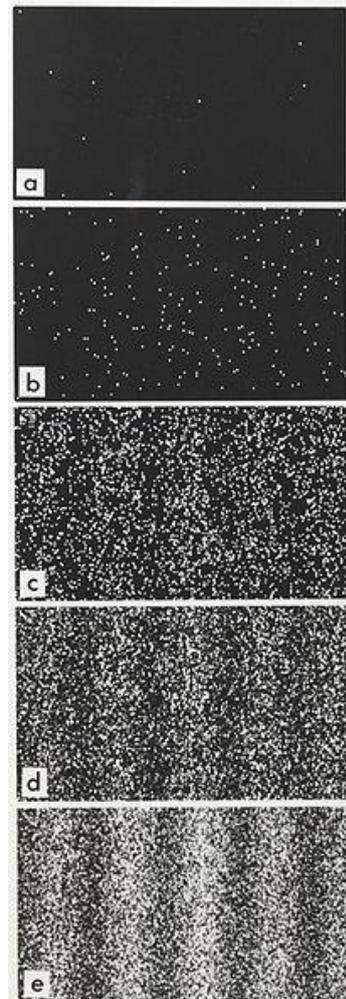


Figura XIX.1: Formação paulatina, ponto a ponto, de um padrão de interferência de elétrons.<sup>148</sup>

<sup>148</sup> TONOMURA, A. (1993), *Electron holography*, Springer, Berlim. Figura obtida da Wikipédia.

O arranjo da fenda dupla das Figs. XVIII.3 e XIX.1 estaria associado a um quadro ondulatório (pois exibe franjas de interferência), ao passo que a difração por uma fenda pontual (Fig. XVIII.7b) estaria associado a um quadro corpuscular, pois pode-se atribuir uma trajetória única a um fóton detectado (no caso da figura, uma trajetória retilínea entre *A* e *B*).

Naturalmente, é muito difícil (talvez impossível) testar as diferentes interpretações diretamente (através de medições), pois ter-se-ia que medir o que acontece quando ninguém está medindo ou observando!

## 2. Física Quântica = Ondas + Detecção Quantizada

A física quântica aplica-se não só à luz, mas também a toda matéria, que é assim imbuída de propriedades ondulatórias (podendo-se falar em “ondas de matéria”).

Quando a física quântica é comparada à mecânica clássica de *partículas*, fenômenos como o efeito túnel e o princípio de incerteza aparecem como extremamente contra-intuitivos e surpreendentes. Porém, pode-se argumentar que o mistério que ronda esses fenômenos provém principalmente da física *clássica* de ondas! Ou seja, pode-se argumentar que todos os efeitos envolvendo um quantum *individual* podem ser vistos como simplesmente um fenômeno ondulatório clássico adicionado à detecção em forma de quanta.

Considere o fenômeno clássico da “reflexão interna total”, onde todo o feixe de luz é refletido na face interna de um prisma. Quando um outro prisma é posto próximo ao primeiro, com uma face paralela à face refletora, ocorre a “frustração” da reflexão total, ou seja, uma parte do feixe incidente se propaga no segundo prisma (Fig. XIX.2). Entre os prismas, porém, não há propagação de luz. O que a teoria eletromagnética de Maxwell descreve é a presença de uma “onda evanescente” na fenda entre os prismas, com uma amplitude que decresce exponencialmente com a distância.

O efeito túnel, da física quântica, pode ser entendido como uma combinação deste fenômeno óptico clássico com a detecção ponto-a-ponto dos fótons ou dos quanta das ondas de matéria (elétrons, nêutrons, átomos, etc.).

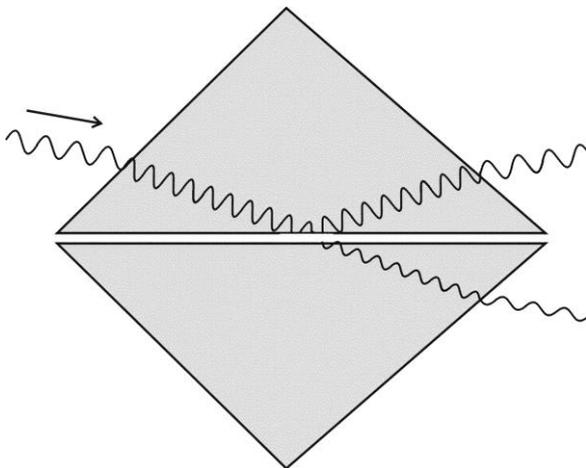


Fig. XIX.2: Reflexão interna total frustrada: sem o prisma de baixo, a reflexão no prisma superior é total; a aproximação do prisma inferior faz com que parte da onda incidente se propague neste prisma, “saltando” através da fenda.

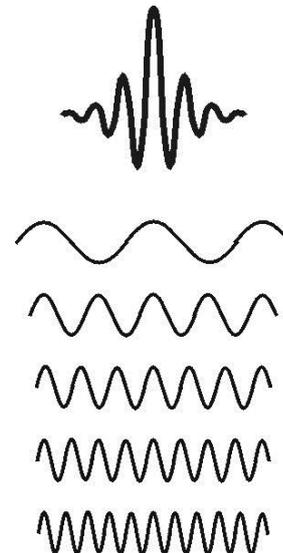


Fig. XIX.3: Formação de um pacote de ondas: a superposição das cinco ondas contínuas (cada uma de comprimento de onda  $\lambda$  bem definido) gera o pacote mostrado no topo, com boa localização espacial mas má definição de  $\lambda$ .

Outro fenômeno ondulatório clássico é a formação de um pacote de onda bem localizado no espaço a partir da superposição de uma série de ondas contínuas de comprimento de onda bem definido (Fig. XIX.3). Em tais pacotes, uma melhor resolução  $\delta x$  no espaço (ou seja, um pacote melhor localizado) só pode ser obtida às custas de uma pior resolução  $\delta k$  no número de onda, definido como  $k=2\pi/\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda. Em suma, tais grandezas clássicas são limitadas por uma relação de indeterminação  $\delta x \cdot \delta k \geq 1$ .

No limite quântico, considerando a relação  $p_x=h/\lambda$  obtida por Louis de Broglie para as ondas de matéria (e por Einstein e Stark para fótons), esta propriedade das ondas leva ao princípio de incerteza  $\delta x \cdot \delta p_x \geq h/2\pi$ . Novamente, o mistério deste princípio provém da física clássica de ondas acoplada à noção de detecção de quanta.

O chamado “problema da medição” da teoria quântica envolve uma tentativa de compreensão da quantização da detecção a partir de uma interpretação ondulatória.

Em experimentos nos quais há *dois* ou mais fótons detectados, e nos quais eles se originaram de um mesmo processo (ou seja, interagiram anteriormente), a afirmação de que “os efeitos quânticos são meramente efeitos ondulatórios clássicos mais detecção quantizada” não pode mais ser feita, pois surgem efeitos conhecidos como “não-localidade quântica”. Mesmo assim, se se definirem ondas em espaços de  $3N$  dimensões (associados a  $N$  quanta), a afirmação continua válida. Uma quarta novidade da física quântica (aparentemente independente das outras três, ondas de matéria, quantização na medição, e a aparente não-localidade) envolve os princípios da estatística quântica.<sup>149</sup>

### 3. O Dilema de Bell: abandonar Realismo ou Localidade

No início de novembro de 1964, o físico norte-irlandês John Stewart Bell (1928-1990) terminava um artigo que viria a ter um impacto incomparável na área de fundamentos da física quântica. O resultado obtido era uma desigualdade que, segundo a Teoria Quântica, poderia ser violada experimentalmente, mas que limitava as previsões de toda uma classe de “teorias de variáveis ocultas locais” (TVOs locais). Não trazendo novidades para a interpretação ortodoxa da teoria quântica, por que este resultado teve tanto impacto na física, a ponto de o nome de Bell ter sido sugerido para o prêmio Nobel de Física, no ano de sua morte?<sup>150</sup>

Para começar, devemos entender qual é a classe de interpretações que foi excluída pela desigualdade. O que é uma TVO? A mecânica quântica, desenvolvida em torno de 1926, é uma teoria que atribui probabilidades para diferentes resultados de medições. Por exemplo, pode-se preparar um feixe de átomos que tem probabilidade  $1/2$  de cair em um detector, e  $1/2$  de cair em outro. Dado um único átomo, não é possível prever em qual detector ele cairá. Porém, não seria possível que houvesse variáveis ocultas que determinariam em qual detector o átomo cai? Tais variáveis seriam inacessíveis para nós, mas elas seriam reais e estariam lá, determinando o movimento do átomo. Por envolver entidades reais que não são observáveis, tal teoria é dita *realista*, contrapondo-se à visão antirrealista da interpretação ortodoxa, que só atribui realidade àquilo que pode ser medido experimentalmente. Na Física Clássica, variáveis ocultas são parte integrante da mecânica estatística. Será que algo semelhante seria viável na física quântica?

Enquanto estudava na Queen’s University, em Belfast, Bell leu em um livro de Max Born que “teorias de variáveis ocultas são impossíveis”. Esta afirmação se baseava no trabalho de John von Neumann (1932), que apresentara uma prova matemática segundo a qual

<sup>149</sup> Alguns livros de divulgação sobre a física quântica, em português, estão indicados na nota 5.

<sup>150</sup> Esta seção é a versão preliminar de uma resenha publicada na *Ciência Hoje* 54, n. 320, nov. 2014, pp. 60-1.

seria impossível uma TVO fornecer todos os resultados estatísticos previstos pela teoria quântica. Mais tarde, especializando-se em desenvolvimento de aceleradores na Inglaterra, Bell leu em 1952 um artigo de David Bohm, e se surpreendeu ao constatar “que o impossível tinha acontecido”: Bohm propunha uma TVO viável, apesar da prova de impossibilidade de von Neumann.

No final de 1959, Bell e sua esposa Mary foram contratados para trabalhar no CERN, o grande acelerador de partículas em Genebra. No verão de 1964 passou uma temporada no acelerador linear da Universidade de Stanford, na Califórnia, onde escreveu um trabalho de revisão sobre provas de impossibilidade. Ficaram claras para Bell não só as limitações da prova de von Neumann, mas também que a TVO de Bohm tinha “o traço curioso de ter em geral um caráter flagrantemente não-local”. Fez então a pergunta que se mostraria correta: será que o traço não-local da teoria realista de Bohm seria uma característica de *qualquer* interpretação realista da teoria quântica? Em poucas semanas mostrou que sim, e derivou sua prova de impossibilidade para TVOs *locais*.

Mas que característica é essa de ser local? É a situação em que algo que acontece num laboratório aqui na Terra não pode ser influenciado causalmente por algo que ocorre instantaneamente em um lugar distante, como a Lua. Com a teoria da relatividade, aceita-se que um efeito pode se propagar, no máximo, com a velocidade da luz, e não mais rapidamente do que isso. Assim, um evento na Lua só pode ser percebido na Terra depois de 1,3 segundos, nunca instantaneamente. Mas a TVO de Bohm envolve a propagação instantânea de efeitos!

A situação experimental em que isso ocorre envolve pares de partículas que interagiram e se separaram espacialmente. Nesta situação, segundo a teoria quântica, as partículas podem se encontrar em um estado “emaranhado”, que apresenta simetrias que são impossíveis de reproduzir na física clássica. Por exemplo, pode-se gerar um estado emaranhado de luz em que as polarizações dos dois fótons, detectados simultaneamente a uma grande distância entre si, são medidos *sempre* em estados ortogonais, quaisquer que sejam as direções ortogonais de polarização medidas (Fig. XIX.4). Isso é permitido pela óptica clássica apenas para medições de *um* par de direções (por exemplo,  $0^\circ$  para um fóton e  $90^\circ$  para o outro), mas não para *todos* os pares de direção ( $45^\circ$  e  $135^\circ$ , etc.).

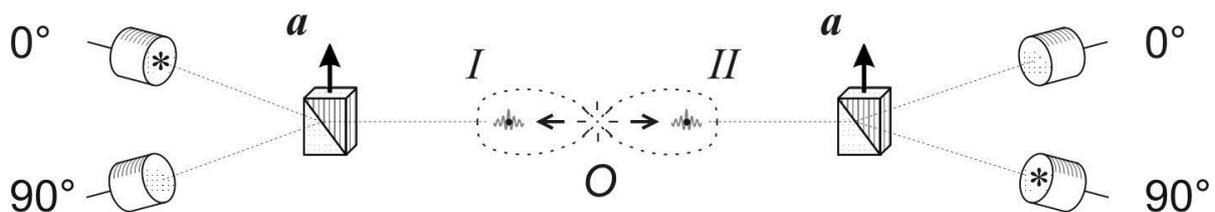


Figura XIX.4. Um estado emaranhado de “singlete” exhibe anticorrelação perfeita (ou seja, os valores medidos em cada extremidade são sempre opostos) qualquer que seja o valor do ângulo  $a$  em que os prismas birrefringentes estão orientados.

Segundo a interpretação realista de Bohm, o par emaranhado de fótons não tem polarizações definidas antes das medições; porém, no instante em que um é medido, instantaneamente o outro fóton passa a ter polarização bem definida, em direção ortogonal à do primeiro. Esta ação instantânea define a não localidade desta concepção realista. O que Bell mostrou é que tal ação à distância é um traço necessário de *qualquer* interpretação realista da mecânica quântica.

Ao contrário do artigo de Einstein, Podolsky & Rosen (1935), que serviu de inspiração para Bell, a desigualdade não lançou nenhum desafio à interpretação ortodoxa da teoria quântica, que é antirrealista. Segundo visões antirrealistas, deve-se concentrar apenas nas previsões da teoria, que dizem haver correlações das medições de polarização em estados emaranhados de luz. A localidade é definida a partir de eventos macroscópicos em que a causa é controlável: como é impossível enviar sinais a velocidades mais rápidas do que a da luz, esta interpretação satisfaz a localidade.

Ora, dado que a desigualdade não afetou em nada a interpretação ortodoxa, amplamente dominante na época, e dado que ninguém defendia as TVOs locais, como explicar o enorme impacto que o trabalho acabou tendo?

O que primeiro despertou o interesse dos físicos foi a possibilidade que se abriu para fazer um novo teste experimental da teoria quântica. Cinco anos após a publicação do artigo, dois grupos começaram a trabalhar na adaptação da desigualdade de Bell para situações reais de laboratório. De início, não ficou claro se a desigualdade poderia ser violada experimentalmente, mas em torno de 1980, com os desenvolvimentos técnicos do grupo de Alain Aspect, na França, ficou claro que tal desigualdade era violada experimentalmente, dependendo apenas de algumas suposições consideradas bastante inócuas (chamadas em inglês de *loopholes*, ou seja, possíveis furos).

Do lado teórico, havia um pequeno número de físicos, matemáticos e filósofos que já estudavam questões de fundamentos da física quântica. Com a realização dos testes experimentais, esta área de fundamentos despertou o interesse de parte da nova geração de físicos, especialmente numa época em que muitos estavam desempregados, após os cortes de financiamento gerados pela crise mundial do petróleo de 1973. Físicos desta nova geração passaram a buscar novas interpretações, que fugissem dos dogmas da visão ortodoxa. Novas propostas realistas não locais foram buscadas, e novas versões do antirrealismo foram desenvolvidas.

Neste mesmo contexto, alguns físicos interessados em concepções esotéricas passaram a explorar a hipótese de que o teorema de Bell forneceria a chave da explicação científica para a telepatia (fenômeno negado pela maior parte da comunidade científica), além de outras possíveis conexões entre consciência humana e física quântica. Com isso, nasceu o movimento do misticismo quântico, especialmente na Califórnia.

Por fim, um fato adicional contribuiu para que o teorema de Bell viesse a ser considerado um dos resultados mais importantes da física do século XX: o nascimento da área da informação quântica. Este campo foi marcado pela descoberta, no final do século passado, de que seria teoricamente possível a construção de um computador quântico, caracterizado pelo emaranhamento de bits quânticos, e que seria capaz de realizar tarefas computacionais em velocidades muito maiores do que em computadores convencionais. Toda a teoria desta e de outras áreas da informação quântica fazem uso da notação de estados emaranhados, que foi difundido nos estudos do teorema de Bell.

O teorema de Bell, por si só, não descreve ou explica uma situação objetiva sobre os fenômenos físicos. Sua sutileza advém do fato de ele se apresentar como um dilema: ou se abandona a hipótese do realismo (de que há variáveis ocultas que contribuem causalmente para os resultados das medições), ou se abandona a hipótese da localidade (de que os efeitos físicos se propagam a uma velocidade finita), ou se abandonam os dois.