



Mecânica Quântica

Carlos E. Aguiar

Lista de Exercícios 1

1. Um interferômetro de Michelson está representado na figura 1. Os fótons emitidos pela fonte F têm probabilidade 50% de serem transmitidos pelo semi-espelho S e 50% de serem refletidos. O feixe luminoso transmitido segue para o espelho E_1 e o refletido vai para o espelho E_2 . Os espelhos enviam os feixes de volta a S , onde eles se recombinam dando origem a um feixe que segue para o fotodetector D e outro que vai na direção da fonte F . O espelho E_1 pode ser deslocado para a frente e para trás, e x é distância de E_1 a um ponto de referência. A probabilidade $P(x)$ de um fóton emitido por F chegar ao detetor D depende de x da maneira mostrada na figura 2.

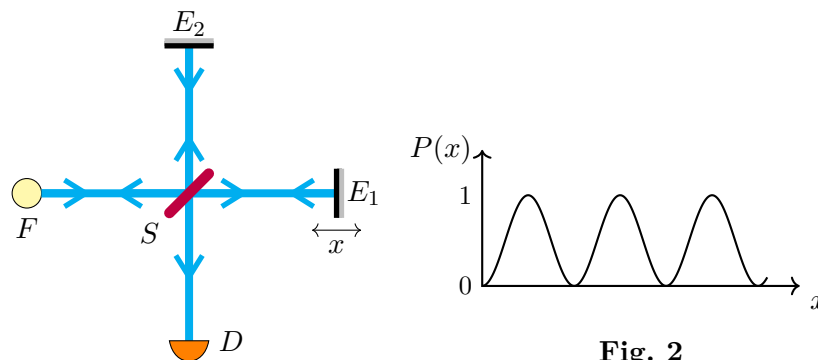


Fig. 2

Fig. 1

- (a) De quantas maneiras o fóton pode ir da fonte F até o detetor D ? Faça um esboço dos caminhos possíveis. Esses caminhos são distinguíveis?
- (b) Suponha que um obstáculo interrompa a passagem de luz entre S e E_2 . Ainda chegam fótons ao detetor D ? Por quantos caminhos um fóton pode ir de F a D ? Faça um gráfico da probabilidade $P(x)$ nesse caso.
- (c) Suponha que o espelho E_2 seja acoplado a uma mola, formando um oscilador tão sensível que a reflexão de um único fóton produz

uma vibração. Nesse novo aparato, de quantas maneiras o fóton pode ir da fonte F ao detector D ? Esses caminhos são distinguíveis? Faça um gráfico da probabilidade $P(x)$.

2. A colisão elástica de dois núcleos de ^{12}C está representada na figura 1. Os núcleos têm quantidades de movimento iguais e opostas (o sistema de referencia é o do centro de massa), e θ é o ângulo de espalhamento. A probabilidade de um núcleo de ^{12}C atingir o detector D colocado na direção θ é $P(\theta)$. Medidas de $P(\theta)$ estão mostradas na figura 2 (na verdade, a figura mostra a “seção de choque” $\sigma(\theta)$, uma grandeza proporcional à probabilidade $P(\theta)$). Os dados experimentais são de D. A. Bromley, J. A. Kuehner, E. Almqvist, *Elastic scattering of identical spin-zero nuclei*, Phys. Rev. 123 (3), 878 (1961).

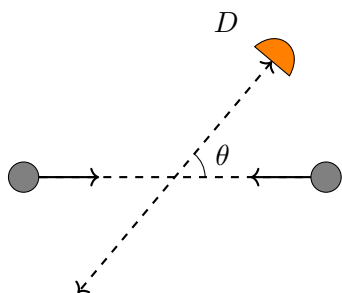


Fig. 1

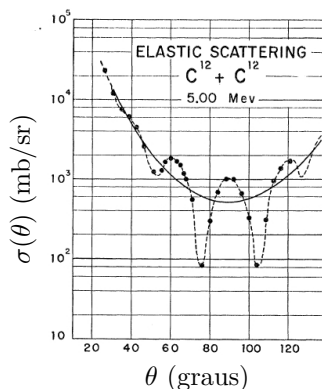


Fig. 2

- (a) De quantas maneiras um núcleo de ^{12}C pode ser espalhado para a direção θ ? Faça um diagrama mostrando as trajetórias dos dois núcleos em cada caso.
- (b) A linha contínua na figura 2 representa o cálculo clássico do espalhamento dos dois núcleos (a seção de choque de Rutherford). Os dados experimentais apresentam oscilações em torno do resultado clássico, um efeito atribuído à interferência quântica. Discuta a origem dessa interferência.
3. Uma fonte F produz fótons aos pares. Os fótons de um par são emitidos simultaneamente e seguem em direções opostas. O que se dirige para a direita entra em um interferômetro semelhante ao de Mach-Zehnder, no qual um dos braços é muito maior que o outro. A figura 1 mostra o interferômetro: S_1 e S_2 são semi-espelhos (50-50%), e E_1 e E_2 são espelhos que podem ser deslocados conjuntamente para cima

ou para baixo, o que muda sua distância x a um ponto de referência. Um fotodetector, D_1 , está localizado em uma das saídas do interferômetro. O fóton que segue para a esquerda é registrado no detector D_2 . Os detectores D_1 e D_2 estão a uma mesma distância da fonte F e são ligados a equipamentos que permitem determinar se eles dispararam em coincidência ou não.

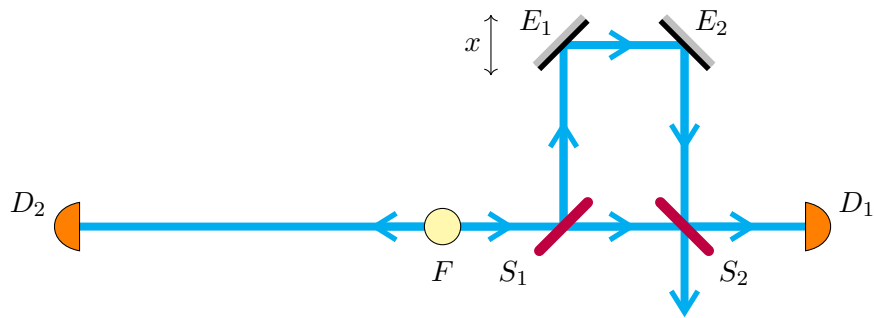


Fig. 1

- (a) De quantas maneiras o fóton que entra no interferômetro pode chegar ao detector D_1 ? Faça um diagrama mostrando os possíveis caminhos.
 - (b) Os caminhos de F a D_1 são distinguíveis (justifique sua resposta)? Faça um gráfico da probabilidade $P(x)$ de um fóton ser detetado em D_1 .
4. Considere o aparato descrito na questão 3, agora com interferômetros idênticos dos dois lados da fonte F , conforme mostrado na figura 1.

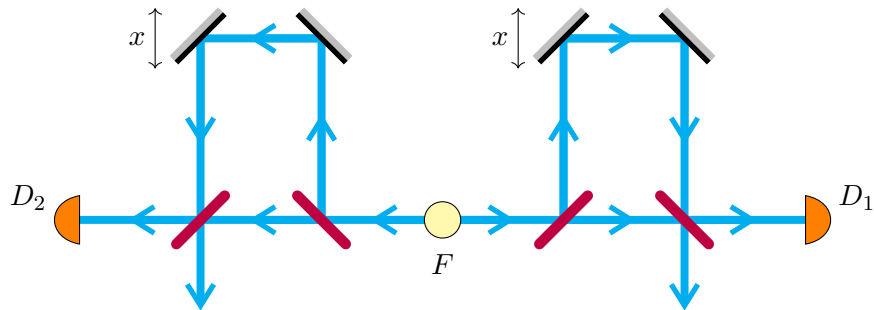


Fig. 1

Essa montagem é conhecida como interferômetro de Franson; veja D. M. Greenberger, M. A. Horne, A. Zeilinger, *Multiparticle Interferometry and the Superposition Principle*, Phys. Today 46 (8), p. 22 (1993), e P. G. Kwiat, A. M. Steinberg, R. Y. Chiao, *High-visibility interference in a Bell-inequality experiment for energy and time*, Phys. Rev. A 47, p. 2472 (1993).

- (a) De quantas maneiras os fótons podem chegar *em coincidência* aos detectores D_1 e D_2 ? Faça um diagrama mostrando os possíveis caminhos do *par* de fótons.
 - (b) Os caminhos do par, indo de F a D_1 e D_2 em coincidência, são distinguíveis? Faça um gráfico da probabilidade $P(x)$ dos detectores D_1 e D_2 dispararem em coincidência.
 - (c) Suponha que os fótons do par *não* chegam em coincidência aos detectores. De quantas maneiras isso pode ocorrer? Os caminhos do par são distinguíveis? Faça um gráfico da probabilidade $P(x)$ de um detectores disparar sem estar em coincidência com o outro.
5. Um pulso eletromagnético I incide sobre dois átomos idênticos localizados nas posições 1 e 2, conforme mostra a figura 1. Os átomos estão inicialmente em seu estado fundamental, A , e a interação com o pulso leva apenas um deles ao estado excitado B . O átomo excitado decai de B para A emitindo um fóton γ , como ilustrado no destaque da figura 1. Um detector D , colocado bem distante dos átomos, registra a chegada de fótons. A posição x do detector pode ser alterada como indicado na figura.

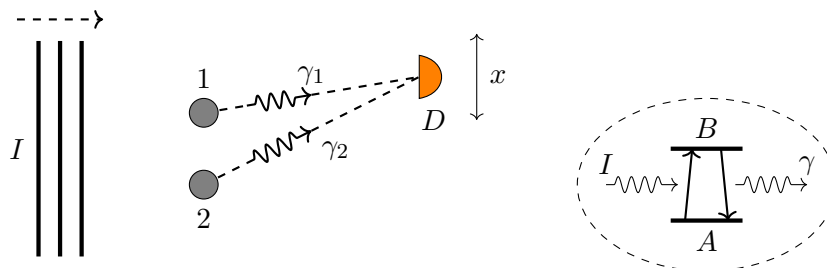


Fig. 1

- (a) Os caminhos que o fóton γ pode tomar para chegar ao detector D são distinguíveis?
- (b) Faça um gráfico da probabilidade $P(x)$.

6. Considere o experimento discutido na questão 5, com uma diferença: o átomo que emite o fóton γ decai do estado B para o estado intermediário C (não mais para o estado fundamental A), como mostrado na figura 1.

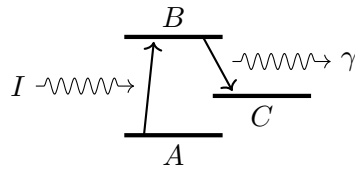


Fig. 1

- (a) Os caminhos que o fóton γ pode tomar para chegar ao detector D são distinguíveis?
- (b) Faça um gráfico da probabilidade $P(x)$.