

Fotões ou Fantasmass?

A experiência de Aspect e as correlações de EPR

J. M. B. LOPES DOS SANTOS

Laboratório de Física da Universidade do Porto
Praça Gomes Teixeira — 4000 PORTO

O Homem é a medida de todas as coisas

PROTÁGORAS

1. Uma história, uma experiência

Era uma vez dois gémeos, que por idiossincrasia do Ministério da Educação local frequentavam escolas em extremos opostos da cidade onde viviam. Por volta das onze horas dirigiam-se ao bar da respectiva escola onde cada um deles pedia, invariavelmente, um pão com queijo ou com fiambre. Mas faziam-no de um modo singular. Após alguma hesitação atiravam uma moeda ao ar, consultavam-na e depois faziam o pedido. Os encarregados de cada um dos bares eram vizinhos e encontravam-se frequentemente no café da esquina onde, amiúde, discutiam os hábitos dos estudantes. O caso dos gémeos não passou despercebido. Grande foi a surpresa quando, por acaso, descobriram que as escolhas dos dois gémeos eram, em cada dia, invariavelmente idênticas! Seguiu-se o seguinte diálogo:

— *A moeda ao ar é uma encenação. Já trazem combinado de casa o que vão escolher.*

— *Não necessariamente. Repara que podem estar em contacto, por exemplo por rádio (ou telepatia). Podiam ter combinado que se as duas moedas dessem o mesmo resultado fariam uma das escolhas (queijo, por exemplo) e se os resultados fossem diferentes, fariam a outra.*

— *De acordo. Mas suponhamos que não há qualquer comunicação entre eles. Nessa altura tens de concordar que tiveram que escolher o que iriam comer quando estavam juntos.*

— *Certamente. É inacreditável que as moedas pudessem dar sempre o mesmo resultado!*

Neste artigo iremos discutir uma experiência realizada pelo grupo de Alain Aspect em Orsay em 1981 [1] (mas cuja concepção é, no essencial, de Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) em 1935 [2]) na qual se observam correlações idênticas às que existem entre as escolhas dos dois gémeos. É uma experiência em que são medidas polarizações de dois fotões, que viajam em direcções opostas, emitidos por uma fonte comum. Por isso os resultados das medições não podem influenciar-se mutuamente, pelo menos através da transmissão de sinais com velocidade não superior à da luz (que é a dos fotões). Em certas circunstâncias, que especificaremos à frente, observa-se exactamente o mesmo resultado nas duas medições. Repetindo o raciocínio dos dois amigos pareceria que os resultados das medições estariam já determinados pelo estado dos fotões ao saírem da fonte. O que torna a experiência de Aspect extremamente interessante é que ela permite provar que esta conclusão é falsa. O resultado de cada medição não é apenas desconhecido antes de qualquer delas ser realizada. Ele é inexistente. Só fica determinado na altura da própria medição. Mas para melhor apreciar as implicações desta experiência convém falar um pouco de polarização de fotões.

2. Polarização de fotões

O material que constitui as lentes dos óculos Polaroid contém longas cadeias moleculares, preferencialmente alinhadas numa dada

direcção. Quando um feixe de luz incide numa lâmina de um tal material, (polarizador linear), é parcialmente absorvido. Mas se incidir depois numa segunda lâmina com a mesma orientação da primeira (mesma direcção das cadeias moleculares) a absorção é praticamente nula. Rodando a segunda lâmina a respectiva absorção aumenta de tal modo que quase não há transmissão quando o ângulo entre as direcções das cadeias moleculares é de 90°.

Uma vez que um feixe de luz é um feixe de fótons este comportamento deve reflectir uma propriedade dos fótons que determina o modo como estes interagem com polarizadores. Um fóton que emerge de um polarizador linear tem probabilidade um de passar um segundo polarizador linear com a mesma orientação. Tal fóton diz-se polarizado linearmente segundo a direcção de fácil transmissão do primeiro polarizador, perpendicular à direcção das cadeias moleculares. Um fóton com polarização linear ortogonal à direcção de fácil transmissão é absorvido com probabilidade 1.

Que acontece se a direcção de polarização do fóton fizer um ângulo θ com a de fácil transmissão do polarizador? É fácil verificar experimentalmente que, para dois polarizadores fazendo um ângulo θ entre si, a fracção de intensidade transmitida no segundo é

$$\frac{I_t}{I_{in}} = \cos^2\theta \quad (\text{Lei de Malus})$$

Em termos de fótons isto só pode significar que cada fóton tem uma probabilidade $\cos^2\theta$ de passar no segundo polarizador e $\sin^2\theta$ de ser absorvido (Fig. 1). Os fótons não se dividem!

Desta discussão decorrem dois factos importantes:

- i) Quando fazemos uma análise de polarização de um fóton só há dois resultados possíveis. O fóton comporta-se como tendo polarização paralela (passa) ou perpendicular (é absorvido) à direcção de fácil transmissão.
- ii) O comportamento futuro de um fóton que passou um polarizador é totalmente inde-

pendente do seu estado anterior. É completamente determinado pela direcção de fácil transmissão do último polarizador que passou.

Destes dois factos tiramos uma conclusão que é crucial para tudo o que se segue. Podemos determinar se um fóton está polarizado numa qualquer direcção (perpendicular à de propagação) usando um polarizador linear;

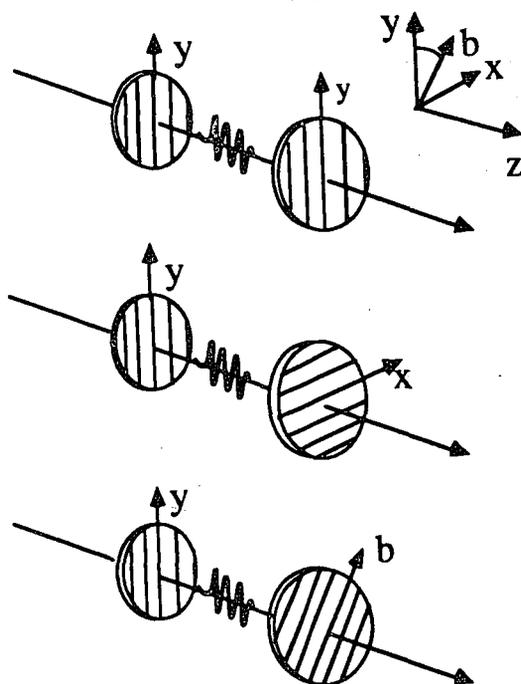


Fig. 1—A direcção de polarização de um fóton é a direcção de fácil transmissão do último polarizador que ele passou. Nos casos (i) e (ii) é previsível o resultado da interacção com o polarizador. Em (i) o fóton passa e em (ii) o fóton é absorvido. No caso (iii) qualquer destes acontecimentos é possível.

mas é então impossível saber qual teria sido a polarização desse fóton noutra qualquer direcção (que não a 90° com a primeira). Isto porque o estado do fóton após a primeira medição não depende do estado inicial. É determinado pelo resultado da medição. Nenhuma medição subsequente pode dar qualquer informação sobre o estado inicial do fóton. As polarizações dos fótons em direcções não ortogonais são mais um exemplo de variáveis complementares.

Analísadores

A análise de polarização de fótons com polarizadores lineares tem um inconveniente prático que pode ser importante. Se um fóton não é detectado à frente de um polarizador não é possível saber se ele foi absorvido ou se simplesmente o detector não o acusou. Nenhum detector tem eficiência sequer próxima de 100%. Os analisadores usados na experiência de Aspect não tem este inconveniente porque não absorvem fótons. Os dois estados de polarização (paralela ou ortogonal a uma dada direcção) correspondem a transmissão, mas em direcções diferentes. Os analisadores são constituídos por dois prismas, cuja base é um triângulo rectângulo isósceles, colados de modo especial de maneira a formar um cubo. Um feixe incidente perpendicularmente a uma das faces do cubo, de modo a incidir a 45% na face comum dos prismas, é parcialmente reflectido (e transmitido) nesta interface. Esta é concebida de modo a proporcionar um coeficiente de reflexão (fracção de energia reflectida) dependente da polarização do feixe. Se esta é perpendicular ao plano de incidência, $R = 1$. Se for paralela a esse plano, $R = 0$. Quando um único fóton incide no dispositivo ele emerge por uma das duas saídas com a polarização correspondente (Fig. 2).

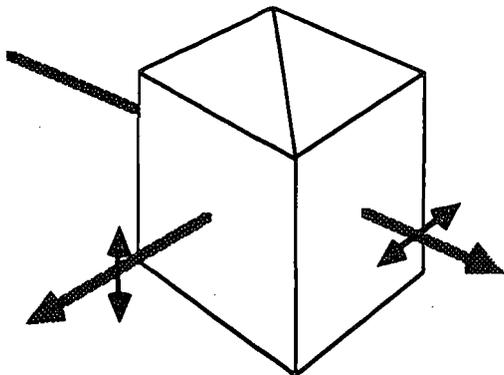


Fig. 2—Um fóton que incida num dos analisadores usados na experiência de Aspect, na direcção indicada, emerge por uma de duas saídas: na direcção de incidência se a sua polarização for paralela ao plano de incidência na face comum aos dois prismas e na direcção ortogonal a essa se a sua polarização for perpendicular ao plano de incidência. Para outra qualquer direcção de polarização há probabilidade não nula de emergir por qualquer uma das duas saídas.

Colocando fotomultiplicadores em cada uma das saídas, determinamos se a polarização do fóton é paralela (fóton transmitido na direcção de incidência) ou perpendicular (fóton deflectido de 90°) ao plano de incidência. Obviamente o cubo pode ser rodado em torno da direcção de incidência permitindo uma análise de polarização segundo qualquer direcção. Habitualmente indicamos a orientação de um tal dispositivo por um versor \mathbf{a} (por exemplo na direcção de polarização do feixe não desviado).

Convém recordar que este dispositivo não é mais que uma versão elaborada do cristal de calcite. A dupla imagem ou birrefringência de um cristal calcite resulta precisamente da separação de luz de acordo com a sua polarização. Na caixa do fim deste artigo refiro uma demonstração curiosa para quem tiver acesso a um tal cristal e a uma lâmina de polarizador linear.

3. A Experiência

A montagem utilizada na experiência de Aspect está esquematizada na Fig. 3. A fonte

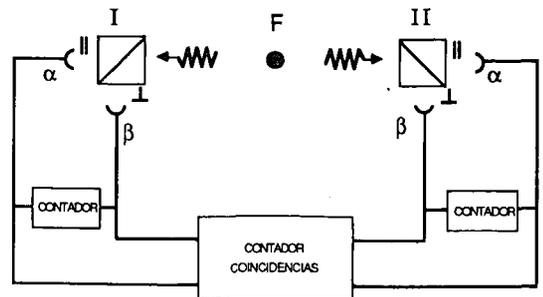


Fig. 3—A montagem da experiência de Aspect. Cada decaimento de um átomo da fonte F resulta na emissão de dois fótons cujas polarizações são analisadas em I e II. Os impulsos provenientes dos fotomultiplicadores da esquerda (I) e direita (II) só são registados se o intervalo de tempo entre eles for muito pequeno, o que garante que são devidos ao decaimento do mesmo átomo.

de ^{40}Ca é a mesma que foi descrita no primeiro artigo desta série [3]. Como vimos cada átomo

da fonte decai emitindo dois fótons quase simultaneamente e em direcções opostas. O intervalo entre as emissões dos dois fótons raramente ultrapassa $w = 9.8 \times 10^{-9}$ seg.

Em I e II é feita uma análise de polarização de cada fóton com recurso a dois cubos polarizadores (colocados a cerca de 6 m de fonte) com fotomultiplicadores associados às respectivas saídas. A intensidade da fonte é regulada para que o intervalo de tempo típico entre dois decaimentos seja muito superior a w . Deste modo, quando um impulso é gerado por um dos fotomultiplicadores à direita e outro à esquerda com intervalo de tempo inferior ou da ordem de w , trata-se, com grande probabilidade, de impulsos originados por fótons provenientes do decaimento de um mesmo átomo ⁽¹⁾. O detector de coincidências permite registar apenas este tipo de acontecimentos, contando o número de vezes que dispara cada par de fotomultiplicadores, (α_I, α_{II}) , (α_I, β_{II}) , (β_I, α_{II}) , ou (β_I, β_{II}) .

As orientações dos analisadores são variadas independentemente. Pretende-se assim obter uma medição das correlações de polarização dos dois fótons emitidos por cada átomo. Os resultados são expressos como frequências relativas do tipo,

$$P_{\alpha_I \alpha_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{N_{\alpha_I \alpha_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{N_{\text{pares}}}$$

em que $N_{\alpha_I \alpha_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ é o número de vezes que é registado o disparo (quase simultâneo) de α_I e α_{II} para analisadores com orientações \mathbf{a} (em I) e \mathbf{b} (em II) e N_{pares} é o número total de pares de fótons detectado:

$$N_{\text{pares}} = N_{\alpha_I \alpha_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + N_{\alpha_I \beta_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + N_{\beta_I \alpha_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + N_{\beta_I \beta_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}).$$

Têm particular interesse as probabilidades de ocorrências de resultados iguais ou diferentes nos dois analisadores, isto é

$$P_{\text{igual}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = P_{\alpha_I \alpha_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + P_{\beta_I \beta_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$$

$$P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = P_{\alpha_I \beta_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + P_{\beta_I \alpha_{II}}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$$

Os resultados das medições de Aspect estão reproduzidas na Fig. 4. Nas ordenadas repre-

senta-se a correlação $E(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ definida por

$$E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) =$$

$$P_{\text{igual}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 1 - 2P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$$

e em abcissa o ângulo θ entre \mathbf{a} e \mathbf{b} . A linha a tracejado é a previsão quântica. O objectivo principal do resto do artigo vai ser tentar convencer o leitor que estes resultados, aparentemente tão inócuos, exprimem na realidade um comportamento profundamente misterioso.

4. O Argumento de Einstein, Podolsky e Rosen

Olhando de novo para o esquema da Fig. 3 verificamos que a distância entre os dois analisadores é de cerca de 12 metros, ou seja cerca de 40×10^{-9} segundos de tempo de viagem de luz. Como pares de fótons que sejam registados tem diferença de tempos de emissão necessariamente inferiores a 20×10^{-9} seg. (doutro modo o detector de coincidências não regista o acontecimento) e quase sempre inferiores a 10×10^{-9} seg., vemos que o resultado da primeira medição de polarização só poderia influenciar a segunda se houvesse possibilidade de propagação de interacções a velocidade superior à da luz. Partindo do princípio que não há podemos concluir:

A. *As duas medições são inteiramente independentes. Nada do que acontece num dos analisadores pode, de qualquer modo, afectar o que se passa no outro.*

Por outro lado se atentarmos nos resultados da Fig. 4 vemos que $E(\theta = 0)$ é praticamente igual a um. De facto a previsão quântica para analisadores ideais é precisamente,

$$E(\theta = 0) = 1$$

⁽¹⁾ Na experiência de Aspect a «janela» de coincidência é de 20 nseg. As coincidências acidentais não são desprezáveis mas são medidas e subtraídas antes de calcular as probabilidades a seguir referidas.

isto é,

$$P_{\text{igual}}(\theta=0) \doteq 1 \quad ; \quad P_{\text{dif}}(\theta=0) = 0$$

No entanto qualquer analisador real tem uma probabilidade não nula de transmitir para uma saída um fóton com polarização correspondente

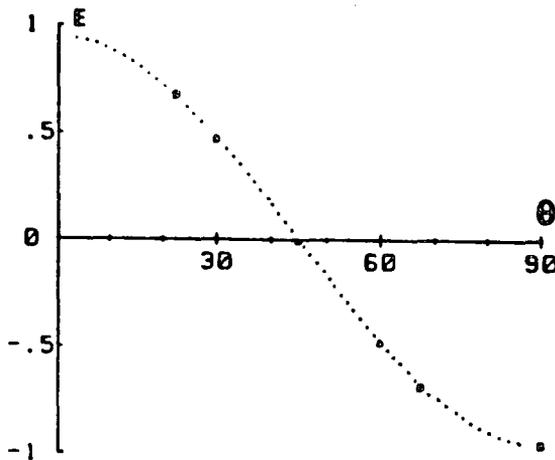


Fig. 4—Valores de correlação $E(a, b)$ em função do ângulo θ entre a e b . Os pontos experimentais são os rectângulos cujos lados correspondem a 2 desvios padrões. A linha a tracejado corresponde à previsão quântica.

à outra. Se levarmos este facto em conta, a Mecânica Quântica prevê um valor de $E(\theta=0)$ ligeiramente inferior a um e perfeitamente consistente com o valor experimental (a linha a tracejado foi calculada com esta correcção). Assim, embora não a demonstrem de um modo absolutamente inatacável, os resultados experimentais são perfeitamente consistentes com a nossa segunda conclusão:

B. *Quando os analisadores estão paralelos as medições de polarização dos dois fótons dão sempre o mesmo resultado.*

Em abono da verdade deve dizer-se que esta segunda afirmação não é estritamente necessária para demonstrar o resultado a que iremos chegar. Mas o argumento fica muito mais simples e directo. Para uma discussão com maior generalidade ver o artigo de Bell de 1981 [4].

Creio que o leitor terá reconhecido que nos encontramos numa situação muito semelhante à da história dos dois gémeos no início do artigo. A afirmação A corresponde à suposição que os dois gémeos não estão em contacto, que o que acontece numa das escolas não pode de nenhum modo afectar o que se passa na outra. A afirmação B corresponde à constatação de que as escolhas dos dois gémeos são em cada dia idênticas. A nossa conclusão não pode pois ser diferente da dos dois amigos, isto é o resultado de cada uma das medições de polarização está perfeitamente determinado (embora desconhecido) antes de qualquer delas ser concretizada.

Com efeito depois de medirmos a polarização de um dos fótons (por exemplo em I supondo que este fóton é o primeiro emitido) a constatação B permite-nos prever, com certeza, qual vai ser o resultado da medição em II. Mas nada se modificou em relação a este segundo fóton ou ao respectivo analisador (afirmação A). Logo o resultado de medição em II já estava determinado mesmo antes da medição feita em I. Por outro lado como os fótons «não sabem» com que orientações vão encontrar os analisadores podemos estender a conclusão anterior e afirmar que:

C. *As polarizações dos dois fótons, segundo qualquer direcção, estão perfeitamente determinadas (embora desconhecidas) antes da concretização de qualquer medição.*

A uma conclusão semelhante chegaram Einstein Podolsky e Rosen em 1935 [2] reflectindo sobre a previsão quântica para uma experiência por eles concebida e conceptualmente idêntica à experiência de Aspect. O problema é que na teoria quântica não existe sequer a possibilidade de representar o estado de um fóton que tenha polarização bem definida segundo duas direcções não ortogonais. A descrição quântica de um sistema aparecia então, segundo EPR, como uma especificação parcial, incapaz de esgotar as possibilidades de definição de grandezas físicas que a própria Natureza permitia. A Mecânica Quântica era

uma teoria incompleta. Era possível um nível de descrição mais fino.

A verdadeira surpresa, face à aparente solidez do argumento de EPR, surgiu em 1965 quando John Bell do CERN mostrou que os resultados de experiência como a que Aspect e seus colaboradores vieram a realizar, permitem rejeitar a conclusão C e mostrar que as polarizações dos fótons são, não apenas desconhecidas, mas verdadeiramente indeterminadas antes das medições. Nós chegaremos à mesma conclusão através de um pequeno jogo ⁽²⁾.

5. As desigualdades de Bell e um jogo (pouco) inocente

Punhamos numa mesa quatro caixas, sem tampa, invertidas, duas à esquerda com etiquetas **a** e **a'**, duas à direita com etiquetas **b** e **b'**. Coloco 4 bolas, vermelhas ou brancas, uma em cada caixa. Depois eu e o leitor sorteamos para ver *uma* das caixas da esquerda e *uma* das da direita. *É proibido espreitar as outras duas caixas.* Se o par sorteado for (**a**, **b'**) e as bolas tiverem cor diferente, o leitor paga-me um prémio. Se sair um dos outros 3 pares (**a**, **b**), (**a'**, **b**) ou (**a'**, **b'**) e as respectivas bolas forem diferentes, pago eu ao leitor o mesmo prémio. Quando as bolas são idênticas ninguém ganha ou perde. Este jogo favorece algum de nós ou dá igual chance a cada um?

Enquanto o leitor reflecte nesta questão (cuja resposta é uma das desigualdades de Bell) vejamos a relação entre este jogo e a experiência de Aspect.

Em cada jogada seleccionamos uma caixa de cada lado. Na experiência temos que escolher uma orientação para cada analisador. Se nos limitarmos apenas a duas orientações possíveis em cada analisador, teremos o equivalente da situação do jogo em que escolhemos uma de duas caixas em cada lado. O conteúdo de cada caixa é uma bola branca ou vermelha. Cada fóton poderá ter uma de duas polarizações (dois canais de saída). É proibido espreitar o conteúdo das caixas não seleccionadas. Na experiência de Aspect é impossível

determinar qual terá sido a polarização de cada fóton na direcção que não foi medida.

Existe, assim, uma correspondência perfeita entre o resultado de uma jogada e o de uma medição de um par de fótons. O quadro seguinte ilustra esta correspondência. Na última coluna mostra-se quem ganha em cada tentativa.

Quadro I — Comparação entre o jogo descrito nesta secção e a experiência de Aspect.

Orientações dos analisadores I (caixas) II		Resultado da med. de polarização		Cor das bolas		Vencedor
		I	II	I	II	
a	b	α_I	β_{II}	V	B	LEITOR
a'	b	α_I	α_{II}	V	V	
a	b'	β_I	α_{II}	B	V	AUTOR
a'	b'	β_I	α_{II}	B	V	LEITOR
a	b	β_I	β_{II}	B	B	
a	b'	α_I	β_{II}	V	B	AUTOR

Voltemos agora à análise do jogo. Quem ganha com maior frequência? Embora não saibamos qual é a cor das bolas nas caixas que não inspeccionámos é óbvio que elas têm uma cor definida. É claro que porei sempre bolas diferentes em (**a**, **b'**) pois de outro modo não posso ganhar. Mas, neste caso, os pares (**a**, **b**), (**a'**, **b**) e (**a'**, **b'**) não podem ter todos bolas da mesma cor! Isto é, se o meu par tem bolas diferentes pelo menos um dos pares do leitor tem também bolas diferentes. Como é igual a probabilidade de escolher esse par ou o par (**a**, **b'**) a probabilidade de o leitor ganhar não é inferior à minha. Por outras palavras no limite em que o número de tentativas, (o número de pares de fótons) $N \rightarrow \infty$ teremos com probabilidade 1,

$$N_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}') \leq N_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + N_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}) + N_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}')$$

A esquerda está o número de vezes que eu ganho, à direita o número de vezes que ganha o leitor. Podemos reescrever esta desigualdade como

⁽²⁾ Este jogo traduz uma versão da dedução das desigualdades de Bell devida a Stapp [6].

$$\frac{N_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}')}{N(\mathbf{a}, \mathbf{b}')} \frac{N(\mathbf{a}, \mathbf{b}')}{N} \leq \frac{N_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{N(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \frac{N(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{N} + \frac{N_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b})}{N(\mathbf{a}', \mathbf{b})} \frac{N(\mathbf{a}', \mathbf{b})}{N} + \frac{N_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}')}{N(\mathbf{a}', \mathbf{b}')} \frac{N(\mathbf{a}', \mathbf{b}')}{N}$$

Como é igual a probabilidade de escolher qualquer dos pares, ou seja

$$\frac{N(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{N} = \frac{N(\mathbf{a}', \mathbf{b})}{N} = \frac{N(\mathbf{a}, \mathbf{b}')}{N} = \frac{N(\mathbf{a}', \mathbf{b}')}{N} = \frac{1}{4}$$

($N \rightarrow \infty$)

obtemos

$$P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}') \leq P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + P_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}) + P_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}') \quad (1)$$

em que

$$P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \equiv \frac{N_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{N(\mathbf{a}, \mathbf{b})}$$

é a fracção de vezes que, tendo sido escolhido o par (\mathbf{a}, \mathbf{b}) , as bolas são diferentes. Este resultado exprime a conclusão anterior que leitor não pode perder este jogo.

As frequências que aparecem na eq. (1) são precisamente as que são medidas na experiência de Aspect. Ora, e este ponto é crucial, se a conclusão de EPR está correcta e cada fotão tem uma polarização definida nas direcções que não são medidas, *então a demonstração de desigualdade da eq. (1) é aplicável aos resultados da experiência de Aspect* que deverão pois verificar esta desigualdade.

Se tomarmos para \mathbf{a} , \mathbf{a}' , \mathbf{b} e \mathbf{b}' as direcções indicadas na Fig. 5 obtemos

$$P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = P_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}) = P_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}') = 0.163$$

uma vez que (ver Fig. 4)

$$E(\theta = 22.5^\circ) = 0.674$$

A desigualdade de Bell (eq. 1) implica

$$P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}') \leq 0.489,$$

quando de facto o valor medido é

$$P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}') = 0.837!! \quad [E(\theta = 67.5^\circ) = -0.674].$$

A eq. (1) é fortemente violada pelos resultados desta experiência!

Não obstante a solidez do argumento de EPR, estes resultados constituem uma refutação empírica da respectiva conclusão; as polarizações dos fotões são de facto indeterminadas, não apenas desconhecidas antes das medições!

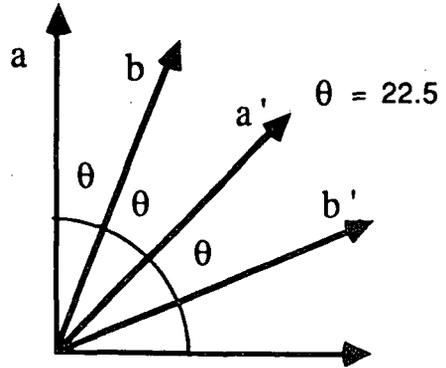


Fig. 5—Direcções escolhidos para os analisadores na experiência de Aspect. As direcções \mathbf{a} e \mathbf{a}' referem-se a I e \mathbf{b} e \mathbf{b}' a II. Os ângulos entre \mathbf{a} e \mathbf{b} , \mathbf{a}' e \mathbf{b} , \mathbf{a}' e \mathbf{b}' são de $22,5^\circ$ e entre \mathbf{a} e \mathbf{b}' de $67,5^\circ$.

Se fosse possível jogar o jogo aqui descrito como a Natureza «joga» os fotões, o leitor perderia quase duas vezes mais do que ganharia. O mistério desta experiência consiste precisamente em descobrir como é que a Natureza «faz batota» ou, por outras palavras, o que é que no argumento de EPR, não está conforme o seu comportamento.

6. Como tornear EPR

Antes de tentarmos penetrar o mistério referido no fim da secção anterior é necessário enfrentar uma objecção que alguns leitores (muito atentos) poderão ter levantado.

Há uma diferença entre o jogo e a experiência de Aspect, que pode ser relevante. No jogo as bolas são colocadas antes de serem escolhidas as caixas a levantar. Mas na expe-

riência de Aspect os analisadores estão em posição muito antes de os fótons saírem da fonte. Estamos implicitamente a supor que o estado dos fótons na emissão não depende da orientação dos analisadores. É como se as caixas fossem sorteadas antes das bolas serem colocadas mas partindo do princípio que quem as coloca não sabe quais as caixas escolhidas. Se esta hipótese não for válida e o estado dos fótons emitidos depender da orientação dos analisadores, então a dedução da desigualdade de Bell cai por terra. Nesse caso é obviamente possível garantir que o par $(\mathbf{a}, \mathbf{b}')$ revele sempre bolas de cor diferente ($P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}') = 1$) e as restantes bolas idênticas ($P_{\text{dif}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = P_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}) = P_{\text{dif}}(\mathbf{a}', \mathbf{b}') = 0$).

Embora esta possibilidade possa parecer suficientemente absurda para não ser considerada (como é que os fótons podem saber que as orientações vão encontrar), Aspect e seus colaboradores dispuseram-se a modificar a experiência de modo a investigá-la [7]. Nesta segunda versão usaram dois analisadores com orientações diferentes de cada lado. O feixe era comutado entre os dois por um interruptor óptico extremamente rápido, de tal modo que a direcção de análise de polarização de cada fóton só era fixada depois de os fótons abandonarem a fonte. O leitor interessado nos detalhes da montagem poderá consultar o artigo referido. As desigualdades de Bell continuam a ser violadas (o valor medido de $E(\theta)$ não se altera).

Ou pomos esta alternativa de parte ou supomos que a fonte «adivinha» com antecedência quais as direcções que vão ser medidas para cada par de fótons, o que começa a ultrapassar os limites de credibilidade. Não é por aqui que o mistério se esclarece.

Acção à distância instantânea

No jogo, como no caso dos fótons, há sempre uma caixa que é vista um bocadinho

antes da outra. Um presgizador ultra-rápido poderia trocar a bola da outra caixa depois de ver a primeira sem que o notássemos. Deste modo, seria também possível violar as desigualdades de Bell.

Na experiência de Aspect esta alternativa corresponde a haver a possibilidade de alterar o estado de um fóton como resultado da medição feita no outro, por outras palavras, à existência de sinais de velocidade arbitrariamente grande, superior à da luz:

A premissa A do raciocínio de EPR seria falsa.

Alguns Físicos defendem de facto que a experiência de Aspect demonstra a existência de acção à distância instantânea (ver ref. [8]). A primeira vista isto pareceria pôr em causa a Teoria da Relatividade. A razão é simples. Imagine o leitor uma arma que dispara balas com velocidade superior à da luz. Os acontecimentos correspondentes ao disparo da bala e ao atingir a vítima dizem-se espacialmente separados: um sinal luminoso emitido pela arma no momento do disparo ainda não chegou à vítima quando ela é atingida. Ora em relatividade demonstra-se que a sucessão temporal de acontecimentos espacialmente separados depende do referencial de observação. Um outro observador poderia ver a vítima cair antes da bala ser disparada! O efeito antes da causa! Esta é uma das razões físicas da incompatibilidade entre a Relatividade e a existência de sinais de velocidade superior à da luz. Mas será que esta objecção é relevante neste caso?

Imagine o leitor a experiência de Aspect repetida com duas fontes. Um dado observador II mede polarizações dos fótons das duas fontes de um dos lados. Um outro observador com um analisador mais próximo da fonte mede apenas os fótons emitidos por uma das duas fontes (Fig. 6). O observador em II não notará qualquer diferença entre o comportamento dos dois feixes. Ele só poderá saber qual dos feixes está a ser medido em I quando

a respectiva sucessão de resultados lhe for comunicada: ele terá uma inteiramente idêntica (analisadores em I e II paralelos). Por outras palavras a medição realizada em I não tem qualquer *efeito observável* em II. Não há causa nem efeito cuja sucessão temporal possa ser subvertida.

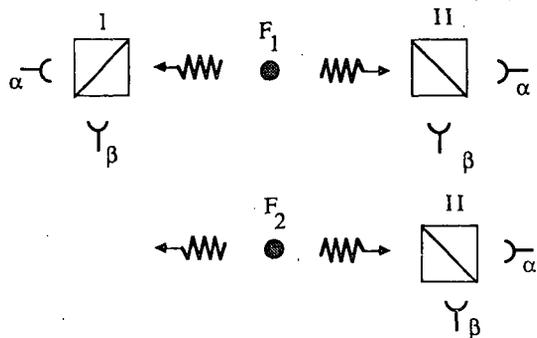


Fig. 6—Experiência de Aspect com duas fontes. O observador em II não tem qualquer possibilidade de saber qual dos dois feixes está a ser medido em I até que a respectiva sucessão de resultados lhe seja comunicada.

Vemos assim que estas «interacções» ultra-rápidas não põem problemas à Teoria da Relatividade porque são de um tipo extremamente singular. Não têm qualquer efeito localmente observável. A única coisa que de facto se altera em II como resultado da medição feita em I é a nossa expectativa sobre o que vai acontecer em II. Para um observador para o qual a medição de II seja a primeira alterar-se-á a expectativa sobre o que se vai passar em I. Em ambos os casos os resultados seriam conformes a essas expectativas.

Para um físico, que como Einstein, adopte uma posição realista, as nossas observações são consequências de uma realidade autónoma que preexiste qualquer observação ou observador. Nesta perspectiva a nossa expectativa relativa a um fenómeno físico só pode alterar-se por duas razões:

- i) Obtivemos mais informação sobre o sistema mas nada se alterou nas proprie-

dades que provocam as nossas observações.

- ii) Houve uma alteração efectiva da realidade subjacente às nossas observações.

O facto de as desigualdades de Bell serem violadas na experiência de Aspect exclui a possibilidade (i) relativamente a alteração da nossa expectativa sobre a polarização de um fóton com a medição do outro. Só resta pois admitir (ii) e postular a existência de interacções de velocidade arbitrariamente grande.

Uma Realidade Incerta ⁽³⁾

Para um físico da tradição dos fundadores de Mecânica Quântica, Bohr, Heisenberg, Pauli, a crença que os fenómenos físicos são uma expressão directa da realidade autónoma acima referida é um preconceito metafísico não só desnecessário como inconveniente. A informação que temos sobre um sistema, resultado de medições prévias, é o estado do sistema. É evidente que uma medição feita numa dada região do espaço altera instantaneamente as nossas expectativas sobre resultados possíveis noutros locais. Quando o leitor recebeu este exemplar da Gazeta soube imediatamente que ele não estava em Londres, ou na Galáxia Andrómeda. Claro que neste caso o leitor pode concluir sem problemas que, mesmo antes de o receber, ele não estava nesses locais. Mas embora tal conclusão não seja legítima no caso dos fótons, é ainda, apenas, a nossa expectativa sobre o que pode ocorrer noutro local que se pode alterar devido a uma medição feita aqui. É a crença que essas expectativas traduzem a condição de uma realidade autónoma existente no contínuo do espaço e tempo que obriga a postular a existência de sinais de velocidade arbitrariamente grande.

Quer isto dizer que electrões, prótons, não são reais? O que um físico desta tradição reconhecerá é que se trata de conceitos úteis

(3) Com a devida vénia a Bernard D'Espagnat [9].

(fundamentais) na ordenação e sistematização da nossa experiência. Nesse sentido são tão reais como uma cadeira ou uma mesa ou o leitor. Sobre a questão da sua existência, autonomamente, fora do contexto da experiência humana e separada dos dispositivos experimentais que a revelam, Pauli pronunciou-se com a sua habitual franqueza: [10]

One should no more rack one's brains about whether something we cannot know anything about exists all the same than about the ancient question of how many angels can sit on the point of a needle.

Bohr [11] foi caracteristicamente mais cauteloso:

In our description of nature the purpose is not to disclose the real essence of phenomena but only to track down as far as possible relations between the multifold aspects of our experience.

Para muitos leitores estas afirmações parecerão imbuídas de um certo espírito de renúncia. Mas o objectivo da série de artigos que este encerra não teria sido atingida se o leitor não reconhecesse que esta «renúncia» é de algum modo imposta pelo próprio comportamento da Natureza. Não se pretende com isto afirmar que não tenham sido propostas alternativas à posição defendida pelos fundadores da Mecânica Quântica, habitualmente conhecida como «Interpretação de Copenhague». Mas nenhuma delas recolheu o consenso dos físicos e (talvez também por isso) nenhuma se revelou tão fecunda para o posterior desenvolvimento das aplicações da teoria quântica.

De qualquer modo, como se disse acima, o objectivo principal desta série de artigos não era a discussão dessas alternativas, mas sim mostrar que os conceitos e problemas levantados pelo comportamento quântico são extremamente delicados e subtis e só podem ser discutidos com uma constante referência à experiência. Só neste contexto é que o verda-

deiro significado dos conceitos que emergem da descrição quântica pode ser correctamente apreciado.

A Birrefringência da Calcite e a Polarização da Luz

Se dispuser de um cristal de calcite (forma romboédrica habitual) e de um polarizador linear faça a seguinte experiência:

Marque um ponto numa folha de papel. Assente uma face do cristal sobre a folha e espreite pela face oposta. Deve ver duas imagens. Rode o cristal. Como se movimentam elas? Seguidamente coloque o polarizador por cima do cristal de calcite. Espreite através dele e rode-o. Que conclusões pode tirar sobre a polarização correspondente às duas imagens? Experimente pôr o polarizador entre a folha de papel e o cristal de calcite. Rode o cristal de calcite (ou o polarizador). Que observa?

Esta experiência pode ser realizada como demonstração marcando o ponto numa transparência colocada sobre um retroprojector.

REFERÊNCIAS

- [1] ASPECT, A., GRANGIER, P., ROGER, G.—Phys. Rev. Lett., **49**, 91 (1982).
- [2] EINSTEIN, A., PODOLSKY, B., ROSEN, N.—Phys. Rev., **47**, 777 (1935).
- [3] LOPES DOS SANTOS, J. M. B.—Gazeta de Física, Vol. 12, 1 (1989).
- [4] BELL, J.—J. de Physique, Colloque C2, Suppl. n.º 3, **42**, 2 (1981).
- [5] BELL, J.—Physics, **1**, p. 195, 1965. Ver também o livro «*Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*», Cambridge University Press, Cambridge (1987).
- [6] STAPP, H. P.—Phys. Rev. **D3**, 1303 (1971).
- [7] ASPECT, A., DALIBARD, J., ROGER, R.—Phys. Rev. Lett., **49**, 1084 (1982).
- [8] TAROZZI, G., VAN DER MERWE (eds.)—«*Open Questions in Quantum Physics*», D. Reidel Dordrecht (1985).
- [9] D'ESPAGNAT, B.—«*Une incertaine réalité—Le monde quantique la connaissance et la durée*», Gauthiers Villars—Paris (1985).
- [10] PAULI, W.—«*Born-Einstein Letters*», Comentários de M. Born. Ed. Walker, N. Y. (1971).
- [11] BOHR, N.—«*Atomic Physics and the description of Nature*», Cambridge University Press (1934).