

Deus joga dados!

Fotónica e polarização quântica para todos

Horácio Fernandes^{1,*}, Marisa Correia², Emmanuel Zambrini Cruzeiro³, Ângela Costa⁴

¹Departamento de Física, Instituto Superior técnico, Universidade de Lisboa

²Escola Superior de Educação, Instituto Politécnico de Santarém

³Quantum Information and Quantum Optics Laboratory, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

⁴Escola Secundária Sebastião e Silva, Oeiras

hf@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

O jogo aqui descrito pode ser realizado quer num tabuleiro quer numa atividade com um grande de alunos, por exemplo na entrada de um anfiteatro, substituindo os peões-fotão por alunos-fotão. É uma forma divertida e informal de demonstrar o conceito probabilístico intrínseco à física quântica.

Segundo Einstein, “a teoria quântica produz um bom resultado, mas dificilmente nos aproxima do segredo do Criador. Estou, em todos os casos, convencido de que Ele não joga dados.” sic.

Mas o processo aleatório (estocástico) da física quântica será mesmo assim? Aparentemente quando jogamos aos dados ou à roleta sabemos que UMA jogada é completamente aleatória mas para GRANDES NÚMEROS conseguimos prever um valor médio: por exemplo, jogando com dois dados, se alguém aposta sempre no 7, ao fim de muitas jogadas, ganhará sobre qualquer outra aposta!

Por isso Einstein acredita que “Tudo é determinado, tanto o começo como o fim, por forças sobre as quais não temos controle... Todos dançamos numa melodia misteriosa, entoada à

distância por um invisível ‘jogador’.” e alega, mesmo aceitando um cariz aleatório para a mecânica quântica, que a física em algum ponto fica determinada... e se não fica é porque ainda desconhecemos algo sobre as suas *número* leis.

Vamos jogar.

Fundamentos do jogo

A luz tem uma natureza ondulatória e também quântica, pois conseguimos descrever os fenómenos físicos da luz interpretando-a como um conjunto de partículas.

Este jogo é baseado numa característica importante da luz, a sua polarização.

Os polarizadores são materiais que só se deixam atravessar para um determinado estado de polarização de cada fotão: se este estiver numa combinação de dois estados, por exemplo horizontal e vertical e se o virmos a atravessar um polarizador, então fica definido que ele tem a polarização da orientação desse polarizador. Ao pensarmos num único fotão, é interes-

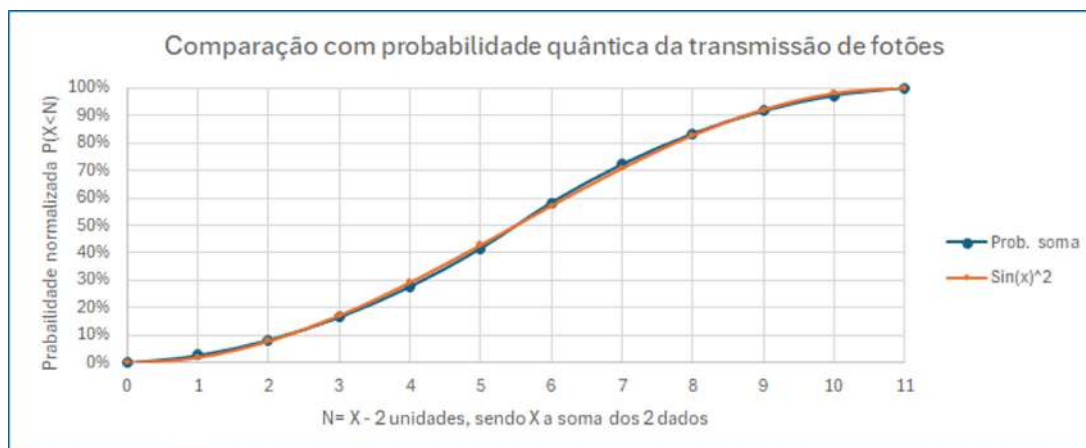


Figura 1 - Probabilidade quântica de absorção de um fóton por um polarizador de acordo com a polarização da luz e comparação com o lançamento de dois dados, dada a condição “maior do que a soma dos dados”. N é a soma dos pontos dos dados subtraída de 2 unidades para se obter $P(X < N)$.

te notar que essa passagem pelo polarizador tem uma certa probabilidade de ocorrer dependendo do ângulo da polarização inicial da luz com o eixo do polarizador. Esta probabilidade demonstra-se ser igual ao quadrado do cosseno desse ângulo. Na figura 1 temos a comparação entre esta probabilidade quântica com a probabilidade de obter determinada soma quando lançamos 2 dados: a semelhança é incrível!

Com dois dados torna-se mais fácil interpretar as probabilidades tal como descrito na tabela. Contudo, no nosso jogo jogaremos com 3 dados, por ser uma função simétrica em torno dos 50% de probabilidade.

Com efeito, se o polarizador estiver a 90° essa probabilidade é nula, ou seja toda a luz é bloqueada, e se estiver alinhado a 0° é 100 %, ou seja toda a luz passa. Para valores intermédios, neste jogo, faremos uma proporcionalidade entre o ângulo e os valores da soma de três dados que sabemos variar entre 3 e 18. Como os nossos dados não começam do zero, associaremos o valor 2 ao zero e o 18 aos 90° (figura 2). Deste modo, caso o fotão encontre um polarizador alinhado com o seu estado, o seu ângulo é 0° e, ao lançar os dados, obtemos um valor sempre superior a 2 pelo que o fotão nunca é absorvido pelo polarizador, ou seja, atravessa-o sempre. Pelo contrário, se estiver a 90° qualquer lançamento de dados nunca será superior a 18 e consequentemente nunca conseguirá atravessar o polarizador.

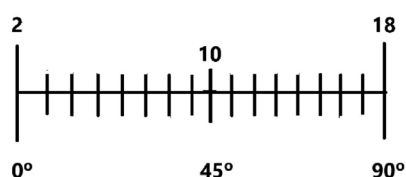


Figura 2 - Relação entre os ângulos da polarização da luz e o valor limite da soma dos dados. Por exemplo, para um ângulo de $22,5^\circ$ o fotão é transmitido se essa soma for superior a seis; para 0° todos serão transmitidos porque os dados somarão pelo menos 3!

Numa gama intermédia de valores faremos a respectiva proporcionalidade ou seja, um valor de 45° corresponderá a obter um lançamento superior a 10. Para ângulos inferiores essa exigência é menor, ou seja para $22,5^\circ$ será 6 e $11,25^\circ$ será 4.

O percurso óptico no tabuleiro

No jogo de tabuleiro¹ apresentam-se três percursos ou pistas (P2, P4 e P8) que atravessam simbolicamente 2, 4 ou 8 polarizadores. Consideramos ainda que os polarizadores dividem em partes iguais o ângulo reto, por exemplo, na pista P2 estão posicionados a 45° , na pista P4 cada um está desfasado 25° do seu antecedente e na pista P8 $11,25^\circ$ igualmente do antecedente. Daí a probabilidade de passagem variar de acordo com a figura 1. Em cada polarizador, o fotão-peão tem de lançar os dados para o atravessar e tentar atingir a chegada... ou ser rejeitado, sendo equivalente a ser absorvido no polarizador! Cada peão representa um fotão a viajar no espaço, atravessando um conjunto de polarizadores descritos como a condição de passagem no tabuleiro (♦). Três peões-fotão partem em simultâneo no início do jogo mas depois vão viajando independentemente,

criando a sua estatística própria, sendo esta apurada no final do jogo (figura 3). Ao atingirem um alvo são reposicionados na partida, recomeçando um novo percurso enquanto um fotão renascido.

As variantes do jogo

Este jogo é colaborativo entre um elevado número de participantes embora seja jogado individualmente à vez, e pretende demonstrar o cariz aleatório da física quântica. Quanto mais participantes jogarem melhor resulta a estatística e mais próximo estaremos do resultado físico expectável.

O tabuleiro

O jogo em tabuleiro pode ser realizado em várias mesas e tabuleiros e somando os resultados no final, garantindo um maior envolvimento de uma turma em pequenos grupos.

Cada jogador fica responsável por gerir um determinado número de peões-fotão (em princípio um mas pode haver variantes ao jogo em que cada jogador joga em pistas simultâneas) e associa-os a uma pista: P2, P4 ou P8.



Figura 3 - Alunos em grupos de 3 elementos a jogar no Instituto Politécnico de Santarém e a estabelecer a estatística.

¹ http://www.elab.tecnico.ulisboa.pt/wiki/index.php?title=Deus_joga_dados!

Preenchendo a tabela seguinte, podemos calcular a razão entre os peões-fotão que atravessaram a cascata de "polarizadores" e o total de fotões em jogo por cada percurso óptico inicial. No exemplo, dados obtidos pelos alunos do Instituto Politécnico de Santarém comparados com o resultado teórico expectável entre parênteses.

Percurso	Absorvidos	Transmitidos	Total	% Transmitidos
Pista P2	185	71	256	28% (25%)
Pista P4	34	81	115	70% (68%)
Pista P8	7	45	52	87% (86%)

Tabela 1 - Razão entre os peões-fotão que atravessaram a cascata de "polarizadores" e o total de fotões em jogo por cada percurso óptico inicial.

Após o jogo, (i) poder-se-á realizar uma experiência no laboratório controlado remotamente do elab onde existe uma experiência real com múltiplos polarizadores, comprovando experimentalmente os resultados obtidos para o percurso com dois e quatro polarizadores (ii) ou recorrer a uma folha de cálculo com a simulação do jogo.

Cenário teatral alternativo

Numa situação de elevada disponibilidade de alunos, o jogo pode ser recriado teatralmente, por exemplo à entrada de um anfiteatro. Nesse caso, os "polarizadores" são alunos numa fileira de mesas que oferecem os dados para os colegas lançarem e estes, em função da soma dos dados, poderão (i) passar, se a soma for maior do que o valor indicado (4, 6 ou 10) transitando para o "polarizador" seguinte ou (ii) poderão ser excluídos se não conseguirem satisfazer essa condição (figura 4).

Formam-se 3 filas paralelas à entrada com 2, 4 ou 8 *alunos-*



Figura 4 - Exemplo de um percurso óptico à entrada do anfiteatro para uma sessão sobre física quântica, onde os *alunos-fotão* lançam a sua sorte cada vez que avançam pelos *alunos-polarizador*.

-*polarizador* por mesa e cada um destes alunos está equipado com 3 dados e uma folha de registo. Convém designar igualmente as três zonas marcantes do jogo (i) zona da partida (onde

se concentram todos dos restantes alunos que vão funcionar como "fotões"); serão os *alunos-fotão*; (ii) zona da chegada dos *alunos-fotão* que atravessam todos os polarizadores; e (iii) zona da chegada dos *alunos-fotão* rejeitados. Ao passar pelos polarizadores, os *alunos-fotão* recebem um papel colorido, de cor diferente no caso de terem atravessado todos os polarizadores ou de terem sido rejeitados; as cores variam consoante o seja a fila de 2, 4 ou 8 polarizadores. No final, os alunos colocam os papéis em provetas, permitindo "medir" a evolução do jogo (figura 5).



Figura 5 - Final de uma partida com a coleção em provetas dos resultados de cada aluno que transitou no respetivo "percurso óptico" antes da entrada num anfiteatro na escola secundária Sebastião e Silva, em Oeiras.

Nesta interpretação do jogo cada *aluno-polarizador* tem uma folha de registo com a condição de passagem, 3 dados e um copo para os lançar. Em cada pista a condição de passagem é proporcional ao ângulo, sendo utilizada a condição "maior do que" de acordo com o ângulo entre polarizadores. Para a pista de 2 polarizadores (P2) essa condição é >10 , para P4 usa-se >6 e para P8 >4 .

- 0\ Cada *aluno-fotão* escolhe uma pista a seguir;
- 1\ Dirige-se então ao primeiro *aluno-polarizador*;
- 2\ Este *aluno-fotão* faz a pergunta "Dá licença?"
- 3\ O *aluno-polarizador* dá-lhe os dados para lançar uma primeira vez: de acordo com a soma dos dados e de acordo com a condição dessa mesa decide (i) rejeitar o *aluno-fotão* se a soma dos dados for inferior ou igual a esse valor designado ou (ii) manda-o avançar para a mesa seguinte caso a soma dos dados seja superior.
- 4.1\ Se o *aluno-fotão* for rejeitado adiciona uma contagem na respetiva proveta;
- 4.2\ Se o *aluno-fotão* for aprovado e prosseguir para a casa do *aluno-polarizador* seguinte o jogo prossegue para si e repete-se até ter conseguido ultrapassar todas as mesas dos *alunos-polarizador*;

No final da entrada de todos os alunos, apuram-se os resultados através dos registos efetuados pelos *alunos-polarizadores*, sendo declarados publicamente.

Conclui-se a demonstração fazendo a experiência do paradoxo dos 3 polarizadores e "brinca-se" com polarizadores² (por exemplo, tamanho 20 cm x 20 cm).

² https://www.informationphilosopher.com/solutions/experiments/dirac_3-polarizers/

Discussão

D2/D1	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
2	3	4	5	6	7	8
3	4	5	6	7	8	9
4	5	6	7	8	9	10
5	6	7	8	9	10	11
6	7	8	9	10	11	12

Tabela 2 - Probabilidades no lançamento de dois dados; neste exemplo são contadas as ocorrências superiores a 4, com uma probabilidade de 30/36.

A ideia subjacente deste jogo é que quanto mais polarizadores houver a dividir o ângulo reto e consequentemente o ângulo entre eles for menor, mais alunos conseguem ultrapassar a cascata de polarizadores, pelo que o jogo deve ser jogado com um número variável de alunos-polarizador. O jogo pode ser jogado igualmente com ângulos variados, por exemplo estando 100% alinhados com o polarizador anterior e aí o fóton passa sempre (porque sai pelo menos 3 nos dados e a condição de ângulo zero é ser superior ou igual a 2).

Nesta experiência é importante salientar a semelhança entre a probabilidade discreta, obtida pelo lançamento dos dados e a probabilidade do evento quântico, dada pelo quadrado do seno. Com efeito, a tabela de probabilidades dos eventos do lançamento de dois dados reportada à sua soma é sempre uma função crescente mas não exatamente igual. Com os três dados ainda se afasta ligeiramente mais mas ainda é adequada para efeitos da compreensão do fenómeno quântico subjacente ao jogo.

Conclusão

Este jogo de dados permite de uma forma lúdica interpretar o paradoxo de Dirac, tratando-se de uma atividade que coloca o aluno no centro do processo de aprendizagem, conduzindo-o a participar e refletir, relacionando as ações e resultados do jogo, com os fenómenos físicos (quânticos) e com os resultados experimentais da experiência remota do elab.

Paralelamente pode ser utilizada a folha de cálculo disponibilizada para fazer a simulação da transmissividade de vários polarizadores, e através da criação de variantes ao jogo, pode-se comprovar a teoria para vários ângulos. Note-se que no jogo parte-se da quadratura entre o ângulo inicial e o último polarizador para ilustrar o paradoxo de Dirac mas tal não é obrigatório, a experiência online pode ser livremente simulada para quaisquer ângulos.

Por último, existe a hipótese de utilizar a simulação oferecida pelo quantum@UC disponível online e onde se compreende imediatamente a fenomenologia do processo.



Horácio Fernandes é professor associado do departamento de física do IST e investigador no Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear onde coordena a atividade do tokamak ISTTOK. Em 1999 criou o elab, laboratório remoto do IST, com acesso livre. Mantém igualmente uma regular participação em divulgação científica. Foi membro do "Technical Advisory Panel" da agência europeia para o ITER (F4E) e investigador coordenador de uma atividade de pesquisa da IAEA. Presentemente é membro da comissão de "física para o desenvolvimento" no seio da IUPAP.



Marisa Correia é professora no Instituto Politécnico de Santarém (Escola Superior de Educação). Licenciada em Ensino da Física e da Química, Mestre em Educação pela Faculdade de Ciências - Universidade de Lisboa (FCUL) e Doutorada em Educação em Ciências pelo Instituto de Educação - Universidade de Lisboa (IE-UL). Pós-graduada em Educação e Tecnologias Digitais pelo Instituto de Educação - Universidade de Lisboa. Realizou um programa de Pós-Doutoramento no IE-UL, no âmbito do Projeto GoSTEM, financiado pela FCT. Coordena a Área Científica Educação para a Qualidade no Centro de Investigação em Qualidade de Vida (CIEQV). Coordena o programa de pós-graduação em Educação STEAM.



Emmanuel Zambrini Cruzeiro é professor no Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (D.E.E.C.) do Instituto Superior Técnico. Coordena o grupo de Física da Informação Quântica, e o laboratório de Fotónica Quântica no Instituto de Telecomunicações. Investiga fundamentos de física quântica e as suas diversas aplicações, nomeadamente em tecnologias da informação.



Ângela Costa é professora na Escola Secundária Sebastião e Silva, em Oeiras. Licenciada em Ensino de Física e Química - Variante de Física pela FCUL e mestre em Física para o Ensino pela Universidade de Évora. Integra o grupo de Avaliação e Certificação de Manuais Escolares de Físico e Química da FCUL e tem desenvolvido atividades didáticas e projetos, alguns dos quais apresentados em Encontros e Festivais de Ciência.