

V13/04

REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR
CASA DAS CIÊNCIAS

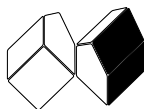
DEZEMBRO 2025

EDIÇÃO ESPECIAL

100 anos da Mecânica Quântica



REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR



FICHA TÉCNICA

Rev. *Ciência Elem.*, V13(03)

Publicação trimestral
da Casa das Ciências

ISSN 2183-9697 (versão impressa)

ISSN 2183-1270 (versão online)

rce.casadasciencias.org

DEPÓSITO LEGAL

425200/17

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Alexandra Coelho

DESIGN

Rui Mendonça

PAGINAÇÃO

Raul Seabra

IMAGEM NA CAPA

Mecânica Quântica (IA)

João Nuno Tavares

© Todo o material publicado nesta revista pode ser reutilizado para fins não comerciais, desde que a fonte seja citada.



PROPRIETÁRIO

Casa das Ciências/ICETA

Faculdade de Ciências,

Universidade do Porto

Rua do Campo Alegre, 687

4169-007 Porto

rce@casadasciencias.org

CORPO EDITORIAL DA REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR

EDITOR

João Nuno Tavares (UNIVERSIDADE DO PORTO)

CONSELHO EDITORIAL

Alexandre Lopes Magalhães (UNIVERSIDADE DO PORTO)

Jorge Manuel Canhoto (UNIVERSIDADE DE COIMBRA)

Paulo Ribeiro-Claro (UNIVERSIDADE DE AVEIRO)

José Cidade Mourão (INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO)

Rute Coimbra (UNIVERSIDADE DE AVEIRO)

Sónia Gouveia (UNIVERSIDADE DE AVEIRO)

José Francisco Rodrigues (UNIVERSIDADE DE LISBOA)

João Lopes Santos (UNIVERSIDADE DO PORTO)

PRODUÇÃO e SECRETARIADO

Alexandra Coelho

Guilherme Monteiro

Raul Seabra

NORMAS DE PUBLICAÇÃO NA RCE

A Revista de Ciência Elementar dirige-se a um público alargado de professores do ensino básico e secundário, aos estudantes de todos os níveis de ensino e a todos aqueles que se interessam pela Ciência. Discutirá conceitos numa linguagem elementar, mas sempre com um rigor superior.

INFORMAÇÃO PARA AUTORES E REVISORES

Convidam-se todos os professores e investigadores a apresentarem os conceitos básicos do seu labor diário numa linguagem que a generalidade da população possa ler e compreender.

Para mais informação sobre o processo de submissão de artigos, consulte a página da revista em rce.casadasciencias.org



**CASA DAS
CIÊNCIAS**

FUNDAÇÃO BELMIRO DE AZEVEDO

DEZEMBRO 2025

V13/04

Índice

- 02 AGENDA
- 03 NOTÍCIAS
- EDITORIAL
- 05 **O Centenário da Mecânica Quântica – Um Século de Paradigmas e Promessas.**
João Nuno Tavares
- ARTIGOS
- 07 **O Princípio de sobreposição.**
J. M. B. Lopes dos Santos
- 13 **Desigualdades de Bell.**
João Nuno Tavares
- 19 **A interpretação quântica da experiência de MALUS/DIRAC.**
E. Zambrini Cruzeiro *et al.*
- 23 **Entrelaçamento quântico e não localidade.**
João Nuno Tavares
- 28 **A experiência de Malus/Dirac no elab e a natureza quântica da luz.**
P. A. Mendes Rossa *et al.*
- 33 **Computação quântica com partículas de luz.**
Sara Franco, Leonardo Novo
- 38 **Realismo e localidade.**
João Nuno Tavares
- 43 **Dos paradoxos de Zenão ao universo quântico.**
João Nuno Tavares
- BIOGRAFIA
- 48 **Erwin Schrödinger.**
João Nuno Tavares

11/11⁽²⁰²⁵⁾
a 04/01⁽²⁰²⁶⁾

Exposição LOBO2526GLER

A dupla Gémeo Luís (ilustrador) e Eugénio Roda (escritor) trabalha em conjunto há mais de 25 anos, criando livros para a infância que abordam temas variados com dimensões sociais, científicas, estéticas e éticas. Entre esses temas destaca-se o Lobo, que deu origem a um projeto multidisciplinar com oficinas, palestras, edições e instalações.

A exposição agora apresentada reúne uma seleção de textos e ilustrações e pretende refletir sobre a relação dos humanos com a própria espécie e com outras – abordando problemas como perseguição, estigmas e desinformação, mas também proteção e valorização. O espaço é pensado como um local de conversa, sensibilização e encontro interdisciplinar.

GALERIA DA BIODIVERSIDADE – CENTRO CIÊNCIA VIVA – PORTO

Quartas-feiras

Seminário Filosofia e História das Ciências

O ciclo de Seminários "[Filosofia e História das Ciências](#)" promovido pela Casa das Ciências, irá de férias e regressará a 18 de fevereiro com novas palestras com o objetivo de discutir temas de Ciência e Filosofia das Ciências.

Para participar *via online* a inscrição é obrigatória.

CASA DAS CIÊNCIAS

07/07
a 09/07⁽²⁰²⁶⁾

XI Encontro Casa das Ciências

Marque já os dias 7+8 e 9 de julho de 2026 na sua agenda! O Encontro Casa das Ciências regressa à Cidade Berço para 3 dias de formação.

Estamos a preparar um programa aproveitando o facto de Guimarães ser Capital Verde em 2026, com o tema aglutinador Por Cidades de um só Planeta: Mobilidade, Sustentabilidade, Recursos e Governança no Contexto Educativo

Esteja atento em casadasciencias.org porque em janeiro regressamos com novidades, com todo o programa disponível para consulta e oficinas para escolher.

GUIMARÃES – CC VILA FLOR E E.S. MARTINS SARMENTO

XI Encontro anual da Casa das Ciências. “Por Cidades de um só Planeta: Mobilidade, Sustentabilidade, Recursos e Governança no Contexto Educativo” Guimarães, Capital Verde 2026



FIGURA 1. Paço-dos-Duques-de-Bragança.
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guimaraes-Portugal_Paço-dos-Duques-de-Bragança-02_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guimaraes-Portugal_Paço-dos-Duques-de-Bragança-02_(cropped).jpg)

A Casa das Ciências vai realizar o XI Encontro, subordinado ao tema “Por Cidades de um só Planeta: Mobilidade, Sustentabilidade, Recursos e Governança no Contexto Educativo”, na cidade de Guimarães, de 7 a 9 de julho de 2026, no âmbito das comemorações Guimarães – Capital Verde 2026. O evento destina-se essencialmente a professores do ensino básico e secundário e pretende capacitar docentes para integrar práticas de Economia Verde nos currículos e na vida escolar, promovendo projetos locais de impacto ambiental, social e económico.

O contexto da distinção de Guimarães como Capital Verde Europeia em 2026 constitui um momento catalisador e um desígnio coletivo que visa sensibilizar cada cidadão para a promoção de hábitos e práticas de gestão sustentável de recursos. Reconhecendo que, na atualidade, a nossa pegada ecológica exige recursos

que excedem a capacidade de regeneração do planeta – e que seriam necessários vários planetas para sustentar os padrões atuais de consumo –, a transição para modelos de vida sustentáveis requer uma mobilização educativa profunda e duradoura. Esta transformação exige décadas de educação intencional e focada para que as mudanças comportamentais e as práticas ajustadas se efetivem.

Neste enquadramento, a temática da “Cidade Sustentável” – que engloba as dimensões cruciais da mobilidade, da sustentabilidade ambiental, da economia verde e da governança – deve emergir como um pilar fundamental da prática docente.

Este encontro, que tem um forte componente de formação acreditada, propõe, assim, que a educação para a cidadania global, o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e as exigências curriculares vigentes sejam elementos centrais e articulados em todas as salas de aula.

Confirmada teoria central da mecânica quântica



FIGURA 1. Teoria central da Mecânica Quântica.
Imagem de Pixabay.

Físicos chineses conseguiram reproduzir, com uma precisão inédita, um teste proposto por Albert Einstein em 1927, confirmando que duas propriedades fundamentais de uma

partícula não podem ser medidas simultaneamente sem interferência mútua.

A experiência, agora descrita na *Physical Review Letters*, reforça de forma rigorosa o princípio da complementaridade formulado por Niels Bohr, que sustentava que a medição do caminho de um fóton e a observação do seu padrão de interferência são mutuamente exclusivas. Segundo os revisores da publicação, o estudo representa “uma contribuição significativa” e constitui mesmo “uma realização de manual”, por demonstrar experimentalmente uma ideia que durante décadas permaneceu apenas no domínio conceptual. A equipa responsável, liderada pelo físico Pan Jianwei, uma das figuras centrais da investigação quântica na China, desenvolveu um sistema suficientemente sensível para detetar o impulso microscópico que um único fóton transmite ao atravessar uma dupla fenda — ponto crucial do argumento de Einstein, que nunca havia sido medido diretamente.

De acordo com o *South China Morning Post*, os investigadores utilizaram um átomo de rubídio, arrefecido até temperaturas próximas do zero absoluto e suspenso por luz laser para simular uma parede móvel. Quando o átomo estava pouco confinado, deslocava-se ligeiramente ao passar o fóton, permitindo deduzir a sua trajetória, mas destruindo o padrão de interferência. Quando o átomo era mantido firmemente preso, o padrão reaparecia, mas a trajetória tornava-se impossível de determinar.

O resultado confirma de forma clara a visão de Bohr: conhecer o caminho exato elimina o comportamento ondulatório, e preservar a interferência significa abdicar dessa informação. Embora princípios semelhantes já tivessem

sido observados noutras experiências, os autores destacam a precisão excecional do novo sistema, que poderá abrir caminho ao estudo de fenómenos pouco explorados, como a interação entre entrelaçamento e medição, com aplicações possíveis em tecnologias quânticas mais estáveis.

Pan Jianwei tem desempenhado um papel decisivo no avanço da física quântica chinesa, estando associado ao primeiro satélite de comunicações quânticas do país, a protótipos de computadores quânticos e a relógios óticos de alta precisão. O novo estudo não resolve as questões interpretativas da mecânica quântica, mas constitui uma verificação experimental particularmente rigorosa da impossibilidade de observar simultaneamente o caminho e o padrão de interferência de um fóton.

O Centenário da Mecânica Quântica – Um Século de Paradigmas e Promessas.

Caros leitores,

No ano corrente de 2025, assinala-se uma data de excepcional relevância: o centenário da Mecânica Quântica. Esta efeméride convida-nos a refletir sobre uma teoria que, emergindo de uma profunda crise da física clássica, não apenas redefiniu os alicerces da nossa compreensão do universo, mas também se tornou a pedra angular da tecnologia contemporânea e o motor de uma nova era de inovação. Este número é, assim, integralmente dedicado à exploração da Mecânica Quântica e das Tecnologias Quânticas emergentes.

A génese da Mecânica Quântica, há um século, representou uma das mais radicais revoluções intelectuais da história da humanidade. Perante as limitações da física clássica na descrição do comportamento da matéria e da energia à escala atómica e subatómica, um conjunto de cientistas visionários – entre os quais se destacam Albert Einstein, Max Planck, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Niels Bohr e Max Born – formulou um novo edifício teórico.

A Mecânica Quântica não só desvendou os mistérios do átomo, como também nos confrontou com uma realidade onde a probabilidade e a não-localidade desempenham um papel central, alterando irreversivelmente a nossa perspetiva epistemológica sobre a natureza. Foram os princípios da Mecânica Quântica que permitiram o desenvolvimento de tecnologias que hoje são indissociáveis do nosso quotidiano. Os semicondutores, base de toda a microeletrónica, os lasers, cruciais para as telecomunicações, a medicina e a indústria, e as tecnologias de imagiologia médica como a ressonância magnética nuclear, são apenas alguns exemplos paradigmáticos de como a compreensão do mundo quântico se traduziu em avanços tecnológicos de impacto global. A vida moderna, tal como a conhecemos, seria inconcebível sem estas conquistas da física quântica.

Estamos agora a testemunhar e a participar ativamente naquilo que é amplamente designado como a segunda revolução quântica. Esta nova fase explora o controlo e a manipulação de fenómenos quânticos individuais – como a sobreposição e o entrelaçamento – para desenvolver tecnologias com capacidades sem precedentes. As Tecnologias Quânticas prometem-nos computadores com um poder de processamento inimaginável (a computação quântica), sistemas de comunicação intrinsecamente seguros (a criptografia quântica),

sensores ultrasensíveis capazes de detetar variações mínimas em campos magnéticos ou elétricos, e até mesmo novos materiais com propriedades exóticas. O impacto destas tecnologias poderá ser tão profundo ou ainda mais disruptivo do que o da primeira revolução quântica, abrindo novos horizontes em áreas como a medicina, a inteligência artificial, a exploração espacial e a energia.

Para assinalar este centenário, e fomentar o diálogo em torno dos seus avanços e desafios, a Casa das Ciências organizou nos dias 22 e 23 de outubro, nas instalações da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), um ciclo de palestras que reuniu especialistas de diversas áreas para abordar a importância da Mecânica Quântica e o potencial das Tecnologias Quânticas, proporcionando um fórum de excelência para a partilha de conhecimento e inspiração de futuras gerações.

Complementarmente, e com o intuito de aprofundar a compreensão dos fundamentos conceptuais e os dilemas filosóficos que a Mecânica Quântica suscitou e continua a suscitar, a Casa das Ciências lançou uma série de *Podcasts*, disponíveis nas plataformas habituais. Estes episódios oferecem uma exploração detalhada das ideias que moldaram a nossa perspetiva sobre a realidade física, desde os seus primórdios até às questões mais atuais.

Este número da revista, inteiramente dedicado à temática da Mecânica Quântica e das Tecnologias Quânticas, procura capturar a essência desta jornada científica de um século. Esperamos que os artigos aqui apresentados não só iluminem os conceitos fundamentais e as aplicações práticas, mas também inspirem a curiosidade e o entusiasmo pela ciência, particularmente entre as novas gerações. A Mecânica Quântica, mesmo após um século, mantém-se como um campo de investigação vibrante, repleto de desafios conceptuais e de promessas tecnológicas por desvendar. Que a sua profundidade e as suas implicações continuem a impulsionar-nos na busca incessante do conhecimento.

Boa leitura e uma excelente viagem ao mundo quântico!

João Nuno Tavares

Coordenador da Casa das Ciências

O Princípio de sobreposição.

J. M. B. Lopes dos Santos

CF-UM-UP | DFA/ U. Porto

Hoje em dia anunciam-se curas quânticas, terapias de energia, de bio *feedback* ou de ressonância quânticas, técnicas de meditação quânticas, jóias quânticas, etc.. No cinema, explica-se a invisibilidade por um “deslocamento de fase quântica”^a. O adjetivo “quântico” transporta uma aura de mistério, quase de magia, mas ao mesmo tempo confere respeitabilidade científica a qualquer patranha destinada a extrair dinheiro a incautos: “se é quântico, deve ser sério!” Neste breve artigo, prosaicamente, tentarei apresentar a essência do que é “ser quântico”. Há mistério e espanto suficiente na verdade da natureza, sem necessidade de qualquer mistificação.

Parábola da Fábrica Quântica.

Começamos com uma curta parábola sobre uma fábrica quântica da qual podemos encomendar quatro tipos de objetos, distinguidos por duas propriedades:

COR: azul ou vermelha (A, V)

FORMA: triângulos ou quadrados (T, Q)

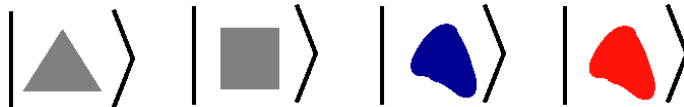


FIGURA 1. Os quatro objetos do catálogo da Fábrica.

A nossa primeira encomenda é de 100 objetos de COR azul. Recebida a encomenda, quise-mos verificar se estava em ordem. Para isso dispomos de um medidor de COR, ilustrado na FIGURA 2.

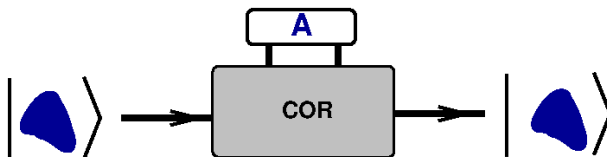


FIGURA 2. Medidor de cor.

Passando os objetos do lote pelo aparelho, podemos verificar que o mostrador indica sempre A . O processo pode ser usado para todos os quatro tipos de objetos porque, além do medidor de COR, temos também um medidor de FORMA. Se uma propriedade é física, pode ser medida.

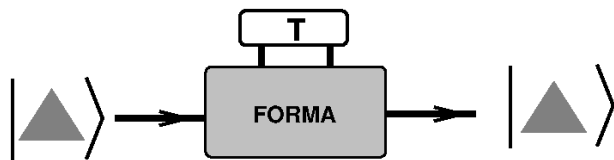


FIGURA 3. Uma encomenda de TRIÂNGULOS verificada.

A curiosidade leva-nos agora a investigar a FORMA dos objetos da nossa primeira encomenda. Para isso, usamos o medidor de FORMA no lote de 100 A ; o resultado é que perto de metade são T e a outra metade Q . Estes resultados ocorrem de maneira aleatória e sem qualquer ordem perceptível. Exatamente o mesmo se passa com encomendas de objetos de tipo V . A COR é previsivelmente vermelha, mas em medições de FORMA obtemos o mesmo resultado que para objetos de COR A .

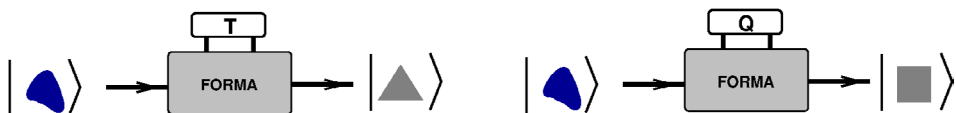


FIGURA 4. A medição de FORMA de um lote A revela cerca de metade T e metade Q .

Algo semelhante se passa com as encomendas de objeto de FORMA T (ou Q): em medições de COR obtemos perto de metade de objetos de cada cor possível.

Nesta altura interrogamos-nos: será que poderemos encomendar objetos com FORMA e COR definidas, representados por $|\blacktriangle\rangle$, $|\blacksquare\rangle$, $|\blacktriangle\rangle$, ou $|\blacktriangle\rangle$? Resolvemos encomendar um lote de (T, V) , (TRIÂNGULOS, VERMELHOS). A resposta da fábrica é surpreendente: não só não podem fornecer tal lote, como defendem que ninguém pode, porque tais objetos não existem.

Vemos imediatamente uma oportunidade de inovação. Porque não encomendar um lote de COR V e usar um medidor de FORMA, para selecionar desse lote apenas os T ? Dito e feito, assim procedemos e selecionamos cerca de metade dos objetos do lote V , aqueles cuja FORMA foi medida como T . Mas será assim tão fácil? Os nossos medidores vendem-se em qualquer loja. Porque é que a fábrica se recusou a cumprir a encomenda?

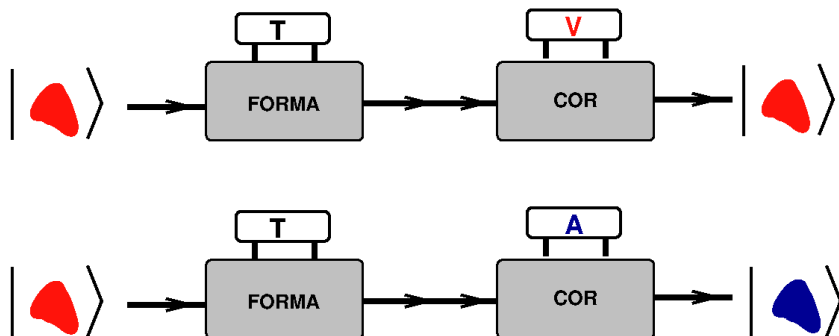


FIGURA 5. Se selecionarmos a FORMA de um objeto de COR vermelha, deixamos de conhecer a sua COR. As duas alternativas representadas ocorrem com igual frequência.

Esta dúvida leva-nos a investigar a COR dos objetos selecionados e a compreender a dificuldade da fábrica. De um modo imprevisível, cerca de metade dos objetos selecionados com a FORMA T permanecem V , mas outros tantos são agora A . Continuando a investigação, procurando outros processos de medir FORMA e COR, encomendando da concorrência, etc., somos levados à mesma conclusão que a fábrica: não existem objetos em que tenhamos, em simultâneo, a definição das duas variáveis físicas, FORMA e COR.

Variáveis incompatíveis.

Esta pequena parábola ilustra um comportamento da Natureza que está no cerne da distinção entre a Mecânica Quântica e a Física Clássica (Relatividade Geral e Restrita, incluídas). A FORMA e a COR são duas grandezas físicas, que, neste exemplo, só têm dois valores possíveis. Poder-se-ia pensar que, só por aí, dada a natureza discreta desta variáveis, já estamos no domínio quântico. Mas não é a distinção entre grandezas discretas e contínuas que nos importa aqui. Existem modelos puramente clássicos em que podemos definir variáveis discretas. O que se verifica neste exemplo da FORMA e COR é que estas variáveis são incompatíveis. Qualquer tentativa de preparar um sistema de modo a ter valores definidos de duas variáveis incompatíveis, como COR e FORMA, está votado ao fracasso, pura e simplesmente porque tais sistemas não existem na natureza. A existência de variáveis físicas incompatíveis é a essência da Física Quântica. Na Física Clássica não há grandezas físicas incompatíveis. Se os nossos objetos fossem clássicos não teríamos dificuldade em encontrá-los num dos quatro estados de COR e FORMA definidas, $\{|A, T\rangle, |A, Q\rangle, |V, T\rangle, |V, Q\rangle\}$. Sendo estas variáveis incompatíveis, só temos ou estados de COR definida $\{|A\rangle, |V\rangle\}$ ou de FORMA definida $\{|T\rangle, |Q\rangle\}$.

Para ver, com um mínimo de rigor, como é que a Mecânica Quântica trata esta situação teremos de introduzir uma característica extra dos objetos quânticos da parábola. Nada do que dissemos até agora exclui a possibilidade de uma terceira propriedade dos objetos, compatível com uma das anteriores. Podia acontecer que a TEXTURA, uma grandeza com dois valores, R (rugoso) e M (macio), ao contrário da FORMA, fosse compatível com COR. A fábrica poderia fornecer dois lotes distintos de objetos A : um lote com textura R e outro com textura M . Seriam distinguíveis por medição de TEXTURA, mas numa medição de COR dariam o resultado A com probabilidade 1. Esta é certamente a situação mais geral, pois o valor de uma única grandeza raramente chega para caracterizar o estado de um objeto físico. Porém, para simplificar, vamos supor que não existe nenhuma variável compatível com COR (ou com FORMA), ou seja, não é possível refinar a caracterização física de um objeto para além de especificar a COR ou a FORMA. Este exemplo simples é suficiente para explicar o princípio da sobreposição, o modo como se lida nas teorias quânticas com a incompatibilidade de grandezas. A propósito, a situação destas variáveis de ficção, FORMA e COR, é exatamente a que verifica entre duas componentes do spin de um eletrão ou de dois estados de polarização de um fóton. Não é incomum encontrar teorias quânticas exatamente com esta forma.

Seja como for, com esta simplificação, não é possível distinguir dois objetos de um lote de COR definida. Seguramente não pela medição de FORMA, pois se o fizermos deixamos de ter

objetos de COR definida. Dizemos que um objeto de lote azul está num estado quântico $|A\rangle$ e do lote vermelho no estado $|V\rangle$. Indicar um destes dois estados é dar uma descrição completa do objeto, que não é passível de especificação adicional. Do mesmo modo, há dois estados $|T\rangle$ e $|Q\rangle$ para objetos de lotes de FORMA definida, cada um dos quais estabelece a caracterização mais completa possível do estado do objeto.

Resta saber qual é a relação entre estes dois pares de estados, associados a variáveis incompatíveis.

Princípio de Sobreposição.

A fábrica fornece-nos um objeto num destes 4 estados $\{|A\rangle, |V\rangle, |T\rangle, |Q\rangle\}$ sem dizer qual. Podemos escolher entre medir a COR ou a FORMA. Se optarmos pela segunda e obtivermos T , concluímos que o estado não era $|Q\rangle$, $-|Q\rangle$ e $|T\rangle$ são realmente distintos —, mas não conseguimos determinar se o estado era $|T\rangle$, $|A\rangle$ ou $|V\rangle$; o objeto podia estar no estado $|T\rangle$, ou ter COR definida, $|A\rangle$ ou $|V\rangle$, uma vez que estes dois estados podem dar o mesmo resultado que $|T\rangle$ numa medição de FORMA, com probabilidade de 50%. O estado $|A\rangle$ é em parte o estado $|T\rangle$ e em parte o estado $|Q\rangle$. Na linguagem da mecânica quântica, o estado $|A\rangle$ é uma sobreposição quântica dos estados $|T\rangle$ e $|Q\rangle$. O mesmo podemos dizer do estado $|V\rangle$ uma vez, que numa medição de FORMA ele pode, tal como $|A\rangle$, dar o mesmo resultado que $|T\rangle$, ou que $|Q\rangle$.

O mesmo se passa se escolhermos medir COR: o resultado será sempre A ou V , mesmo que o estado inicial seja $|T\rangle$ ou $|Q\rangle$. Por outras palavras, os estados $|T\rangle$ e $|Q\rangle$ são sobreposições quânticas de $|A\rangle$ e $|V\rangle$.

É muito possível que o leitor já tenha ouvido falar da computação quântica e tenha lido a explicação que, enquanto num computador clássico um *bit* — sistema com dois estados apenas como no nosso exemplo — só pode ter os valores 0 ou 1, num computador quântico pode estar numa sobreposição arbitrária destes dois valores. O que esta explicação deixa de fora, e que o nosso exemplo ilustra, é que todos os estados quânticos, incluindo 0 e 1, são sobreposição de outros estados.

A Teoria Quântica de FORMA e COR.

Para completar o tratamento quântico desta situação, vamos ter de usar um pouco mais de matemática do que nas secções anteriores.

A Mecânica Quântica trata os estados como vetores. O leitor está familiarizado com vetores no espaço, representados por segmentos orientados com direção, sentido e módulo. As operações fundamentais sobre vetores são a soma, $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$, multiplicação por um número real (por um escalar), $\vec{c} = \lambda\vec{a}$, e o produto interno (ou produto escalar), $\vec{a} \cdot \vec{b} = ab \cos(\theta)$. O conceito de vetor, em matemática, generaliza-se a quaisquer conjuntos nos quais possam ser definidas estas operações^b. Se os estados são vetores, podem multiplicar-se por escalares — que em mecânica quântica são números complexos — e podem somar-se para definir novos estados. Essa é a expressão matemática do princípio de sobreposição.

Da discussão anterior resulta que qualquer estado se pode escrever como sobreposição de $|A\rangle$ e $|V\rangle$, porque, na medição de COR, dá o mesmo resultado que um dos estados $|A\rangle$ ou $|V\rangle$:

$$|\Psi\rangle = a|A\rangle + b|V\rangle \quad (1)$$

O mesmo se aplica a $|T\rangle$ e $|Q\rangle$

$$|\Psi\rangle = c|T\rangle + d|Q\rangle \quad (2)$$

Os escalares (a, b) e (c, d) são designados como amplitudes de probabilidade e têm o seguinte significado: $|a|^2$, é a probabilidade de o estado $|\Psi\rangle$ ser o estado $|A\rangle$ numa medição de COR, $|b|^2$ a probabilidade de ser $|V\rangle$ e assim sucessivamente.

As nossas observações sobre FORMA e COR podem ser traduzidas por

$$|T\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|A\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|V\rangle \quad (3)$$

e

$$|Q\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|A\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|V\rangle \quad (4)$$

Somando e subtraindo estas suas equações facilmente as invertemos para obter

$$|A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|T\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|Q\rangle \quad (5)$$

$$|V\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|T\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|Q\rangle, \quad (6)$$

o que dá conta dos resultados de medições de FORMA em estados de cor definida. Tal como afirmado no final da secção anterior, qualquer dos 4 estados da parábola é sobreposição de dois estados distintos.

Notas finais.

1. Da mesma maneira que a fábrica produz lotes de um dado estado, pode criar um lote em que metade dos objetos sejam $|A\rangle$ e metade sejam $|V\rangle$, em sequência aleatória. Em que medida é que o estado da equação (3) se distingue dessa possibilidade? Numa medição de COR os resultados com tal lote ou com um lote no estado da equação (3) seriam idênticos. Porém essas duas situações dão resultados muito diferentes numa medição de FORMA. Um objeto de um lote no estado $|A\rangle$ ou no estado $|V\rangle$ tem igual probabilidade de ter FORMA T ou Q . Por isso um lote com uma mistura de $|A\rangle$ e $|V\rangle$ mostra ter metade das vezes FORMA T e metade Q ; mas o estado da equação (3) tem sempre FORMA T e nunca Q . A sobreposição de estados é um estado, para o qual existe uma ou mais medições cujo resultado é perfeitamente definido. Um

mistura de estados, como a que foi descrita acima, inclui além da incerteza inerente à natureza quântica das variáveis incompatíveis, uma incerteza clássica, relacionada com o desconhecimento do estado em que objeto se encontra.

2. Dizemos que as amplitudes de cada componente do estado da equação (3) – $(1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$ –, na medição de FORMA, interferem construtivamente para o resultado T e destrutivamente para o resultado Q . Para amplitudes $(1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2})$ da equação (4) verifica-se o oposto. O sinal relativo das amplitudes da sobreposição^c é fisicamente relevante, não apenas o respetivo quadrado do módulo, a probabilidade.

3. Uma palavra sobre a função de onda de Schrödinger, $\psi(\vec{r})$. Tem exatamente a mesma natureza que as amplitudes a e b da equação (1). Só que em vez de uma sobreposição de dois estados de COR definida, refere-se a um contínuo de estados de POSIÇÃO definida, $\{|\vec{r}\rangle, \vec{r} \in R^3\}$. Daí vem a interpretação e Born de $|\psi(\vec{r})|^2$ como densidade de probabilidade de posição. Tal como no exemplo da parábola, isso não esgota o significado da função de onda. Por exemplo, só certas funções de onda correspondem a estados em que a grandeza física ENERGIA – incompatível com POSIÇÃO – tem um valor definido. A equação de Schrödinger serve precisamente para encontrar esses estados.

4. A discussão sobre os objetos provenientes da fábrica quântica baseou-se na afirmação de que não existem objetos com COR e FORMA definidas em simultâneo. A especificação de COR (ou de FORMA) é uma especificação tão completa como possível e por essa razão a FORMA de um objeto de COR definida é imprevisível. Mas será isto verdade? Podíamos conceber que dois objetos de COR definida poderiam ser distinguidos por uma outra variável (por exemplo, $S = \pm 1$), cujo valor determinaria a FORMA, mas que, por alguma razão, fosse inacessível à experiência: a fábrica não consegue produzir objetos de COR definida sempre com o mesmo valor de S , e não existem medidores de S que permitam escolher dos objetos de uma dada COR os que tem um dado valor de S – se existissem, a fábrica poderia usá-los para criar objetos de COR e S definidos. S é uma variável escondida. A discussão sobre esta questão merece um outro artigo. Aqui apontaremos apenas que a descrição quântica não tem variáveis escondidas. Em vez disso reconhece a possibilidade de as grandezas físicas manifestas serem incompatíveis. Além disso, John Bell, em 1964, provou que certas experiências particulares, feitas com pares de objetos quânticos arbitrariamente distantes, permitem distinguir as previsões da Mecânica Quântica de qualquer teoria que assuma que os resultados de medições sobre cada um dos objetos do par seja determinado, ainda que desconhecido, pelas tais variáveis escondidas. As experiências até hoje realizadas confirmaram sempre, de modo inequívoco, as previsões da Mecânica Quântica. Mas isso é assunto para outra história.

Notas

^a VERHOEVEN, P., *Hollow Man*. 2000.

^b Em rigor, o produto interno não é necessário para definir vetores; mas é o que permite a introdução das noções de ângulos e distâncias para vetores abstratos.

^c Ou fase relativa no caso de amplitudes complexas.

Desigualdades de Bell.

João Nuno Tavares

U.Porto

Em 1964, num artigo notável, John Bell propôs uma desigualdade que teria que ser satisfeita por qualquer teoria que tivesse os dois atributos – localidade e realidade. Vamos tentar explicar o que isto significa.

Na ausência de experiências concretas para testar os aspectos de realidade e localidade da mecânica quântica, o debate sobre os fundamentos da mecânica quântica manteve-se durante muito tempo no âmbito da Filosofia. Também nada se concluiu sobre se a inclusão de “variáveis ocultas” (ou auxiliares) na descrição da mecânica quântica poderia torná-la completa, isto é, numa teoria determinística como, por exemplo, a mecânica Newtoniana.

A situação mudou drasticamente em 1964, quando John Bell propôs uma desigualdade que teria que ser satisfeita por qualquer teoria que tivesse os dois atributos – localidade e realidade.

Essa desigualdade envolve quantidades experimentalmente mensuráveis e, portanto, oferece a possibilidade de testar experimentalmente se a mecânica quântica satisfaz essa desigualdade. Se a viola, então concluímos que a mecânica quântica não satisfaz, ou o atributo da localidade, ou o da realidade.

$$\begin{aligned} \text{localidade e realidade} &\Rightarrow \text{desigualdade de Bell} \\ \text{violação da desigualdade de Bell} &\Rightarrow \text{não localidade ou não realidade} \end{aligned} \tag{1}$$

A Desigualdade de Bell (na forma Clauser–Horne–Shimony–Holt (CHSH)) demonstra matematicamente a incompatibilidade entre o realismo local e as previsões da mecânica quântica. Inspirada na simplicidade da chamada “Máquina de Mermin”, que vamos descrever, a dedução clássica assume que as partículas possuem propriedades predefinidas (realismo) que não são influenciadas instantaneamente por medições distantes (localidade).

Essa dedução estabelece um limite para as correlações que podem ser observadas num universo regido pelo realismo local. A mecânica quântica, por outro lado, ao descrever o comportamento de partículas entrelaçadas, prevê correlações que violam este limite, uma previsão consistentemente confirmada por inúmeras experiências. Esta violação tem implicações profundas, indicando que a natureza é inerentemente não-local ou não-realista, forçando-nos a questionar a nossa intuição clássica sobre a natureza da realidade, a localidade e a objetividade das propriedades físicas.

1. A Crise da Intuição Clássica.

Desde o seu nascimento, a mecânica quântica desafiou as nossas concepções mais fundamentais sobre a realidade. Albert Einstein, uma das mentes mais brilhantes do século XX, sentia-se profundamente desconfortável com a ideia de que a natureza poderia ser fundamentalmente probabilística e com o que ele chamava de “ação fantasmagórica à distância” (em inglês, *spooky action at a distance*). Esta expressão referia-se ao fenómeno do entrelaçamento (*entanglement*), onde duas partículas parecem estar intrinsecamente ligadas, independentemente da distância que as separa.

No famoso artigo EPR de 1935 (Einstein–Podolsky–Rosen), Einstein e seus colaboradores argumentaram que a mecânica quântica era uma teoria incompleta. Eles propuseram que deveria haver “variáveis ocultas” — informações adicionais e mais profundas sobre as partículas, que a mecânica quântica não descrevia — e que, se conhecidas, eliminariam a necessidade de qualquer “fantasmagoria”. Essencialmente, eles defendiam a ideia de realismo local:

- Realismo: As partículas possuem propriedades bem definidas antes de serem medidas. A medição apenas revela essas propriedades, não as cria.
- Localidade: Nenhuma influência física pode viajar mais rápido que a velocidade da luz. A medição de uma partícula não pode influenciar instantaneamente o estado de outra partícula distante.

Se o realismo local fosse verdadeiro, o universo funcionaria de uma maneira mais intuitiva, onde tudo tem uma causa local e propriedades predefinidas.

O Desafio de John Bell.

Foi John Bell, em 1964, quem transformou esta disputa filosófica numa questão experimentalmente testável. Bell demonstrou que se o realismo local fosse verdadeiro, as correlações observadas em certas experiências (envolvendo pares de partículas entrelaçadas) deveriam obedecer a um limite matemático — as desigualdades de Bell. Se a mecânica quântica estivesse correta, e o entrelaçamento fosse uma característica fundamental da realidade, então essas desigualdades seriam violadas.

2. Introdução: O Paradoxo e a Máquina de Mermin.

A “Máquina de Mermin” é uma ferramenta conceptual poderosa, criada por N. David Mermin, para tornar a prova da Desigualdade de Bell mais acessível e intuitiva, especialmente na sua versão CHSH (Clauser–Horne–Shimony–Holt).

O que Bell demonstrou é que, sob as premissas de realismo local (as propriedades das partículas são predefinidas independentemente da medição, e a medição de uma não afeta instantaneamente a outra), a correlação observada entre os resultados de Alice e Bob deve satisfazer

certas desigualdades. A mecânica quântica, no entanto, prevê que para estados entrelaçados, essas desigualdades podem ser violadas.

Vamos nos focar na Desigualdade de CHSH (Clauser–Horne–Shimony–Holt), uma das formas mais populares e testáveis da Desigualdade de Bell.

3. Configuração da Experiência (Máquina de Mermin).

Suponhamos Alice e Bob são dois cientistas situados em galáxias distantes, sem possibilidade de comunicação. Eles recebem pares de partículas, A e B (por exemplo, fótons ou elétrons), que foram criadas juntas numa fonte central e emitidas em direção a dois detectores, um operado por Alice e outro por Bob. (FIGURA 1).

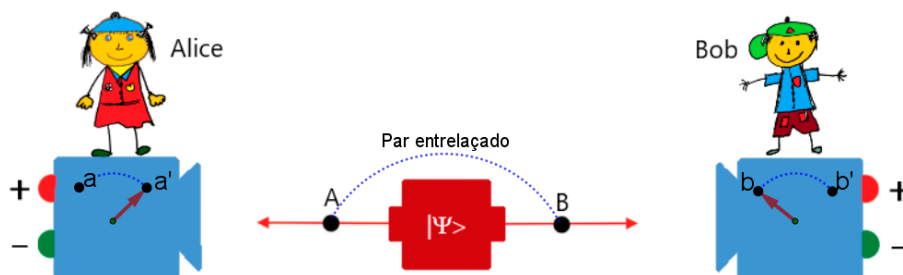


FIGURA 1. Máquina de Mermin. Duas partículas A e B são preparadas num estado de entrelaçamento quântico. A partícula A viaja até Alice que dispõe de um aparelho que lhe permite medir o valor \pm (lâmpadas vermelha e verde, respetivamente) de cada um de dois atributos binários independentes, a , a' . O mesmo se passa com Bob que recebe a partícula B . O ponteiro do mostrador indica o atributo que se mede, e as lâmpadas vermelha e verde, no lado das caixas, quando acendem, indicam o valor do atributo medido. Por exemplo, na figura o aparelho de Alice está a medir o atributo a .

Alice tem um detetor com dois ponteiros que medem dois possíveis atributos binários: a e a' , cada um dos quais pode tomar apenas dois valores possíveis: $+$ ou $-$, indicados pelo acender, respetivamente, de uma lâmpada vermelha (valor $+$) ou de outra verde (valor $-$). Bob tem um detetor com uma configuração completamente análoga à de Alice, mas com dois outros atributos binários b e b' .

Alice e Bob realizam as suas medições de forma independente e não podem comunicar entre si durante o experiência. Eles apenas comparam os seus resultados, e medem as correlações entre os seus resultados após um grande número de ensaios.

4. Derivação Clássica (Assumindo Realismo Local).

Vamos agora usar o que Mermin nos ensinou: se as partículas são “clássicas” e obedecem ao realismo local, o que podemos esperar?

1. Realismo (Variáveis Ocultas): Cada partícula, ao ser emitida, já “sabe” os resultados dos seus atributos, mesmo antes de eles serem medidos pelos detetores. Por outras palavras, o resultado de qualquer medição é predeterminado por alguma variável oculta λ , que representa as propriedades preexistentes de ambas as partículas, antes de qualquer medição.

- A partícula, A de Alice já possui um valor $a_A(\lambda) \in \{-1, +1\}$, para a medição do atributo a , e um valor $a'_A(\lambda) \in \{-1, +1\}$ para a medição de a' .
- O mesmo acontece com a partícula de Bob – ela já possui um valor $b_B(\lambda) \in \{-1, +1\}$ para a medição de b , e um valor $b'_B(\lambda) \in \{-1, +1\}$ para a medição de b' .

2. Localidade: O resultado da medição de um atributo da partícula de Alice depende apenas desse atributo e da variável λ , e o mesmo acontece para a partícula de Bob. Isto é, os resultados obtidos pelo detetor de Alice em nada influenciam os obtidos pelo detetor de Bob, e vice-versa. Não há comunicação instantânea ou “ação fantasmagórica”.

Consideremos agora a seguinte quantidade para cada ensaio individual:

$$S_{\text{clássico}}(\lambda) = a_A(\lambda)b_B(\lambda) + a_A(\lambda)b'_B(\lambda) + a'_A(\lambda)b_B(\lambda) - a'_A(\lambda)b'_B(\lambda) \quad (2)$$

Podemos reescrever esta expressão fatorizando os termos:

$$S_{\text{clássico}}(\lambda) = a_A(\lambda)[b_B(\lambda) + b'_B(\lambda)] + a'_A(\lambda)[b_B(\lambda) - b'_B(\lambda)]$$

Como $b_B(\lambda)$ e $b'_B(\lambda)$ só podem ser $+1$ ou -1 , os termos entre parênteses têm valores limitados:

- Se $b_B(\lambda) = b'_B(\lambda)$, então $[b_B(\lambda) - b'_B(\lambda)] = 0$, e $[b_B(\lambda) + b'_B(\lambda)] = \pm 2$.
- Se $b_B(\lambda) \neq b'_B(\lambda)$, então $[b_B(\lambda) + b'_B(\lambda)] = 0$, e $[b_B(\lambda) - b'_B(\lambda)] = \pm 2$.

Em qualquer um dos casos, um dos parênteses é 0 e o outro é ± 2 . Portanto, a expressão para $S_{\text{clássico}}(\lambda)$ torna-se:

$$S_{\text{clássico}}(\lambda) = a_A(\lambda)(\pm 2) \text{ ou } S_{\text{clássico}}(\lambda) = a'_A(\lambda)(\pm 2)$$

Como $a_A(\lambda)$ e $a'_A(\lambda)$ também são ± 1 , o valor absoluto de $S_{\text{clássico}}(\lambda)$ para qualquer λ é:

$$|S_{\text{clássico}}(\lambda)| = |(\pm 1)(\pm 2)| = 2$$

Agora, consideremos o valor esperado (ou média) desta quantidade calculada com muitos ensaios. Se $p(\lambda)$ é a distribuição de probabilidade da variável oculta λ (que desconhecemos), que, por simplicidade, supomos ser discreta:

$$\langle S_{\text{clássico}} \rangle = \sum_{\lambda} S_{\text{clássico}}(\lambda)p(\lambda)$$

Tomando o valor absoluto da média:

$$|\langle S_{\text{clássico}} \rangle| = \left| \sum_{\lambda} S_{\text{clássico}}(\lambda)p(\lambda) \right|$$

Sabemos que $|S_{\text{clássico}}(\lambda)| \leq 2$ para cada λ . Assim,

$$|\langle S_{\text{clássico}} \rangle| \leq \sum_{\lambda} |S_{\text{clássico}}(\lambda)| p(\lambda) \leq \sum_{\lambda} 2p(\lambda) = 2 \sum_{\lambda} p(\lambda) = 2 \times 1 = 2$$

Portanto, a Desigualdade de Bell (CHSH) para teorias de realismo local é:

$$|\langle S_{\text{clássico}} \rangle| \leq 2 \quad (3)$$

Esta é a Desigualdade de Bell (CHSH). Ela nos diz que, se o universo for governado por realismo local, as correlações medidas entre Alice e Bob nunca podem exceder o valor de 2.

Desigualdade de Bell (CHSH) Clássica:

$$|\langle S_{\text{clássico}} \rangle| = |\langle a_A b_B \rangle + \langle a_A b'_B \rangle + \langle a'_A b_B \rangle - \langle a'_A b'_B \rangle| \leq 2$$

Onde $\langle x_A y_A \rangle$ é o valor esperado do produto dos resultados de Alice (para o atributo x) e Bob (para o atributo y).

5. Previsão da Mecânica Quântica.

Agora, vamos calcular o valor esperado da mesma quantidade usando a mecânica quântica, para um par de partículas entrelaçadas.

Suponhamos que as medições de Alice e Bob correspondem a operadores de spin $x_A = x \cdot \sigma_A$ e $y_B = y \cdot \sigma_B$, onde $x_A = a, a'$ e $y_B = b, b'$ são vetores unitários que representam as direções segundo as quais se mede o spin pelos detectores detectores, e $\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ são as matrizes de Pauli

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}; \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Os resultados das medições são ± 1 (spin UP e DOWN).

Consideremos agora um estado entrelaçado (singleto), como o estado de Bell:

$$|\Phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \quad (5)$$

Este é um estado maximamente entrelaçado, onde as propriedades de spin das duas partículas estão perfeitamente correlacionadas, mas indefinidas individualmente até à medição.

Os atributos que vão ser medidos pelo detector de Alice (a, a'), e pelo de Bob (b, b'), correspondem a medir o spin das partículas em direções específicas no espaço, definidas por vetores unitários a, a' para Alice e b, b' para Bob.

Para a equação (5), o valor esperado do produto das medições é:

$$\langle x_A \otimes y_B \rangle = \langle \Phi | (x \cdot \sigma_A) \otimes (y \cdot \sigma_B) | \Phi \rangle = x \cdot y = \cos(\theta_{xy}) \quad (6)$$

onde θ_{xy} é o ângulo entre as direções de medição.

Assim, o valor esperado da quantidade S na mecânica quântica é:

$$\begin{aligned}\langle S_{\text{quântico}} \rangle &= \langle a_A b_B \rangle + \langle a_A b'_B \rangle + \langle a'_A b_B \rangle - \langle a'_A b'_B \rangle \\ &= \langle a \cdot b + a \cdot b' + a' \cdot b - a' \cdot b' \rangle\end{aligned}\quad (7)$$

Para maximizar este valor, podemos escolher as direções dos vetores unitários de forma estratégica. Uma escolha comum é:

- a ao longo do eixo x (ângulo 0°): $a = (1, 0)$,
- a' ao longo do eixo y (ângulo 90°): $a' = (0, 1)$,
- b a 45° do eixo x : $b = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$,
- b' a -45° do eixo x : $b' = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right)$

Os respectivos produtos escalares são:

$$\begin{aligned}a \cdot b &= (1)(1/\sqrt{2}) + (0)(1/\sqrt{2}) = 1/\sqrt{2} \\ a \cdot b' &= (1)(1/\sqrt{2}) + (0)(-1/\sqrt{2}) = 1/\sqrt{2} \\ a' \cdot b &= (0)(1/\sqrt{2}) + (1)(1/\sqrt{2}) = 1/\sqrt{2} \\ a' \cdot b' &= (0)(1/\sqrt{2}) + (1)(-1/\sqrt{2}) = -1/\sqrt{2}\end{aligned}$$

Substituindo estes valores na expressão para $\langle S_{\text{quântico}} \rangle$:

$$\langle S_{\text{quântico}} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} - \left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \right) = \frac{4}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2}$$

O valor máximo para a mecânica quântica é:

$$|\langle S_{\text{quântico}} \rangle| = 2\sqrt{2} \approx 2,828$$

6. Conclusão: Violação da Desigualdade de Bell.

Comparando os dois resultados, obtemos:

- Realismo Local: $|\langle S_{\text{clássico}} \rangle| \leq 2$
- Mecânica Quântica: $|\langle S_{\text{quântico}} \rangle| = 2\sqrt{2} \approx 2,828$

Claramente, $2\sqrt{2} > 2$.

Isso significa que as previsões da mecânica quântica violam a Desigualdade de Bell.

A interpretação quântica da experiência de MALUS/DIRAC.

E. Zambrini Cruzeiro^{*,‡}, P. Yadav^{*,‡}, H. Fernandes^{+,#}

^{*}QPI/IT | [‡]QIQOL/IST | ⁺IST/U. Lisboa | [#]IPFN

Neste artigo estudamos uma série de experiências, susceptíveis de serem realizadas (thought experiments, ou Gedankenexperiments) com luz, que nos permite introduzir conceitos fundamentais de mecânica quântica. Foi de facto graças à luz que nasceu a física quântica, com o conceito de “pacote de energia”, ou partícula. As experiências que abordaremos podem ser descritas e interpretadas de duas maneiras diferentes, as duas opções levando aos mesmos resultados. Uma das histórias que podemos contar é mais apelativa à intuição humana - uma visão mais clássica - por falar apenas de objetos comuns ao nosso dia-a-dia, neste caso ondas. A segunda interpretação, quântica, torna-se necessária quando queremos entender o que se passa ao nível microscópico, partícula a partícula. Esta série de experiências oferece uma comparação direta entre as duas descrições, criando uma ponte entre o mundo macroscópico e o microscópico.

O próprio Dirac estudou as experiências descritas abaixo, e relatou as suas conclusões no livro “The principles of quantum mechanics”. Esclarece três pontos importantes. O primeiro é que a descrição quântica nos diz que um fóton pode estar em vários estados simultaneamente, no sentido discutido mais abaixo. A interpretação quântica traz-nos, portanto, este fenómeno contraintuitivo, sem oferecer uma descrição do que se passa ao nível de um fóton individual (está “num estado e noutra”? Num “estado ou noutra”?). No entanto, Dirac argumenta que o trabalho da ciência não é oferecer uma história, ou ilustração, mas de descrever fenómenos naturais. No segundo ponto, Dirac comenta que apesar desta experiência ser simples e da interpretação quântica não trazer nada de mais em termos de previsões, é uma boa maneira de ganhar intuição sobre como a mecânica quântica funciona. Finalmente, o autor comenta que tentarmos abstrair-nos do determinismo da física clássica pode levar-nos a situações paradoxais, ou no mínimo, pouco intuitivas. Neste artigo, vamos explicar em detalhe os argumentos de Dirac, mostrando de facto que esta experiência tem valor pedagógico no que toca a explicar a mecânica quântica.

Princípio de superposição.

O princípio de sobreposição, formulado primeiramente por Dirac, é uma forma de dizer que, para prever as correlações observadas no mundo quântico, nós precisamos de todos os vetores que descrevem o espaço de situações fisicamente possíveis, os observáveis, e a sobreposição desses vetores também corresponde a uma solução para dois ou mais estados quânticos. Matematicamente, este princípio resulta da linearidade da equação de Schrödinger.

O primeiro ponto do Dirac é que o facto desta experiência poder ser descrita classicamente não reduz o interesse na sua descrição quântica. De facto, o trabalho da física é oferecer histórias/descrições que corroborem a realidade experimental. Ter várias interpretações para uma experiência e poder compará-las é de grande valor pedagógico. Realmente hoje em dia a mecânica quântica é muito bem compreendida, ao ponto de sermos capazes de criar nova tecnologia baseada nela. No entanto, a interpretação do que a mecânica quântica nos diz sobre a realidade é fonte inesgotável de discussões entre matemáticos, físicos e filósofos.

Comecemos pela base: esta experiência é baseada numa propriedade da luz, a chamada polarização. A polarização da luz é uma característica física da radiação com uma interpretação “clássica” baseada no eletromagnetismo. Por exemplo, no caso de luz polarizada linearmente, descrevemos a luz como uma onda que oscila numa só direção do espaço, tal como na FIGURA 1. Classicamente, se uma onda polarizada verticalmente atravessa um polarizador orientado a 45° , a interpretação clássica consiste em dizer que metade da onda passa, metade é refletida ou absorvida. No entanto, se a luz é constituída de partículas, a partícula ou passa ou não passa. A interpretação do que acontece microscopicamente é o que chamaremos a interpretação “quântica”.

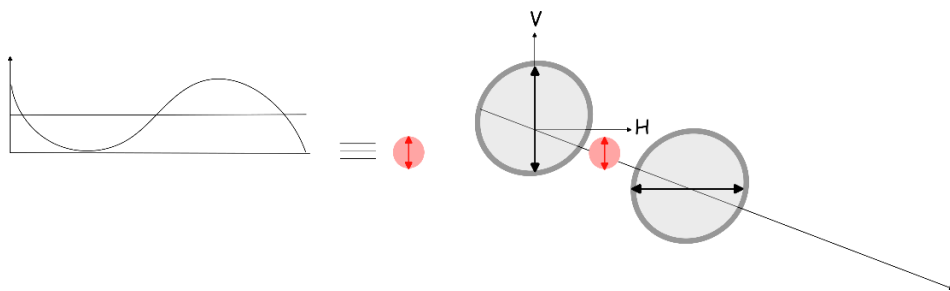


FIGURA 1. Ilustração de uma sequência de dois polarizadores lineares orientados perpendicularmente. A luz inicialmente não-polarizada torna-se polarizada verticalmente aquando da passagem pelo primeiro polarizador. Um fóton orientado verticalmente tem 0% de probabilidade de ser transmitido por um polarizador orientado horizontalmente.

As duas interpretações permitem explicar o “aparente paradoxo dos três polarizadores” atendendo à lei de Malus^{1,2}. O “paradoxo” é baseado na comparação de duas experiências: 1) uma cascata de dois polarizadores, orientados a 90° um do outro, 2) uma cascata de três polarizadores, o primeiro e o terceiro com uma orientação relativa de 90° , e o segundo introduzido com uma orientação de 45° relativamente ao primeiro e ao terceiro polarizador. Na primeira

experiência, a luz não passa através da sequência de polarizadores. Poderíamos, ingenuamente, assumir que o que um polarizador faz é apenas bloquear a luz. No entanto, ao introduzirmos o terceiro polarizador entre os dois primeiros, vemos luz à saída da cascata! Nesse caso, perdemos 25% da intensidade da luz. Se introduzirmos o polarizador a 45° antes ou depois de dois polarizadores a 90° , não observamos luz.

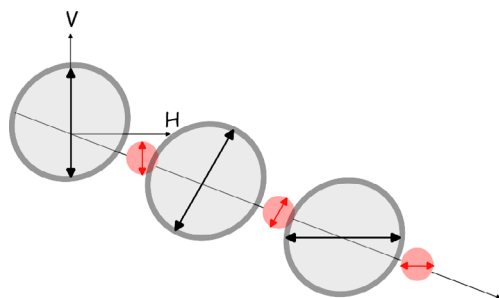


FIGURA 2. A experiência dos três polarizadores.

A interpretação clássica diz-nos o seguinte. Ao passar pelo polarizador 1, perdemos metade da luz, porque esta, sendo não-polarizada, contém uma mistura igual de luz polarizada horizontal e verticalmente. A luz estando agora polarizada verticalmente, contém luz polarizada a 45° e luz polarizada a -45° em quantidades iguais, portanto ao passar no polarizador 2 perdemos novamente metade da luz. E o mesmo acontece com o polarizador 3. Portanto no final ficamos com 12.5% intensidade de luz inicial. Se o ângulo for menor, perde-se menos luz. Portanto se tivermos uma série infinita de polarizadores, teremos uma transmissão cada vez mais perto de 50%, isto porque o primeiro polarizador retira 50% da luz. Alternativamente, podemos considerar que a intensidade inicial de luz é a intensidade a seguir ao primeiro polarizador, nesse caso com a série infinita teremos 100% da luz a passar.

No caso microscópico, uma partícula ou passa por um polarizador, ou não passa. Temos, portanto, não uma intensidade de luz à saída, mas uma probabilidade de observar um fóton à saída da cascata de polarizadores. A teoria da física quântica não nos oferece uma descrição "direta" do que se passa com cada partícula, mas permite-nos calcular as probabilidades com precisão. Como fazer sentido da interpretação quântica desta experiência?

Dois ingredientes básicos da mecânica quântica são os estados das partículas, que especificam a informação contida num sistema físico, e as medições (observações). As medições: 1) Extraem informação sobre o estado da partícula, 2) perturbam o estado, transformando-o.

Consideremos cada fóton incidindo nos polarizadores. Os polarizadores assumem o papel de observações, ou medições. Especificamente, podemos imaginar que o fóton está em dois estados possíveis, cada um com a sua probabilidade, um alinhado com o ângulo do polarizador, e um perpendicular. Ao chegar ao polarizador, o fóton ou assume o estado alinhado com o polarizador e muda de polarização (salto quântico), ou adota o estado perpendicular e é absorvido. Este processo é uma medição quântica. Medições a nível quântico perturbam, portanto, o estado da

partícula. Isso é intuitivo: se eu tentar observar algo tão frágil como uma partícula, vou perturbá-la. Portanto o polarizador altera o estado do fóton a quando da sua passagem, de facto o fóton assume um estado polarizado alinhado com o polarizador pelo qual passou. A perturbação do estado será maior se o ângulo entre o estado do fóton e o ângulo do polarizador for maior. Ao introduzirmos o terceiro polarizador, fazemos com que a perturbação seja menor a cada passagem pelo polarizador, o que leva à saída de uma maior quantidade de luz. Se introduzirmos múltiplos polarizadores, reduzindo o ângulo relativo entre os dois polarizadores, conseguiremos aumentar a quantidade de luz transmitida.

O primeiro polarizador cria o estado inicial: vertical por exemplo. O último polarizador, com o detetor de luz, constitui uma medição final, no fundo uma pergunta: "o fóton está no estado horizontal?". A resposta é "sim" se repetirmos a experiência e observarmos um fóton à saída desse polarizador com 100% de probabilidade. Se tivermos só dois polarizadores orientados a 90 graus, o estado inicial será vertical, e, portanto, a resposta à medição final é "não" com 100% de probabilidade, visto que os estados são ortogonais. Se tivermos mais polarizadores entre o primeiro e o último, esses polarizadores vão agir como uma medição "fraca" (ângulo pequeno) e vão rodando o estado. Quanto mais polarizadores, o ângulo relativo entre o último e o penúltimo polarizador torna-se tão pequeno que a luz é efetivamente horizontal a quando da medição final. O facto de perturbar pouco, tendo múltiplos polarizadores com ângulos pequenos, implica que a perturbação no estado dos fótons é pequena, o que explica porque conseguimos ter uma transmissão de 100% para um número infinito de polarizadores. No fundo, rodámos polarização do fóton sem o destruir. Este tipo de medições chama-se medição quântica não-destrutiva, e tem aplicações muito interessantes, tais como analisar sistemas biológicos com luz, suscetíveis de serem danificados ao absorverem demasiada luz.

A interpretação quântica.

Vamos descrever o estado de polarização da luz como um vetor bi-dimensional, tal como ilustrado na FIGURA 3. Luz polarizada verticalmente corresponde a um vetor que aponta para cima $(0,1)$, e se for horizontal corresponde a $(1,0)$. Usamos a notação de Dirac para representar estes vetores, $|V\rangle$ e $|H\rangle$ respetivamente. Um vetor arbitrário escreve-se

$$|\alpha\rangle = \cos \alpha |H\rangle + \sin \alpha |V\rangle$$

A mecânica quântica explica como calcular: 1) a probabilidade de transmissão destes estados através de um polarizador, e 2) o estado à saída do polarizador. A quando da passagem do estado $|V\rangle$ pelo segundo polarizador, orientado a 45° , temos que:

1. A probabilidade de transmissão é dada por

$$P = |\langle V | P(45^\circ) | V \rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

onde $P(45^\circ) = |45^\circ\rangle \langle 45^\circ|$.

Entrelaçamento quântico e não localidade.

Ações fantasmagóricas à distância.

João Nuno Tavares

U. Porto

ARTIGO

23

Neste curto artigo, vamos descrever, e tentar explicar (?!), um dos fenómenos mais desconcertantes da Mecânica Quântica — o Entrelaçamento Quântico.

Neste artigo, discutiremos o “mistério quântico” seguinte — a existência (ou não) na Natureza de ações instantâneas fantasmagóricas (spooky) à distância. Foi assim que Albert Einstein as designou no famoso artigo “*Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*”, publicado em colaboração com Boris Podolsky, e Nathan Rosen, na revista *Physical Review*, em 1935.

Mas o que significa “ação” neste contexto? Se existem estas ações, em que consistem? Numa transferência instantânea de matéria?, numa transferência instantânea de energia?, numa transferência instantânea de mensagens?, ou numa transferência instantânea de informações? Além disso:

- Se existem ações instantâneas à distância, isso não contradiz a ideia de que “nada pode andar mais rápido do que a luz”, como afirma a teoria da relatividade?
- Se a mecânica quântica mostra que a mente age diretamente sobre a matéria, tais ações à distância permitem a telepatia?

1. Entrelaçamento quântico.

A sobreposição quântica é um mistério. Porque é que o estado quântico de uma partícula há-de ser uma sobreposição linear de estados? Acontece que a mecânica quântica tem ainda outro mistério — aquele que ocorre como consequência de estados de sobreposição que envolvem duas ou mais partículas — o chamado Entrelaçamento quântico, que é como vamos traduzir a designação inglesa “*Quantum Entanglement*”.

Experiência motivadora.

Vamos começar com um exemplo simples, para motivar a discussão. Imaginemos o seguinte:

Temos duas caixas idênticas, fechadas e lacradas. Dentro de uma dessas caixas está uma bola preta e dentro da outra está uma bola branca. Ninguém sabe qual a caixa que contém a bola preta e qual a que contém a branca. E o mais importante — a mecânica quântica sugere que, na verdade, a cor da bola em cada caixa não está definida até que alguém abra a caixa e observe a cor da bola lá contida. É como se cada bola estivesse numa espécie de “névoa” (sobreposição) de ser preta e branca ao mesmo tempo, mas de tal forma que as duas bolas (uma em cada uma das duas caixas) têm sempre cores opostas.

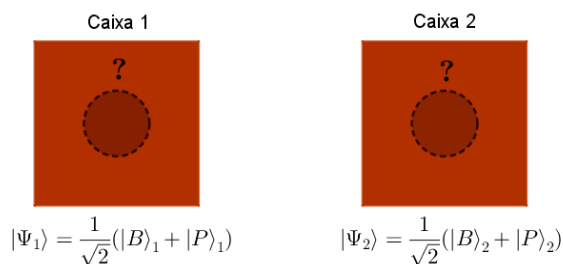


FIGURA 1. Estado de cada um das caixas individualmente.

Mas se a bola de cada caixa está numa sobreposição de branca e preta, o que significa dizer que têm sempre cores opostas?

Boa pergunta! A resposta vai permitir perceber melhor o que está em jogo, e porque é o entrelaçamento é tão contra-intuitivo, mas ao mesmo tempo tão fascinante!

A chave para a resposta está em como descrevemos o estado do PAR de caixas (ou partículas), e não apenas o estado de cada caixa individualmente (FIGURA 1). De facto, no momento em que as caixas são preparadas, o par de bolas está num estado específico — elas têm cores opostas. Essa é a correlação que está “embutida” no sistema desde o início. Quando falamos de sobreposição, estamos a dizer que o PAR está numa sobreposição de duas possibilidades (estados):

- Possibilidade 1: Caixa 1 tem Bola Preta e Caixa B tem Bola Branca
- Possibilidade 2: Caixa 2 tem Bola Branca e Caixa B tem Bola Preta.

O estado do PAR é uma “mistura” ou “névoa de possibilidades” dessas duas opções (FIGURA 2). Ambas as possibilidades existem simultaneamente até ao momento da medição. O PAR de caixas e bolas formam pois um sistema conjunto que está numa sobreposição de duas possibilidades correlacionadas.

Isto é completamente diferente de dizer que “a Caixa 1 tem bola preta e branca” e “Caixa 2 tem bola preta e branca”. Mais à frente seremos mais formais ao descrever esta diferença crucial.

Portanto, a frase “têm sempre cores opostas”, refere-se à correlação fundamental que define o estado entrelaçado do PAR. A sobreposição refere-se ao facto de que, individualmente, as cores não estão definidas antes da medição. É a sobreposição dessas combinações correlacionadas que faz o entrelaçamento ser tão peculiar.

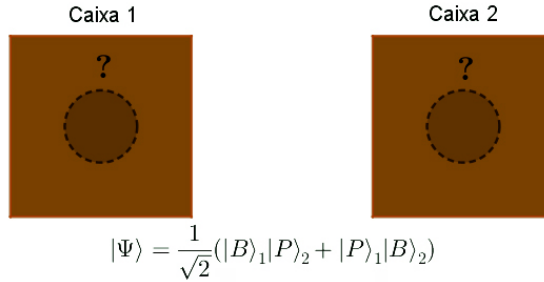


FIGURA 2. Estado conjunto do PAR de caixas e bolas.

Alice abre a sua caixa...

Agora Alice leva uma das caixas para Marte. Chamemos a essa caixa C_1 . Bob fica com a outra caixa – a caixa C_2 – que leva para uma galáxia distante. Alice e Bob não têm qualquer forma de se comunicarem entre si. Quando Alice abre a sua Caixa C_1 , o que acontece? Ou ela vê uma bola branca ou vê uma preta, é claro.

Se ela vê que a bola na sua caixa é Preta, então o acto de abrir a caixa “forçou” o sistema a escolher a possibilidade 1: “Caixa 1 tem Bola Preta e Caixa B tem Bola Branca”. Instantaneamente, a “névoa” das possibilidades colapsa, e agora Alice sabe, com 100% de certeza, que a Caixa de Bob, tem Bola Branca.

Mas atenção: Bob, na sua galáxia, não sabe nada sobre a cor da Bola da sua caixa, que continua fechada. Por isso, para Bob, a bola na sua caixa ainda é uma sobreposição de Preta e Branca. Bob não ganhou nenhuma informação sobre a cor da sua bola, pelo facto de Alice ter aberto a sua e já saber qual a cor da Bola que está na caixa de Bob. Bob só saberá a cor da sua bola quando abrir a sua caixa.

Enfim: a ação fantasmagórica à distância!

A “ação fantasmagórica à distância” (*Spooky Action at a Distance*), que era o inquietava Einstein, não diz que Bob sabe instantaneamente a cor da sua bola, quando Alice abre a sua caixa. Este é um erro que às vezes se lê em alguns livros!

A bola de Alice NÃO ERA Preta antes de ela abrir a sua caixa. Este acto (de medição) é que fez a sua bola tornar-se Preta. E, de alguma forma inexplicável, instantaneamente (sem qualquer tipo de comunicação superluminal), o acto de Alice medir a cor da sua bola (abrindo a sua caixa) forçou a bola de Bob a definir-se como BRANCA. Ou seja, a ação é no estado físico da bola de Bob. O seu estado foi instantaneamente determinado pela medição de Alice, mesmo que Bob não saiba disso até que ele mesmo a meça. É o colapso do estado da caixa distante, não a transferência de informação.

Einstein achava isso inaceitável porque implicava que a realidade de algo distante é determinada pela observação local, sem uma conexão física aparente. O “fantasmagórico” reside nes-

sa determinação instantânea do estado físico de um objeto distante, sem que haja qualquer sinal mediador viajando entre eles. Isso parecia desafiar as noções a que estamos (por demais) habituados – a noção de causalidade e a de localidade.

2. Exposição formal.

Suponhamos que temos duas caixas fechadas e lacradas: C_1 e C_2 . Cada uma contem uma bola que pode ser Branca ou Preta. O estado da caixa define-se pela cor da bola que contém. Assim a caixa C_1 pode estar num de dois estados (puros), $|B\rangle_1$ ou $|P\rangle_1$ ou numa sobreposição desses dois estados:

$$|C_1\rangle = \alpha|B\rangle_1 + \beta|P\rangle_1, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

e o mesmo acontece para a caixa C_2

$$|C_2\rangle = \gamma|B\rangle_2 + \delta|P\rangle_2, \quad \gamma, \delta \in \mathbb{C}, |\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1$$

(Ver a FIGURA 1).

Como dissemos acima, quando consideramos o sistema conjunto constituído pelo PAR de caixas C_1 e C_2 , podemos facilmente listar os respetivos estados, usando uma espécie de produto:

$$|B\rangle_1|B\rangle_2, \quad |B\rangle_1|P\rangle_2, \quad |P\rangle_1|B\rangle_2, \quad |P\rangle_1|P\rangle_2 \quad (1)$$

ou qualquer sobreposição quântica destes:

$$|C_1C_2\rangle = \alpha|B\rangle_1|B\rangle_2 + \beta|B\rangle_1|P\rangle_2 + \gamma|P\rangle_1|B\rangle_2 + \delta|P\rangle_1|P\rangle_2 \quad (2)$$

com $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{C}$, com $|\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1$. Os estados (1), são chamados estados produto (tensorial), porque podemos especificar, de forma independente, o estado de cada caixa, e depois multiplicá-los para obter o estado do sistema do PAR de caixas, escrito na forma:

$$|\text{estado da caixa } C_1\rangle |\text{estado da caixa } C_2\rangle \quad (3)$$

Um exemplo de um estado de sobreposição quântica, (2), do PAR de caixas é

$$|C_1C_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|B\rangle_1|B\rangle_2 + |P\rangle_1|B\rangle_2) \quad (4)$$

Este estado é um estado produto, já que pode ser separado, ou factorizado, na forma:

$$|C_1C_2\rangle = |C_1\rangle |C_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|B\rangle_1 + |P\rangle_1)|B\rangle_2 \quad (5)$$

o que significa que a caixa 1 está num estado de sobreposição quântica de branco e preto, enquanto que a caixa 2 está no estado branco. Mais detalhadamente, o significado da equação (5) das duas partículas é o seguinte:

- A bola da caixa C_1 exibe indefinição objetiva em relação aos estados branco e preto — a probabilidade de ser medida como branca é igual a $1/2$, a probabilidade de ser medida como preta é também igual a $1/2$, enquanto que
- A caixa 2 será sempre branca com probabilidade 1, após medição.

Não há correlação entre os resultados obtidos para as duas caixas. O estado do sistema conjunto, constituído pelas duas caixas, pode ser escrito como um produto do estado de cada uma das caixas e, por isso, o sistema diz-se separável, o que significa que o estado de cada caixa é inteiramente independente do da outra.

Consideremos agora o estado EPR seguinte

$$|C_1C_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|B\rangle_1|P\rangle_2 + |P\rangle_1|B\rangle_2) \quad (6)$$

O seu significado é o seguinte: a probabilidade de encontrar O PAR de caixas com bolas de côr oposta é igual a $1/2$. As duas caixas estão assim firmemente correlacionadas : ou a caixa C_1 , quando aberta (ou medida) mostrará a bola Branca, e, portanto, a caixa C_2 quando medida (ou aberta) mostrará a bola preta, ou a caixa C_1 , quando aberta (ou medida) mostrará a bola Preta, e, portanto, a caixa C_2 quando medida (ou aberta) mostrará a bola Branca. Nunca temos duas brancas ou duas pretas.

Além disso, não é possível, ao contrário do caso anterior (4), escrever este estado como um produto dos estados de cada uma das caixas. Simbolicamente,

$$\begin{aligned} |C_1C_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|B\rangle_1|P\rangle_2 + |P\rangle_1|B\rangle_2) \\ &\neq |\text{estado da caixa 1}\rangle \otimes |\text{estado da caixa 2}\rangle \end{aligned} \quad (7)$$

$|C_1C_2\rangle$ é, neste caso, NÃO separável — diz-se, por isso, entrelaçado, e diz-se que o PAR de caixas, como sistema conjunto, está num estado de entrelaçamento quântico.

Vamos ser mais concretos. Assim, suponhamos que Alice abre a sua caixa, C_1 , para medir a Côr da bola que está lá dentro. Suponhamos que ela obtem a Côr branca, $|B\rangle_1$, com probabilidade $1/2$. Pela Regra de Born, o estado entrelaçado $|C_1C_2\rangle$, sofre o colapso

$$|C_1C_2\rangle \xrightarrow{\text{Alice mede a côr da sua bola}} |B\rangle_1|P\rangle_2 \quad (8)$$

A experiência de Malus/Dirac no elab e a natureza quântica da luz

P. A. Mendes Rossa^{*}, E. Zambrini Cruzeiro^{†,‡}, H. Fernandes^{*,#}

^{*}IST/U.Lisboa | [†]QPI/IT | [‡]QIQO/IST | [#]IPFN

O elab é um laboratório controlado à distância que oferece a qualquer utilizador a possibilidade de operar uma experiência de polarização da luz, cuja interpretação pode ser efectuada recorrendo à física quântica. Com efeito, esta experiência do elab permite polarizar um feixe de luz com sucessivos filtros, permitindo recriar a experiência imaginária utilizada por Dirac para descrever a natureza quântica da luz.

A polarização da luz é uma característica física da radiação com uma interpretação “clássica” baseada no eletromagnetismo. Esta permite explicar o “paradoxo dos três polarizadores” atendendo à lei de Malus, sendo o paradoxo baseado no efeito em cascata de três polarizadores. Começamos pelo caso de apenas dois polarizadores, orientados a 90° um em relação ao outro, bloqueando dessa forma a passagem de qualquer luz. O paradoxo surge ao introduzir um terceiro polarizador a 45° ; (i) se for introduzido entre eles surge luz através do sistema, que emergirá atenuada de 25% mas (ii) se for colocado imediatamente antes ou após os dois polarizadores iniciais nenhuma luz emergirá no extremo do percurso óptico uma vez que os polarizadores consecutivos a 90° eliminarão a passagem de qualquer luz. Adicionalmente, este fenómeno de “repolarização” da luz tem necessariamente uma interpretação quântica melhor compreendida no limite de um fóton único. De facto, o conjunto de fótons que consegue atravessar o último polarizador constitui a intensidade medida pelo detector. Neste artigo e num artigo complementar (versãoteórica) fazemos a experiência dos três polarizadores, e tentaremos conciliar as interpretações clássica e quântica.

Descrevendo o problema de forma microscópica, em termos de cada fóton incidindo nos polarizadores, compreendemos que os polarizadores nos permitem responder a questões tais como “o fóton passou no polarizador?”. Portanto, podemos aqui colocar três perguntas que correspondem a saber se um determinado fóton passou por cada um dos polarizadores. Ao fazermos a experiência e observarmos a quantidade de luz que sai, estamos a observar as respostas dadas por cada partícula de luz.

A experiência no ELAB.

O elab é uma plataforma de acesso remoto a experiências reais, atualizada recentemente com um novo *software*, o *Framework for Remote Experiments in Education*.

A experiência da polarização da luz permite medir a potência luminosa num alvo após a luz da fonte incoerente (um LED branco) atravessar um sistema de dois ou três polarizadores e estudar o efeito provocado na intensidade luminosa devido à orientação relativa desses polarizadores. Na FIGURA 1 podemos observar um esquema simplificado da experiência.

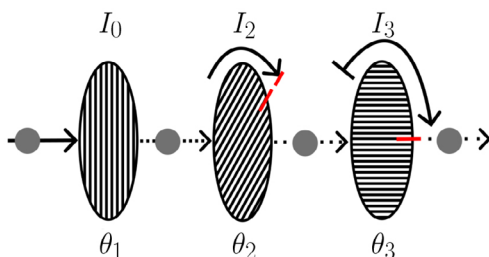


FIGURA 1. Esquema da montagem dos polarizadores na experiência do elab; o primeiro polarizador permite definir a direção vertical imposta ao feixe de luz utilizado, sendo $\theta_1 = 0^\circ$. O segundo polarizador pode ser configurado para um ângulo predeterminado, sendo utilizado na experiência em epígrafe valores de $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_2 = -45^\circ$ e $\theta_2 = -90^\circ$. Por último, o terceiro polarizador efetua um varrimento entre dois valores arbitrários, sendo escolhido geralmente um leque de valores que permita averiguar o ocorrido com uma variação de 180°

A intensidade da luz transmitida através de um par de polarizadores é regida pela lei de Malus, em função da intensidade da luz polarizada após o primeiro polarizador e do ângulo relativo entre os eixos de transmissão dos dois polarizadores. Para os primeiros dois polarizadores na FIGURA 1, temos

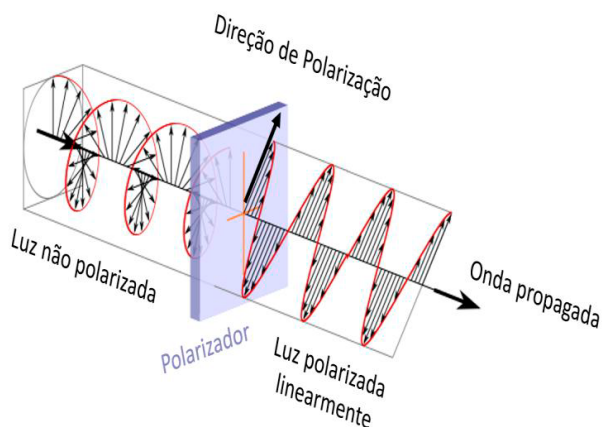
$$I_2 = I_1 \cos^2(\theta_2 - \theta_1)$$

De forma semelhante, podemos aplicar sucessivamente a mesma lei para qualquer número de polarizadores. Para a configuração de três polarizadores da FIGURA 1, teremos

$$I_3 = I_2 \cos^2(\theta_3 - \theta_2) = I_1 \cos^2(\theta_2 - \theta_1) \cos^2(\theta_3 - \theta_2)$$

O primeiro polarizador apenas existe para criar um feixe de luz polarizada a 0° (vertical) se for ativado. De seguida, a luz atravessa um segundo polarizador cujo ângulo com a vertical é pré-definido entre -120° e 70° . Antes de incidir no sensor de luz baseado num fotodiodo, atravessa o último polarizador que pode efectuar um varrimento angular ligeiramente superior a 180° .

Caso se use à partida luz polarizada, pela configuração judiciosa da experiência, podemos replicar o paradoxo dos três polarizadores, e utilizando a lei de Malus comprovar a sua validade, usando a descrição da luz como uma onda electromagnética dotada duma polarização característica, ou seja o campo elétrico da onda oscila num plano determinado, perpendicular à direção de propagação da mesma.



O paradoxo dos três polarizadores.

Ao efectuar a experiência com luz polarizada (eliminando a componente energética da luz a 90°) e configurando o polarizador intermédio a 0° , -45° e -90° e de seguida fazendo um varrimento do terceiro polarizador entre -120° e 70° podemos observar resultados como os representados na FIGURA 2, com a inexpectável passagem de luz quando o último polarizador faz 90° com o primeiro!

Ou seja, quando o primeiro e o terceiro polarizadores estão a 90° entre si não passa qualquer luz (traço a verde) se o segundo estiver alinhado com o primeiro, mas estando o primeiro e terceiro a 90° (primeira linha tracejada) a luz consegue emergir após o terceiro polarizador na experiência com o polarizador intermédio a 45° (traço amarelo)!

No gráfico da FIGURA 2 estão traçadas as intensidades medidas pelo sensor de luz. Este gráfico permite determinar os erros sistemáticos existentes da montagem, pois (i) o máximo não se alinha rigorosamente aos 0° , antes a cerca de -2.7° devido à incerteza do posicionamento do primeiro filtro e (ii) devido à luz ambiente, existe sempre um valor não nulo medido pela fotocélula (inferior a 50 unidades de medida).

Feita a correção dos erros pela remoção do offset médio (-30), o máximo da luz transmitida com o segundo polarizador a -45° é de 598 e a -90° de 306, cerca de 50% como esperado e isto apesar do último polarizador fazer 90° com o primeiro. Apesar da projecção do campo segundo o eixo ser de $1/\sqrt{2} = \cos(45^\circ)$, a potência coletada depende do seu quadrado e portanto deveria ser de 50%. Notamos que o máximo da curva amarela é quando o terceiro polarizador se alinha com o segundo que se encontra a -45° .

A curva a azul desvia-se significativamente da lei de Malus mas tal deve-se provavelmente ao sensor de luz (BPW34), uma vez que a sua eficiência de conversão fotoelétrica (capacidade de resposta) depende da potência óptica incidente.

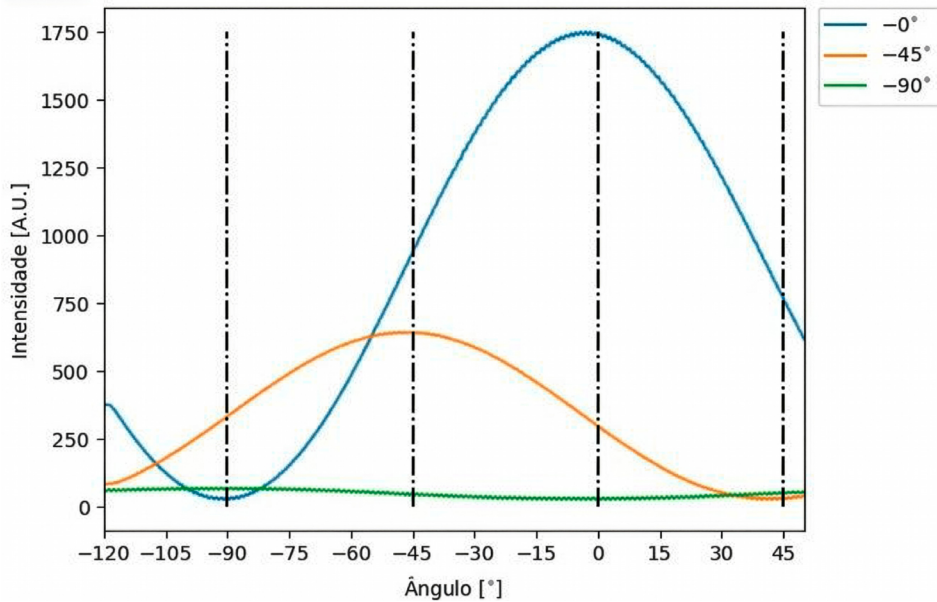


FIGURA 2. Potencia coletada na fotocélula para varrimentos do terceiro polarizador entre -120° e 50° e com o segundo polarizador em posições pré-determinadas de 0° , -45° e -90° . O polarizador a -90° permite identificar o erro sistemático induzido pela luz ambiente pois cortará qualquer luz que emerge da fonte pré-polarizada a 0° .

A descrição quântica.

O princípio de sobreposição, formulado primeiramente por Dirac, é uma forma de dizer que, para prever as correlações observadas no mundo quântico, nós precisamos de todos os vetores que descrevem o espaço de situações fisicamente possíveis, os observáveis, e a sobreposição desses vetores também corresponde a uma solução para dois ou mais estados quânticos.

Vamos descrever o estado de polarização da luz como um vetor bi-dimensional, tal como ilustrado na FIGURA 3. Luz polarizada verticalmente corresponde a um vetor a apontar para cima $(0,1)$, e se for horizontal corresponde a $(1,0)$. Usamos a notação de Dirac para representar estes vetores, $|V\rangle$ e $|H\rangle$ respectivamente. Um vetor arbitrário escreve-se

$$|\alpha\rangle = \cos \alpha |V\rangle + \sin \alpha |H\rangle$$

A mecânica quântica explica como calcular: 1) a probabilidade de transmissão destes estados através de um polarizador, e 2) o estado à saída do polarizador. Aquando da passagem do estado $|V\rangle$ pelo segundo polarizador, orientado a 45° , temos que:

1. A probabilidade de transmissão é dada por

$$\text{Prob} = |\langle V|P(45^\circ)|V\rangle|^2 = \frac{1}{2}$$

onde $P(45^\circ) = |45^\circ\rangle\langle 45^\circ|$.

2. O estado à saída é o estado orientado a 45° , ou seja, $\alpha = 45^\circ$. Em linguagem mais formal, diz-se que a medição projeta o estado quântico para o estado alinhado 45° ,

$$|45^\circ\rangle = 1/\left(|V\rangle + |H\rangle\right)\sqrt{2}$$

Podemos continuar o exercício calculando a probabilidade de transmissão através do filtro final, orientado a $\theta_2 = 90^\circ$, ou seja, correspondendo a um estado $|H\rangle$. Esta é dada por,

$$\text{Prob} = \cos^2(45^\circ - \theta_2)$$

Neste caso particular, as regras da mecânica quântica explicam exatamente o comportamento observado na experiência. No entanto poder-se-ia generalizar esta interpretação a qualquer ângulo, e fazendo a relação entre a soma de todos os fótons que atravessam o sistema e os iniciais, concluiríamos ser essa relação sempre igual à relação das intensidades luminosas à entrada e à saída do sistema.

Num artigo complementar a este (versão teórica), oferecemos uma explicação mais detalhada da experiência de Malus, em termos dos fenômenos quânticos microscópicos. Tentamos oferecer uma visão mecânica do comportamento das partículas uma a uma, usando o conceito de variáveis escondidas.

Computação quântica com partículas de luz.

Sara Franco^{*,‡}, Leonardo Novo[‡]

*U. Minho | ‡INL

Em 1994, um investigador dos conceituados Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, publicou um artigo que viria a impulsionar um novo campo da ciência, hoje conhecido como ciência da informação quântica. Peter Shor tinha desenvolvido um novo algoritmo, baseado na física quântica, capaz de fatorizar números grandes muito mais rapidamente do que qualquer outro algoritmo conhecido. O problema da fatorização consiste em decompor um número inteiro nos seus fatores primos, e tem sido estudado pelos matemáticos desde há milénios. No entanto, os melhores algoritmos para resolver este problema utilizando os nossos computadores convencionais são muito lentos — têm de realizar um número de operações que cresce (quase) exponencialmente com o número de dígitos do número a fatorizar. O facto de os nossos computadores serem tão lentos a fatorizar números grandes levou mesmo ao desenvolvimento de um protocolo de encriptação amplamente utilizado para a transferência segura de dados através da internet. Em teoria, o algoritmo de Shor necessita apenas de um número polinomial — e não exponencial — de operações para fatorizar um número grande e, por isso, poderá representar um desafio para a criptografia da internet. Mas o algoritmo de Shor conseguiu muito mais do que isso: foi o primeiro exemplo de um problema central da matemática que poderia ser resolvido muito mais rapidamente por este tipo de computador fundamentalmente novo, o computador quântico.

A ideia de usar sistemas quânticos para fazer computação surgiu mais de uma década antes do trabalho inovador de Shor. Já na década de 80, os cientistas antecipavam o potencial da física quântica para resolver problemas importantes e complexos. Um dos principais problemas com que os físicos estavam familiarizados era o cálculo da solução das equações da mecânica quântica. A mecânica quântica é a teoria que descreve a natureza em escalas muito pequenas e explica como as partículas fundamentais se comportam e interagem entre si para formar moléculas e materiais. O problema é que as leis da mecânica quântica são altamente contrintuitivas e permitem que uma dada partícula, como um eletrão, esteja em muitos estados ao mesmo tempo, naquilo que se designa por estado de sobreposição quântica. Se considerarmos um caso simplificado em que uma dada partícula pode estar em duas posições, então um

conjunto de n dessas partículas pode, em princípio, estar numa sobreposição de 2^n estados. Para 50 partículas, isto já resultaria em mais de um quatrilhão de possibilidades coexistentes. Este crescimento exponencial da complexidade é a principal razão pela qual a previsão do comportamento da matéria à escala quântica é extremamente desafiante. Perante este problema, o famoso físico Richard Feynman teve a seguinte ideia: sugeriu que, para simular o comportamento de sistemas quânticos, o próprio computador deveria obedecer as leis da mecânica quântica e ser capaz de criar e manipular essas sobreposições.

Esta ideia revelou-se bastante frutífera. Desde a proposta de Feynman e o algoritmo inovador de Shor, os investigadores desenvolveram muitos algoritmos quânticos, isto é, algoritmos que só podem ser executados num computador quântico. Estes algoritmos têm o potencial de serem aplicados não só para melhorar a nossa compreensão fundamental da natureza a nível quântico, mas também para resolver de forma mais eficiente muitos problemas práticos relacionados com o desenvolvimento de novos materiais, medicamentos ou fertilizantes, bem como problemas complexos de otimização relevantes para a indústria. Contudo, para explorar essas possíveis vantagens computacionais, uma tarefa de engenharia formidável se apresenta: a construção de um computador quântico de grande escala.

Criar e controlar bits quânticos.

Os computadores que utilizamos no nosso dia-a-dia processam informação codificada em bits clássicos, que abstratamente são representados por dois estados: "0" ou "1". A representação física destes 0s e 1s tomou várias formas ao longo do tempo. Nos primeiros computadores da primeira metade do século 20, um bit era codificado como a presença ou ausência de um orifício num cartão de papel (chamado cartão perfurado), enquanto nos discos rígidos modernos são áreas minúsculas de um disco de metal que são magnetizadas ou desmagnetizadas. Uma computação clássica pode ser vista como uma manipulação destes 0s e 1s, utilizando portas lógicas, para calcular o resultado de um determinado problema.

Já num computador quântico, a unidade básica de informação é o bit quântico, ou *qubit*, que pode estar numa sobreposição quântica de dois estados, "0" e "1" (FIGURA 1).

<p>a) 1 bit</p> <p>$\{0, 1\}$</p>	<p>c) 1 qubit</p> <p>$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle \quad P_0 = \alpha ^2 \quad P_1 = \beta ^2$</p>
<p>b) n bits</p> <p>001011010</p> <p>Uma de 2^n possibilidades</p>	<p>d) n qubits</p> <p>$\alpha_1 0100011\rangle + \alpha_2 1101001\rangle + \dots + \alpha_N 01110011\rangle$</p> <p>Até 2^n possibilidades em superposição</p>

FIGURA 1. Bits vs. qubits. a) Um bit clássico pode tomar um de dois valores, "0" ou "1". b) Um conjunto de n bits pode estar numa de 2^n configurações possíveis. c) Um bit quântico, ou qubit, pode estar numa superposição quântica de dois estados, que denotamos com a notação "bracket" como " $|0\rangle$ " e " $|1\rangle$ ". Os coeficientes α e β dão-nos a probabilidade P_0 de encontrarmos o estado " $|0\rangle$ " e P_1 de encontrarmos o estado " $|1\rangle$ ", respetivamente. d) Um conjunto de n qubits pode estar numa superposição de até 2^n configurações possíveis.

Para realizar uma computação quântica, os bits quânticos são manipulados através de portas quânticas, seguindo a prescrição fornecida por um algoritmo quântico. Estas portas podem alterar o estado de sobreposição de cada *qubit* individualmente, mas também acoplar diferentes *qubits* para criar estados entrelaçados (FIGURA 2).

- a) Dois qubits $|\psi_1\rangle = \alpha_1|0\rangle + \beta_1|1\rangle$ $|\psi_2\rangle = \alpha_2|0\rangle + \beta_2|1\rangle$
- b) Estado **separável** de dois qubits $|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle = \alpha_1\alpha_2|00\rangle + \alpha_1\beta_2|01\rangle + \alpha_2\beta_1|10\rangle + \beta_1\beta_2|11\rangle$
- c) Estado **emaranhado** de dois qubits $|\Phi_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$

FIGURA 2. Emaranhamento quântico, a) Dois qubits estão cada um numa dada superposição de dois estados “|0>” e “|1>”, b) Quando dois qubits estão num estado quântico separável, o seu estado conjunto pode ser escrito como um “produto” dos seus estados individuais, c) Quando dois qubits estão num estado quântico emaranhado, o seu estado conjunto não pode ser escrito como um produto dos seus estados individuais.

Para dar um exemplo, o estado entrelaçado mais simples de dois *qubits* é o estado de sobreposição de “00” e “11”, ou seja, dos dois *qubits* no estado “0” e os dois *qubits* no estado “1”. Mas estas sobreposições podem tornar-se muito complexas e conter um número exponencialmente maior de possibilidades, como discutimos acima. Significa isto que um computador quântico pode ser sempre exponencialmente mais rápido que um computador clássico? Infelizmente, não. O problema é que as leis da mecânica quântica afirmam que, ao medir um estado de sobreposição de bits quânticos para determinar a sua configuração, apenas se observa uma das muitas possibilidades, com uma dada probabilidade. Portanto, não há forma de aceder diretamente a todas estas possibilidades exponencialmente numerosas ao mesmo tempo. O desafio de desenvolver algoritmos quânticos consiste, então, em utilizar inteligentemente as portas quânticas para amplificar a probabilidade da resposta correta para um determinado problema computacional.

Em relação ao hardware, ou seja, os elementos físicos que serão usados para construir o computador quântico, existem diversas propostas que foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas. Uma das mais conhecidas é a chamada armadilha de iões, onde iões individuais levitam em posições fixas por ação de um campo magnético. Neste caso, cada *qubit* corresponde ao spin de cada ião e as portas quânticas são realizadas por impulsos laser que incidem sobre os iões. Outra proposta é utilizar partículas individuais de luz, ou fótons, que podem viajar numa sobreposição de diferentes trajetórias e, assim, codificar *qubits* (FIGURA 3).

Mais uma possibilidade são os *qubits* supercondutores, constituídos por circuitos elétricos arrefecidos a temperaturas muito baixas de modo a se comportarem como supercondutores, resultando disso que as correntes e tensões elétricas se comportam de forma quântica.

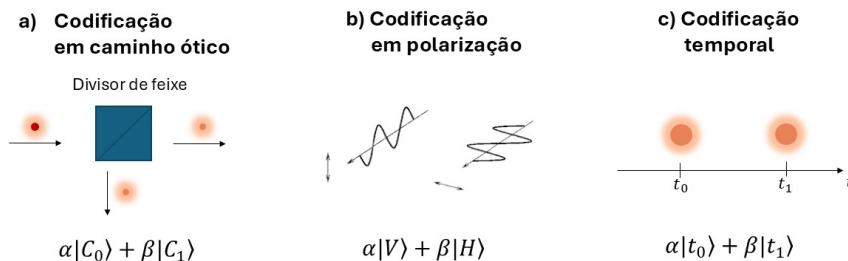


FIGURA 3. Qubits podem ser codificados usando diferentes propriedades dos fótons (partículas de luz), a) Um divisor de feixe coloca um fóton que nele impinge numa superposição de dois caminhos óticos possíveis C_0 e C_1 , b) Fótons podem estar numa superposição de dois estados de polarização (ou direção de oscilação do campo eletromagnético) ortogonais, por exemplo, polarização vertical V e horizontal H , c) Um qubit também pode ser codificado em dois tempos de chegada diferentes t_0 e t_1 .

Independentemente da tecnologia utilizada, o principal desafio para a construção de um computador quântico em larga escala reside na extrema sensibilidade dos estados de sobreposição à decoerência. A decoerência é a razão pela qual não experienciamos as peculiaridades da mecânica quântica no nosso cotidiano. A interação de um estado quântico com o ambiente que o rodeia tende a destruir as sobreposições (ou coerência quântica) e a transformar o estado quântico num estado clássico mais familiar, em que um objeto se encontra num estado A ou B, em vez de uma sobreposição de A e B. Por isso, para manter as sobreposições quânticas e explorá-las para computação, os *qubits* precisam de estar muito bem isolados. No entanto, não podem ser completamente isolados, dado que, para criar e manipular essas sobreposições complexas, é necessário acoplar os *qubits* entre si para implementar as portas quânticas. Nestas exigências aparentemente contraditórias, que requerem tanto o acoplamento fraco como o forte dos *qubits*, está assente a principal dificuldade de criar um computador quântico em larga escala.

A esperança de que este enorme desafio possa vir a ser superado encontra-se na teoria da correção de erros quânticos, para a qual Peter Shor também contribuiu com trabalhos muito importantes na década de 90. Esta teoria explica como corrigir os erros que surgem numa computação quântica devido à decoerência e às portas quânticas imperfeitas. No entanto, a implementação destes protocolos de correção de erros é dispendiosa. Por cada *qubit* que desejamos utilizar na nossa computação quântica, precisamos de muitos mais para realizar a correção quântica de erros – um fator que pode ser até mil vezes maior. Portanto, um computador quântico capaz de realizar correção de erros e ainda assim lidar com problemas complexos poderá exigir milhões de *qubits*. O caminho para construir um dispositivo deste tipo será longo e árduo, mas, entretanto, os investigadores já conseguem demonstrar feitos notáveis e superar até os melhores supercomputadores em determinadas tarefas específicas.

“Vantagem quântica” em dispositivos quânticos de pequena-escala.

Claramente, o primeiro objetivo na construção de um computador quântico é demonstrar a capacidade de controlar um pequeno número de bits quânticos e aplicar portas quânticas. Isto já foi conseguido em inúmeras experiências de prova de conceito em universidades e laboratórios de todo o mundo, utilizando muitas das formas possíveis de construir um computador quântico (iões, fótons, supercondutores...). Nos últimos anos, o investimento público e privado na investigação em computação quântica aumentou consideravelmente, especialmente desde que gigantes tecnológicos como a *Google*, a *IBM*, a *Intel* e a *Microsoft* entraram na área. Este investimento possibilitou a conquista de objetivos mais ambiciosos do que simplesmente manipular alguns *qubits*.

Um marco importante que tem sido um dos principais focos de investigação em computação quântica na última década é o seguinte: qual é a tarefa mais simples que podemos realizar com um dispositivo quântico de pequena escala de forma muito mais rápida do que com os nossos métodos convencionais de computação? Há dois pontos importantes que devem ser aqui enfatizados. Em primeiro lugar, a tarefa em questão não tem necessariamente de ser útil em termos práticos; o objetivo é apenas demonstrar que uma grande aceleração computacional é possível devido à mecânica quântica. Em segundo lugar, idealmente seria possível realizá-la com um dispositivo quântico de pequena escala, que seria ruidoso por não possuir *qubits* e recursos suficientes para realizar a correção de erros quânticos. Tal objetivo tem sido denominado na área como o de alcançar a vantagem computacional quântica.

Em 2019, a equipa de computação quântica da *Google*, liderada por John Martinis, foi a primeira a afirmar ter alcançado este objetivo, utilizando um chip com 53 *qubits* supercondutores. Em dezembro de 2020, a equipa de Jian-Wei Pan, da Universidade de Ciência e Tecnologia da China, também afirmou ter alcançado tal objetivo, desta vez com um aparato experimental capaz de criar, manipular e detetar fótons. Mas que tarefa executam estes dispositivos e porque é que ela é difícil para os computadores clássicos? Esta tarefa é designada de “problema de amostragem”, e o objetivo é gerar números aleatórios, onde cada número aparece com uma determinada probabilidade. De certa forma, esta é uma tarefa natural se tivermos acesso a um estado quântico de muitas partículas. Como referido anteriormente, quando medimos um estado de sobreposição quântica, apenas uma entre um número exponencialmente grande de possibilidades é observada. Verificou-se que calcular as probabilidades de obter um determinado resultado da observação é uma tarefa muito difícil, cujo tempo aumenta exponencialmente com o tamanho do sistema quântico, mesmo utilizando os melhores algoritmos clássicos que conhecemos. Em 2010, Scott Aaronson e Alex Arkhipov, dois matemáticos do MIT, utilizaram este facto para demonstrar que um dispositivo quântico específico, denominado “amostrador de bosões” (*boson sampler* em inglês), podia gerar números aleatórios a partir de uma determinada distribuição de probabilidade muito mais rapidamente do que os computadores clássicos. Um bosão é um tipo de partícula fundamental, do qual são exemplo os fótons. Um amostrador de bosões é um dispositivo capaz de gerar muitos fótons individuais, fazê-los interferir uns com os outros de forma aleatória e medir a posição final de cada um.

Realismo e localidade.

Argumento EPR.

João Nuno Tavares

U. Porto

Neste curto artigo, vamos descrever o argumento de EPR sobre Realismo e Localidade, termos que serão definidos com detalhe no artigo.

No seu artigo inovador, Albert Einstein, Boris Podolsky, and Nathan Rosen, designados, pela sigla EPR, formularam alguns postulados gerais a que qualquer teoria física deve satisfazer. Na Física Clássica, esses postulados são considerados como “verdades autoevidentes”. Negá-los equivale a desafiar o senso comum e a experiência do nosso quotidiano macroscópico.

O objetivo do artigo EPR foi o de demonstrar que a interpretação da mecânica quântica (MQ), formulada pela chamada Escola de Copenhaga (desenvolvida essencialmente por Niels Bohr e Werner Heisenberg, quando trabalharam juntos em Copenhaga em 1927), era incompleta, no sentido de ser incapaz de dar uma explicação satisfatória dos conceitos que consideravam como fundamentais em qualquer teoria física.

Este debate (inacabado!...) foi, e continua a ser, um dos debates mais ricos, profundos e interessantes da História da Ciência Contemporânea. O cerne do argumento de EPR, começou por ser o chamado “Princípio da Separabilidade. Vejamos o que significa.

Na mecânica clássica, dois (ou mais) sistemas que não interagem, isto é, que não exercem qualquer tipo de influência de um sobre o outro, estão completamente separados – experiências realizadas localmente num deles, não podem influenciar, de forma alguma, os resultados de experiências realizadas localmente no outro.

A mecânica quântica, por outro lado, admite que pode haver uma forma de interdependência ou correlação, mesmo na ausência de interação física. Esse tipo de correlação é o entrelaçamento quântico, que foi discutido num dos artigos desta revista.

Além disso, fazendo uso do princípio da separabilidade, EPR estabelece uma condição suficiente para a realidade dos observáveis, que pode ser formulada da seguinte forma:

Postulado da realidade física:

Se pudermos prever com certeza absoluta (probabilidade igual a 1), o valor de um dos atributos de um sistema, sem o perturbar seja de que maneira for, então existe um elemento da realidade física correspondente a esse valor, que é independentemente de qualquer medição. Cada elemento de realidade física deve ter uma contrapartida na teoria física.

O uso da palavra “realidade”, refere-se à possibilidade de definir os atributos físicos dos objetos quânticos, de forma objetiva, independentemente de qualquer medição. A visão “realista” diz que essa possibilidade é “real” — os objetos quânticos têm atributos bem definidos, independentemente de qualquer observação ou medição. Nas palavras de Einstein: “todos acreditamos que a lua existe, mesmo quando nenhum de nós a observa”. De facto, é difícil imaginar que a realidade de um objeto como a lua, depende de ser observada ou não!

Mas, como podemos concluir que um objeto é real “sem que ele sofra qualquer tipo de perturbação”, ou sem fazer qualquer tipo de medições? “Como sabemos que a lua existe quando não olhamos para ela?...”

Uma forma de estabelecer a “realidade física, cuja existência é independente de um observador”, é observar eventos com uma causa comum (eventos altamente correlacionados). Assim, a realidade da Lua pode ser estabelecida observando o ciclo das marés (a sua amplitude, periodicidade, etc.).

Este é um tema fascinante, que merece uma discussão profunda. É difícil não se ser realista, quando nos restringimos ao mundo macroscópico que observamos na nossa prática quotidiana. Mas no mundo quântico, tudo é mais difuso. Talvez o conceito de realidade tenha que ser reformulado quando nos referimos ao mundo quântico. Este é um problema que habitualmente é discutido no contexto da “medição quântica — um tema difícil que ainda hoje não reúne consenso.

Vamos agora discutir um exemplo, que nos vai permitir a passar para o segundo princípio, que enunciaremos daqui a pouco.

Exemplo motivador.

Consideremos uma caixa com duas bolas exatamente iguais, exceto na Côr — uma é branca e outra é preta. Suponhamos que Alice e Bob, com os olhos vendados, pegam, cada um, numa bola e viajam em direções opostas, sempre com os olhos vendados, para galáxias tão distantes que não podem influenciar-se um ao outro, seja de que forma for.



A questão é a seguinte:

P1. Antes que Alice e Bob observem a Côr da respetiva bola, a Côr já tem uma existência física, real e objetiva? Por outras palavras (Realismo) — a Côr existe como realidade física objetiva, mesmo que ninguém a observe e saiba qual é?

P2. ou, pelo contrário, a Côr é uma propriedade que só existe quando é observada?

Suponhamos que Alice, quando chega à sua galáxia, desvende os olhos e, finalmente, observa a sua bola e vê que ela é branca.



Que implicação tem isso sobre a Côr da bola de Bob, antes que ele a observe?

É claro que esta experiência simples, em princípio, não tem qualquer mistério. Uma resposta possível poderia ser a seguinte. Bob pode saber a Côr da sua bola, antes de a medir ou observar, quando Alice o informar do Côr da sua. Se fôr branca, Bob saberá imediatamente que a dele é preta.

Mas, como é que Alice informa Bob, se ele estiver a 1000 anos-luz de distância? Por comunicação instantânea, por telepatia? Se em vez de bolas, tivermos partículas quânticas em entrelaçamento quântico, que foi discutido num outro artigo desta revista, vimos que essa comunicação instantânea é possível – a tal acção fantasmagórica (“spooky action”) de que falava Einstein, mas não no sentido de transferência de informação ou de qualquer mediador físico entre Alice e Bob!

Vamos ver que uma versão análoga da experiência, mas agora feita com partículas quânticas, conduz a paradoxos. Isto é, a Mecânica Quântica contraria as previsões do nosso senso comum!

Como responder às questões P1 e P2, colocadas na experiência anterior, se em vez de bolas tivermos partículas quânticas em entrelaçamento quântico?

- Se o leitor acredita que os atributos dos objetos quânticos só estão definidos quando são observados ou medidos, então rejeita o realismo, no sentido acima definido, e portanto responderá NÃO à questão P1. Mas, nesse caso, algo de muito estranho acontece – uma ação instantânea, “assustadora” (spooky) à distância!, que foi discutido no artigo sobre entrelaçamento quântico. De facto, nesse artigo, tentamos mostrar que não há nada assim tão estranho!...
- Se uma propriedade específica – a Côr da bola de Alice, por exemplo – “ganha realidade” ou “existência”, no exato momento em que é observada, então a bola de Bob “adquire” instantaneamente a outra Côr – a observação da Côr de uma bola, influencia instantaneamente a Côr da outra, seja qual fôr a distância entre elas (de um metro ou de milhões de anos-luz)! Recorde que Bob só sabe a Côr da sua bola quando a observar. Antes disso, para ele a bola estará numa sobreposição quântica de branca e preta. Como dissemos antes, Bob saberia a Côr da sua bola antes de a observar, se por algum meio Alice o pudesse informar da Côr da sua. Mas isto implicaria uma comunicação superluminal o que contraria um dos princípios base da teoria da relatividade.

O senso comum rejeita este conceito de ação instantânea à distância. De facto, opta pela chamada suposição de localidade (do que é local) — a observação local de um objeto não tem qualquer efeito sobre um objeto distante.

Passemos então ao segundo postulado, que diz o seguinte:

Postulado da localidade.

Este postulado resulta diretamente da teoria da relatividade restrita de Einstein. Um dos postulados dessa teoria é que nenhuma informação, seja ela de que tipo for, se pode propagar mais rápido do que a velocidade da luz no vácuo. Se assim não fosse, estaríamos a violar outro princípio fundamental da ciência — causalidade, segundo o qual o presente é determinado pelo que aconteceu no passado e pelo que acontece no presente, mas NÃO pelo que acontecerá no futuro.

Note que localidade implica realismo — se a observação de uma bola não tiver qualquer efeito sobre a outra, e se sempre se observa que elas têm cores diferentes, então ambas devem ter tido sempre a respetiva Côr. Esta combinação de localidade e realismo chama-se realismo local.

1. Realismo local.

Realismo local.

Os objetos têm propriedades que existem independentemente de serem observados, e que, além disso, não são influenciadas pelas observações de objetos distantes.

Regressemos à questão P2, do Exemplo motivador: suponhamos que Alice, quando desvende os olhos assim que chega à sua galáxia, observa que a sua bola é branca. Que implicação tem isto sobre a Côr da bola de Bob, antes que ele a observe?

Há dois pontos de vista:

- Se acreditarmos no realismo local, como foi atrás definido, podemos concluir que a bola de Alice foi sempre branca, mesmo antes de ser observada. A observação não teve qualquer efeito sobre a Côr da bola observada, nem na outra.
- Se acreditarmos que a observação altera a realidade física, então a bola de Alice, passou a ser branca no exato momento em que ela a observou. Além disso, a bola de Bob transformou-se, instantânea e simultaneamente, numa bola preta. Não faz sentido questionarmos qual a Côr das bolas antes da observação.

A observação direta é a única realidade — não existem propriedades não observadas. Qualquer coisa fora dos nossos sentidos é imaginação, não é realidade! A bola de Alice adquiriu a sua propriedade (Côr branca) no momento em que foi observada. A bola de Bob, antes de ser observada, não tem ainda propriedades, mesmo sabendo que sempre que for observada, ela será preta!

Estes pontos de vista, por mais implausíveis que possam parecer ao nosso senso comum, não podem ser refutados por evidências — como podemos adquirir qualquer evidência de como algo é, antes de ser observado, já que as evidências resultam apenas das observações?

Surpreendentemente, os físicos descobriram o seguinte:

- O realismo local impõe restrições às quantidades mensuráveis.
- Medições de partículas quânticas entrelaçadas violam as restrições impostas pelo realismo local. Portanto:
- O realismo local não é uma suposição válida para partículas quânticas.

Recorde o que se disse sobre entrelaçamento quântico, no artigo respectivo desta revista.

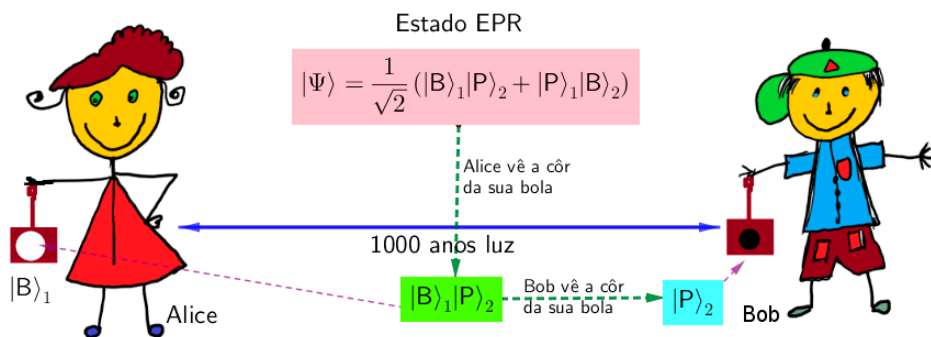


FIGURA 1. Partículas em entrelaçamento quântico. Medições e respectivos colapsos.

O artigo de EPR foi publicado em 1935. Na sua resposta, também publicada em 1935, com o mesmo título do artigo de EPR, Bohr argumenta que uma medição perturba inevitavelmente o sistema. O ponto-chave da resposta de Bohr é que, no argumento EPR, as duas partículas quânticas não devem ser tratadas como independentes até que se faça uma medição.

Portanto, é incorreto dizer que a Cor da bola de Bob não é perturbada, quando Alice faz a medição da Cor da sua bola. É esta medição que causa uma separação entre as bolas de Alice e Bob. Até à medição de Alice, as bolas estão em entrelaçamento quântico, isto é, estão no estado de sobreposição quântica (FIGURA 1):

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|B\rangle_1|P\rangle_2 + |P\rangle_1|B\rangle_2) \quad (1)$$

Conclusão e resumo

Um dos resultados mais surpreendentes da Física do século XX, é o seguinte:

se as previsões da mecânica quântica concordam com os resultados experimentais, então ela não é consistente com pelo menos um dos dois postulados — o de realidade ou o de localidade!

Dos paradoxos de Zenão ao universo quântico.

João Nuno Tavares

U. Porto

Os paradoxos de Zenão revelam a dificuldade em lidar com o conceito de infinito, tanto no espaço como no tempo. A matemática moderna, através do cálculo e da teoria das séries, oferece ferramentas para “resolver” matematicamente alguns desses paradoxos. Por outro lado, a mecânica quântica apresenta uma visão do mundo fundamentalmente diferente da visão clássica, com incertezas intrínsecas e a dualidade onda-partícula. O princípio da incerteza, o tempo e o comprimento de Planck revelam limites à nossa capacidade de conhecer e medir com precisão. O estudo dos paradoxos de Zenão, à luz das teorias físicas fundamentais (mecânica quântica e relatividade geral), motiva uma reflexão profunda sobre a natureza da realidade e do conhecimento.

1. O que são Paradoxos?

Paradoxos são afirmações que levam a uma contradição lógica, ou a situações que desafiam a intuição ou o senso comum. Existem diferentes tipos de paradoxos: os paradoxos lógicos, que revelam falhas ou inconsistências em sistemas lógicos ou matemáticos; os paradoxos semânticos, que surgem devido a ambiguidades na linguagem; e os paradoxos físicos, que desafiam a nossa compreensão do mundo físico e podem levar a novas teorias. O paradoxo dos gêmeos, na relatividade restrita, é um exemplo.

Eis um exemplo de paradoxo semântico — o paradoxo do mentiroso:

F = “Esta frase é falsa.”

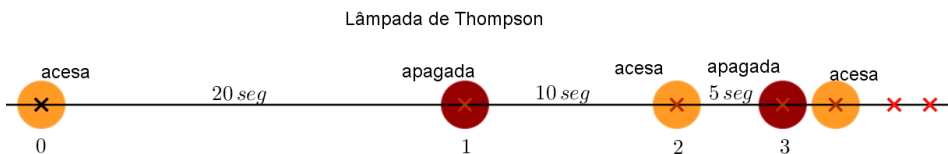
Se F for verdadeira, então é falsa. Se F for falsa, então é verdadeira. Isto contradiz a lógica clássica, porque uma frase não pode ser simultaneamente verdadeira e falsa.

Os paradoxos são importantes na filosofia, na lógica e na ciência, porque nos forçam a examinar as nossas hipóteses e a refinar os nossos conceitos e fundamentos. A resolução de um paradoxo pode levar a uma nova compreensão e a avanços significativos. Os paradoxos são, pois, desafios ao nosso pensamento crítico. Passemos então à discussão de alguns dos mais intrigantes.

O Paradoxo da Lâmpada de Thomson.

Um dos paradoxos mais interessantes foi proposto por James Thomson (1922–1984), um filósofo britânico que trabalhou em áreas como a filosofia da mente, a ética e a filosofia da matemática. Chama-se o paradoxo da lâmpada de Thomson, em homenagem ao seu criador, e está incluído num artigo intitulado “Tasks and Super-Tasks”, publicado por ele em 1954 na revista *Analysis*.

A lâmpada de Thomson é um paradoxo que envolve uma super-tarefa, isto é, um processo que consiste numa infinidade de tarefas. Na lâmpada de Thomson, as tarefas são as seguintes:



1. Acendemos a lâmpada e mantêmo-la acesa durante 20 s (tarefa 0).
2. Depois apagamos a lâmpada, e mantêmo-la apagada durante $20/2^1 = 10$ s (tarefa 1) (metade do tempo anterior).
3. Depois é acesa novamente, e mantida acesa durante $20/2^2 = 5$ s (tarefa 2) (metade do tempo anterior), e assim sucessivamente.

A super-tarefa continua, com intervalos de tempo cada vez menores (cada um é metade do anterior). O processo de apagar e acender alternadamente a lâmpada pode continuar indefinidamente, mas dura um tempo finito igual a:

$$T = 20 + 10 + 5 + 2,5 + 1,25 + \dots = 40 \text{ segundos}$$

como veremos adiante. Isto é, apesar de termos uma infinidade de tarefas para executar (uma super-tarefa), o processo termina ao fim de 40 segundos!

Pergunta:

A lâmpada estará acesa ou apagada após a conclusão deste processo infinito?

Esta pergunta é, no mínimo, desconcertante e não tem uma resposta óbvia (se é que tem resposta!).

Duração da super-tarefa.

Vamos agora ver que, de facto, matematicamente, o processo total demora apenas 40 segundos a completar, de acordo com a teoria de limites, criada por Augustin-Louis Cauchy (1789–1857), que já faz parte dos currículos de ensino secundário.

- Qual a duração, S_n , das primeiras n tarefas? É igual a:

$$S_n = 20 \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} \right) \text{ segundos}$$

que é uma soma do tipo:

$$S_n = A \cdot (1 + r + r^2 + \dots + r^{n-2} + r^{n-1})$$

com $A = 20$ e $r = 1/2$.

- Multiplicando ambos os membros por r , obtemos

$$r \cdot S_n = A \cdot (r + r^2 + r^3 \cdot \dots + r^{n-1} + r^n)$$

- Subtraindo membro a membro essas duas últimas expressões, e supondo $r \neq 1$, obtemos:

$$(1 - r) \cdot S_n = A \cdot (1 - r^n) \implies S_n = A \cdot \frac{1 - r^n}{1 - r}$$

Cauchy formalizou o conceito de limite, o que permitiu lidar com sucessões e somas infinitas que convergem para um valor finito.

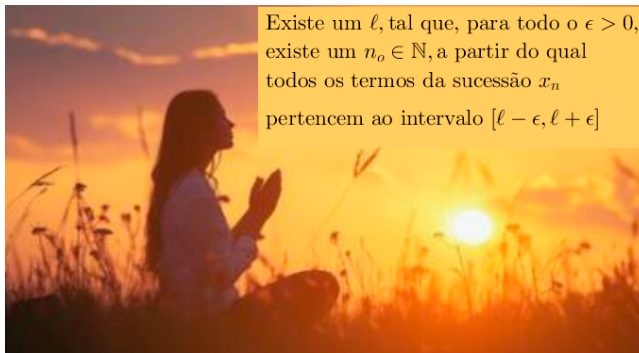


FIGURA 1. Definição de limite, segundo Cauchy.

Recordemos (ver a FIGURA 1): “uma sucessão de números reais converge para um limite finito ℓ , se e só se, para todo $\epsilon > 0$, existe um $n_o \in \mathbb{N}$ a partir do qual todos os termos dessa sucessão pertencem ao intervalo $[\ell - \epsilon, \ell + \epsilon]$ ”.

Se aceitarmos que o tempo é contínuo (e, portanto, infinitamente divisível), então o processo tem uma duração finita igual a

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = A \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - r^n}{1 - r} = 20 \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = 40 \text{ segundos}$$

Já que $\lim_{n \rightarrow \infty} r^n = 0$, se $0 < r < 1$. É, pois, possível realizar uma super-tarefa (isto é, um número infinito de tarefas) num tempo finito!

Mas a pergunta persiste: “A lâmpada estará acesa ou apagada após a conclusão deste processo infinito?” Não há resposta para esta pergunta. A conclusão é que a divisibilidade infinita do tempo cria dificuldades.

2. Paradoxos de Zenão de Eleia.

Mas regressemos a um tempo distante, de há cerca de 2500 anos atrás. Mais propriamente ao tempo de Zenão de Eleia que foi um Filósofo grego (490–430 a.C.?) da cidade de Eleia (hoje Vélia, no sul da Itália), discípulo de Parménides, cujas ideias defendia através de paradoxos. Os paradoxos de Zenão tornaram-se famosos, sobretudo pela divulgação feita por Aristóteles, e ainda hoje são discutidos no contexto dos fundamentos do tempo (e do espaço) contínuo e discreto. Os mais famosos são o paradoxo de Aquiles e a Tartaruga, o da Dicotomia, o da Flecha e outros.

O objetivo dos paradoxos era mostrar que a crença no movimento e na pluralidade leva a contradições lógicas. A sua relevância persiste na física e na matemática modernas, desafiando-nos a repensar conceitos fundamentais.

Paradoxo da Dicotomia.

Um corredor parte de O e quer chegar à meta M , situada a uma distância $d = 100$ metros de O .

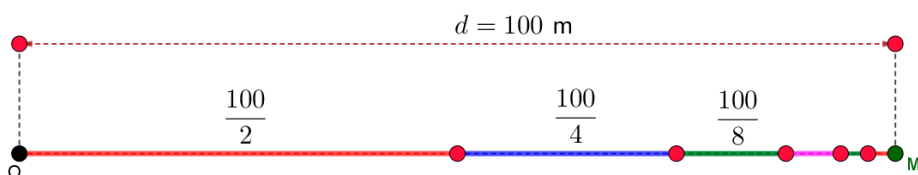


FIGURA 2. Paradoxo da Dicotomia

- Para chegar à meta, tem de percorrer primeiro metade do caminho (50 metros).
- Depois, metade da metade restante (mais 25 metros).
- E assim sucessivamente, infinitamente (ver a FIGURA 2).

Conclusão.

O corredor nunca conseguirá chegar à meta!

Este paradoxo reforça a ideia de que a divisibilidade infinita do espaço pode levar a conclusões estranhas.

Qual é a distância total percorrida pelo corredor quando ele termina, após a infinidade de corridas parciais acima descritas (primeiro 50 m, depois 25 m, depois 12,5 m, etc.)? É igual a:

$$\begin{aligned} & \frac{100}{2} + \frac{100}{2^2} + \frac{100}{2^3} + \dots \\ &= \frac{100}{2} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \dots \right) \quad (\text{uma soma infinita!}) \\ &= \frac{100}{2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} = 100 \quad (\text{mais de 2000 anos depois!}) \end{aligned}$$

Se aceitarmos a divisibilidade infinita do espaço, ou se aceitarmos a noção de um espaço contínuo, então, do ponto de vista puramente matemático, o corredor pode e irá completar a corrida.

Exercício.

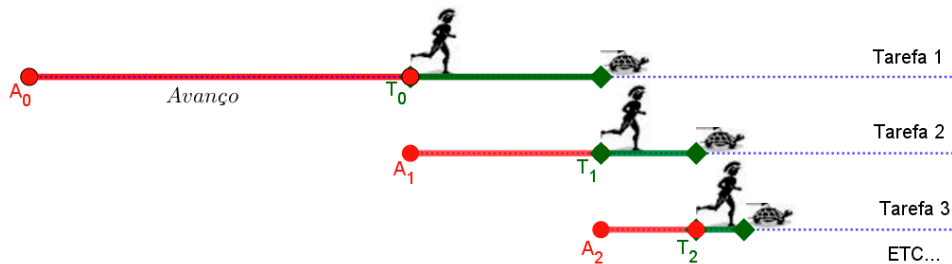
Se o corredor corre com uma velocidade $V = 20$ km/h, quanto tempo demora a corrida?

Aquiles e a Tartaruga: A Corrida Impossível?

Aquiles, conhecido pela sua velocidade, compete com uma tartaruga, a quem dá um avanço inicial.

Aquiles deve chegar primeiro ao ponto onde a tartaruga começou. No entanto, quando lá chega, a tartaruga já avançou um pouco. Este processo repete-se infinitamente (ver a figura abaixo), impedindo Aquiles de ultrapassar a tartaruga.

O que está em causa é a nossa intuição sobre o movimento contínuo e a possibilidade de percorrer um número infinito de distâncias (uma supertarefa) num tempo finito.



Exercício.

Supõe que: (i) a velocidade de Aquiles é V_A km/h; (ii) o avanço da tartaruga é a km; (iii) e que $0 < r < 1$ é um multiplicador, de tal forma que a velocidade da tartaruga é $V_T = r \cdot V_A$ km/h.

Perguntas:

1. Qual a posição de Aquiles no instante t ? E da tartaruga?
2. Qual o instante do encontro?
3. Qual a distância total percorrida por Aquiles? E pela tartaruga?

Erwin Schrödinger.

João Nuno Tavares

U. Porto



Comemora-se este ano o centenário da mecânica quântica, efeméride a que a *Casa das Ciências* se associou, promovendo um ciclo de palestras que decorreu nos passados dias 22 e 23 de outubro, nas instalações da FCUP, com uma ampla adesão de professores e alunos de ensino secundário, investigadores e outros interessados.

Nesta data centenária, é imperativo recordar Erwin Schrödinger (1887–1961), uma das mentes mais brilhantes e multifacetadas do século XX, cujas contribuições transcenderam largamente o campo da física. Schrödinger destaca-se pela genialidade e profundidade do seu pensamento.

A contribuição mais célebre de Schrödinger para a mecânica quântica, e uma das pedras basilares desta teoria, é a sua equação de onda, formulada em 1926. Esta equação descreve como o estado quântico de um sistema físico evolui no tempo, e introduziu o conceito de “função de onda” para descrever a probabilidade de encontrar uma partícula num determinado local. Assim criou uma formulação elegante da teoria quântica, que lhe valeu o Prémio Nobel da Física em 1933 (partilhado com Paul Dirac).

Schrödinger possuía um profundo interesse pela filosofia, em particular pelas tradições orientais, como o Vedantismo. Acreditava numa unidade fundamental da existência, onde o “eu” individual seria uma ilusão que esconde uma consciência cósmica universal. Nas suas obras como “Mente e Matéria” e “O que é a Vida?”, Schrödinger explorou a natureza da consciência e a relação entre o mundo físico e a experiência subjetiva. Ele via a ciência e a espiritualidade não como antagónicas, mas como diferentes abordagens à mesma realidade subjacente. Os seus diários e correspondência revelam uma busca incessante por uma compreensão holística, onde a intuição e a contemplação eram tão válidas quanto a dedução lógica.

A sua influência estendeu-se à biologia através da obra “O que é a Vida?” (1944). Neste livro, baseado em palestras que deu em Dublin, Schrödinger levantou a questão de como a vida consegue manter a sua ordem e complexidade contra a segunda lei da termodinâmica (entropia). Propôs a ideia do “cristal aperiódico”, uma estrutura complexa, mas não repetitiva, capaz de codificar informação genética, um conceito que inspirou diretamente figuras como Francis Crick e James Watson na sua busca pela estrutura do ADN, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento da biologia molecular. É fascinante que um físico teórico, sem formação formal em biologia, tenha formulado uma ideia que se tornou a base para a compreensão da hereditariedade. A clareza e a profundidade das suas perguntas forçaram os biólogos a pensar em termos de informação e estrutura a um nível fundamental, abrindo caminho para a revolução genética.

Schrödinger foi também uma figura com fortes convicções políticas e culturais. Deixou a Alemanha em 1933 (o ano em que ganhou o prémio Nobel), com a ascensão do Nazismo, recusando-se a trabalhar sob um regime fascista. Exilou-se, primeiro em Oxford, depois em Graz (Áustria) por um breve período, e finalmente encontrou refúgio na Irlanda. Desempenhou um papel crucial na fundação do *Dublin Institute for Advanced Studies* (DIAS) em 1940, onde liderou a Escola de Física durante 17 anos. Era um pacifista convicto e utilizou a sua voz para alertar para os perigos da guerra e da desumanização. A sua escrita demonstrou o seu empenho em comunicar a ciência e as suas implicações culturais e filosóficas a uma audiência mais vasta, promovendo um diálogo entre as ciências e as humanidades.



XI ENCONTRO

CASA DAS CIÊNCIAS

07 a 09
JULHO
2026

GUIMARÃES
CC VILA FLOR • E.S. MARTINS SARMENTO