

Do Átomo ao Algoritmo: 100 anos de ideias que mudaram o mundo

Teresa Peña

Departamento de Física e Departamento de Engenharia e Ciências Nucleares, IST, Universidade de Lisboa
LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas

teresa.pena@tecnico.ulisboa.pt

“A mais interessante teorização dos tempos recentes é a de Heisenberg-Born-Jordan sobre estados quânticos: os cálculos são verdadeira feitiçaria.”

Albert Einstein, carta a Michele Besso

Com a conclusão das celebrações do Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quântica, chegou o momento ideal para refletir sobre o alcance científico da Mecânica Quântica, desenvolvida ao longo do século XX, e sobre o seu incrível impacto tecnológico que permanece transformador no século XXI. A feitiçaria (ou talvez melhor, magia) dos cálculos de que falava Einstein converteu-se, ao longo de um século, e converte-se ainda, também em real feitiçaria (magia) tecnológica. Apresentamos neste artigo os princípios da Mecânica Quântica e o seu impacto direto, tanto no significado do ato de medir, a base da ciência, como na operacionalidade dos computadores quânticos da segunda revolução quântica. Abordamos ainda as condições que levam ao comportamento quântico (caixa 1) e a forma como este emerge ou se desvanece no mundo macroscópico.

Introdução:

Das anomalias da Física Clássica à Economia

A Mecânica Quântica oferece uma visão integrada de princípios fundamentais e ferramentas transformadoras. Demonstra, de forma única, que sondar e medir fenómenos a escalas que transcendem a observação humana direta permite criar tecnologias que beneficiam a humanidade nas suas dimensões individual e social.

A Física Quântica foi motivada, no final do século XIX, por anomalias inexplicáveis à luz da Física Clássica: a radiação do corpo negro, o mistério dos espectros de emissão dos átomos e o enigma da estabilidade das órbitas dos eletrões. Ao longo do século XX, a física destes processos — que revelaram que a energia a escalas atómicas não varia de forma contínua — evoluiu para a Teoria Quântica. Esta, por sua vez, deu origem a tecnologias disruptivas que mudaram o mundo.

A Mecânica Quântica alicerça a compreensão da Natureza em princípios estranhos à nossa intuição, que dificilmente ou nunca se entranham, válidos a uma escala de tamanhos milhares de milhões de vezes inferior à dos seres humanos. No entanto, é omnipresente na nossa civilização, com contributos precio-

sos para a sustentabilidade através de materiais e dispositivos inovadores. Se os semicondutores (Caixa 2 e Tabela 2) tornaram possíveis os telemóveis, computadores, robótica e painéis solares, os supercondutores (Caixa 3 e Tabela 3) impactam áreas como a saúde, indústria, ambiente e transportes. Das tecnologias quânticas emergiram lasers, transístores, ressonância magnética e sensores de precisão; hoje, parece não haver tecnologia que escape ao enquadramento da Mecânica Quântica.



Devido ao seu papel central na Economia, atualmente os semicondutores são um tema de segurança nacional. A capacidade de fabricar chips de 2 nm ou 3 nm (os mais avançados) está concentrada em poucas empresas (como a TSMC em Taiwan), e a cadeia de abastecimento global extremamente sensível a tensões geopolíticas. A Ciência é neutra e alimentada pela criatividade e satisfação da descoberta, os ainda “superpoderes” do ser humano na era em que a Inteligência Artificial está a mudar a forma de fazer ciência. Mas a Tecnologia pode não ser neutra!

A primeira e a segunda revoluções quânticas

A primeira revolução quântica, marcada pelos semicondutores e transístores, trouxe a era digital e a computação clássica. Caracterizou-se pelo uso “passivo” de efeitos quânticos em materiais e a miniaturização de dispositivos. Já o final do sécu-

lo XX e o início do XXI trouxeram a segunda revolução quântica, que vivemos hoje: uma nova era na computação, criptografia e comunicação.

Esta segunda revolução [1] distingue-se da primeira pela preparação e manipulação ativa de estados quânticos especificamente desenhados (“engineered”). Estes estados não se encontram de forma natural no Universo, ao contrário dos átomos da Tabela Periódica que a Teoria Quântica originalmente explicou. Enquanto a primeira revolução estabeleceu o domínio quântico na eletrónica e instrumentação, a segunda revolução define uma nova etapa: a da supremacia na computação e comunicação.

Esta nova era concretiza-se pelo engenho no uso ativo dos princípios teóricos de superposição (ou sobreposição), entrelaçamento e coerência dos estados da matéria. Uma das suas promessas é a maior ubiquidade da Inteligência Artificial e a sua fusão com pessoas e objetos. Esta promessa será maldição ou salvação? Ainda não sabemos.



De Helgoland ao Hardware Quântico

O artigo “Umdeutung” (Reinterpretação)

O marco fundador da Mecânica Quântica ocorreu no verão de 1925, quando Werner Heisenberg, isolado na ilha de Helgoland para recuperar de uma crise aguda de febre dos fenos [2], escreveu o artigo que inauguraria a chamada mecânica matricial [3].

O ponto de partida de Heisenberg foi audaz: rejeitou a existência das órbitas dos eletrões no átomo, aceitou a impossibilidade de seguir em cada instante a posição e o momento linear (base da mecânica clássica) desses eletrões, e fixou-se numa formulação estritamente assente em observáveis — as frequências discretas e as intensidades das linhas espectrais da radiação emitida pelos átomos (o análogo do arco-íris para a radiação visível).

Em vez de procurar uma nova interação que explicasse as ór-

bitas estáveis ou novas leis dinâmicas, Heisenberg utilizou a 2.ª Lei de Newton. Mas rompeu com a Física clássica ao introduzir nessa Lei as grandezas posição e momento, em cada instante, não como números, mas antes tabelas de números

$$x(t), p(t)$$

formadas pelos coeficientes de Fourier dessas grandezas periódicas nas frequências dos saltos energéticos das órbitas. As tabelas eram de facto matrizes, como reconhecido por Dirac pouco tempo depois.



O golpe de génio no artigo *Umdeutung* [3], como ficou conhecido, surgiu ao multiplicar as expansões de Fourier da posição e do momento. Heisenberg eliminou, por opção, os termos em que as frequências não seguiam o princípio de combinação de Rydberg-Ritz (segundo o qual a frequência de uma linha espectral é a soma de outras duas). Ao fazê-lo, deduziu que a multiplicação das tabelas não comuta, isto é

$$x(t)p(t) \neq p(t)x(t).$$

Este resultado abalou a essência da Física Clássica: se a ordem dos fatores altera o produto, o que significa, afinal, o ato de medir? Medir o momento antes da posição altera o valor que se mede para a posição e vice-versa?

Mais tarde, após a inspiração febril de Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan [4] formalizaram rigorosamente este resultado através das relações de comutação canónicas. A ruptura com a Física clássica ficou consolidada.

Heisenberg incluiu ainda no artigo *Umdeutung* uma primeira digressão pelo que hoje conhecemos como o Teorema de Ehrenfest, segundo o qual os valores médios (valores esperados) das grandezas quânticas evoluem no tempo de forma análoga às equações da mecânica clássica, estabelecendo

uma ponte fundamental entre os dois mundos.

Destruição criativa e a relação entre Ciência e Tecnologia

O episódio de Helgoland ilustra como a Física avança através de saltos conceptuais radicais, frequentemente em contextos inesperados. O isolamento e a medicação para a febre dos fenó podem ter potenciado a originalidade visionária de Heisenberg. O seu artigo é um paradigma de destruição criativa (ou criação destrutiva?): uma construção nova que, para existir, teve de dismantelar os pilares do pensamento anterior.

Curiosamente, exatamente cem anos depois, o Prémio Nobel da Economia de 2025 foi atribuído à teoria da "destruição criativa", que reconhece na inovação tecnológica o motor que impede a estagnação e gera crescimento. Embora muitos utilizem esta teoria para defender a primazia da ciência aplicada, a Mecânica Quântica é o exemplo flagrante de que a ciência fundamental tem a semente da transformação.

Contudo, o inverso também é verdadeiro: a investigação aplicada gera conhecimento fundamental. Veja-se o caso da instrumentação ótica: o aperfeiçoamento das lentes (onde trabalhou Spinoza) e a luneta de Galileu foram precursores da Astrofísica moderna. Não existe um sentido único na caminhada da ciência e inovação! O que existe é um diálogo constante entre a teoria pura e a invenção prática e tecnológica.

Analisemos então os princípios teóricos da Mecânica Quântica e a sua articulação com a inovação, em particular da 2ª revolução quântica.

1. Quantização

As energias permitidas de um sistema de partículas fortemente confinado estão restritas a um conjunto discreto de valores, ao contrário do que acontece na Física Clássica, onde a energia varia de forma contínua. Na Natureza, à escala atómica, as partículas "sobem ou descem a escada" dos níveis de energia possíveis: tal como nós só podemos estar estacionários num degrau e nunca entre dois, uma partícula não pode existir em estados de energia intermédios.

Este fenómeno é uma consequência direta da natureza ondulatória da matéria. Quando uma partícula, como um electrão, é confinada (por exemplo, pelo potencial eléctrico de um núcleo), a sua função de onda deve satisfazer condições de fronteira específicas. Tal como as notas de uma corda de guitarra dependem do seu comprimento, apenas certas frequências são permitidas — e, portanto, também apenas certas energias, devido à relação frequência-energia que Planck descobriu ao estudar a radiação do corpo negro.

A quantização estende-se a outras propriedades, como o momento angular e o *spin*. Este último define como uma partícula interage com campos magnéticos, tal como a massa dita a como interage com campos gravitacionais. Uma consequência direta desta discretização é que os espectros de emissão e absorção dos elementos apresentam riscas nítidas, correspondentes às diferenças exatas de energia entre os estados permitidos.

Na 2.ª Revolução Quântica, este princípio é levado ao extremo com os pontos quânticos (quantum dots). Nestas nanoestruturas, aprisionam-se electrões e manipula-se o espaçamento entre degraus de energia, permitindo criar lasers de alta precisão, detetores de fótons únicos e, crucialmente, os estados que alicerçam a informação quântica.

2. Princípio da Incerteza

A informação sobre um sistema obtém-se através de atos de medida. A informação relevante sobre qualquer sistema é a que permite prever a evolução desse sistema. Na Mecânica Clássica isto exige conhecer num dado instante a posição e a velocidade. É aqui que a Física Quântica se distingue da Física Clássica. Carlo Rovelli descreve esta diferença de forma elegante [5]: Na Mecânica Quântica "A quantidade máxima de informação relevante que se pode adquirir sobre um objeto é finita". Este é o cerne do Princípio da Incerteza de Heisenberg. Para as incertezas na posição e o momento linear estabelece que

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2.$$

Esta desigualdade, onde $\hbar$ é a constante de Planck reduzida, implica que não podemos conhecer simultaneamente a posição e o momento de uma partícula: as incertezas na posição e no momento não podem ser simultaneamente próximas de zero, nas escalas em que a constante de Planck não possa ser considerada praticamente nula.

No entanto há mais: a não comutação do produto das matrizes de Heisenberg para a posição e o momento linear também tem consequências profundas. Seguindo ainda Rovelli [5]: "É sempre possível obter nova informação relevante sobre um objecto." Isto contradiz a primeira afirmação, o princípio de incerteza? Só aparentemente! A primeira afirmação diz que a informação relevante é finita, a segunda que se transforma e é renovável. De facto, se medirmos primeiro a posição, ficamos sem informação precisa sobre o momento, pelo princípio da incerteza. Mas, pela não comutatividade da medição das duas grandezas, se a seguir medirmos o momento, apagamos, perdemos a informação que tínhamos sobre a posição que passa a ter qualquer novo valor e se não esgotou num valor fixo.

Esta limitação não é uma falha dos nossos aparelhos, mas uma característica intrínseca da realidade que é crítica para o funcionamento do hardware quântico.

3. Superposição (ou sobreposição) Quântica

Na física clássica um objeto está num lugar ou noutro, e não simultaneamente em dois ou mais lugares; um pião gira da esquerda para a direita ou da direita para a esquerda, e não simultaneamente nos dois sentidos; um interruptor está ligado ou desligado e não simultaneamente ligado e desligado, etc. Na mecânica quântica, uma partícula (electrão, fóton, próton,...) pode existir numa combinação linear de todos ou alguns estados possíveis.

Esta superposição persiste apenas enquanto o sistema não é

observado. No momento em que medimos o estado da partícula, a superposição de várias componentes ou estados é destruída ("colapsa"), reduzindo-se apenas a um dos estados da superposição.

O que faz colapsar a superposição de estados num só estado? Uma hipótese é a interação que qualquer ato de medida implica (ver decoerência no ponto 4). Outra interpretação é a teoria dos Muitos Mundos (Universos Paralelos) que interpreta a função de onda da equação de Schrodinger como a entidade que descreve a realidade. Segundo essa teoria quando se faz uma medição a realidade ramifica-se em vários mundos, ou versões do mundo igualmente reais e concretas. A incompatibilidade com a experiência de outras teorias alternativas, como as de "variáveis escondidas" iniciadas por David Bohm para salvar o determinismo, foi demonstrada pelas experiências que valeram o Nobel de 2022 a Aspect, Clauser e Zeilinger.

Os computadores quânticos usam o princípio da superposição para mudar o jogo clássico. Um qubit (ou bit quântico) em vez de um bit clássico - que é 0 ou 1 - representa simultaneamente os valores 0 e 1, o dá aos computadores quânticos uma capacidade massiva de processamento paralelo. N qubits podem representar 2^N estados ao mesmo tempo, o que dá uma vantagem exponencial sobre N bits clássicos - que representam só N estados. Com apenas 300 qubits, poderíamos processar mais estados do que o número de átomos no universo observável. Foi por isso que Richard Feynman [6], no início da década de 1980, sugeriu um computador quântico como ferramenta eficaz para resolver problemas em física e química.

O desafio da engenharia atual é manter este estado de superposição tempo suficiente para efetuar cálculos, conhecido como tempo de coerência que analisamos de seguida.

4. Decoerência

A decoerência é o processo pelo qual um sistema quântico perde a propriedade de superposição ao interagir com o ambiente, transformando-se num sistema clássico comum. É a razão pela qual uma mesa ou um livro não são superposições de mesas ou livros diferentes. Um caso particular de decoerência é o que acontece quando o ato de medida é realizado num sistema quântico, pois a escalas em que a constante de Planck não pode ser considerada nula a medição afecta inexoravelmente o sistema, de acordo com o Princípio de Incerteza.

Para combater a decoerência, os processadores quânticos (como o Willow da Google ou os sistemas da IBM) operam em Refrigeradores de Diluição a temperaturas de milikelvin, protegidos por blindagens que bloqueiam o campo magnético terrestre e sinais de Wi-Fi. O desafio atual é aumentar o tempo de coerência — o "cronómetro" que dita quanto tempo temos para calcular antes que a física quântica se desvança. Em 1999, este tempo era de 1 nanosegundo; hoje, aproxima-se de 1 milissegundo, com a esperança de que os qubits topológicos (estudados pela Microsoft) ofereçam uma imunidade geométrica à decoerência: em vez de apenas um ponto frágil, armazena-se a informação em tranças quânticas. Se o sistema sofrer um pequena interação com o ambiente, a geometria da trança não muda, e a informação permanece intacta.

5. Entrelaçamento

Um estado entrelaçado é um estado onde os estados de duas ou mais partículas estão correlacionados de tal forma que o estado quântico de uma não pode ser descrito independentemente do estado de outra, independentemente da distância que as separa, implicando uma conectividade não-local. Um estado é entrelaçado apenas se não puder ser escrito de forma separável, como produto de estados individuais.

Enquanto a superposição permite que um qubit represente os estados 0 e 1 simultaneamente, o entrelaçamento é o que permite que múltiplos qubits trabalhem de forma coordenada e correlacionada.

Um exemplo de estado entrelaçado é o que representa a superposição de dois cenários: no primeiro o estado da partícula A é 1 (branca) e o da partícula B é 0 (preta); no segundo, as cores das bolas estão trocadas. Este estado descreve duas caixas, cada uma com uma bola de cor desconhecida. Se ao abrirmos a primeira caixa observarmos 1 para a partícula A, sabemos instantaneamente que a outra partícula é 0, e vice-versa. A distância entre as caixas é irrelevante; a conectividade é não-local. O que importa é a forma como o sistema foi preparado originalmente.

Sem o entrelaçamento um computador quântico seria apenas um conjunto de partículas isoladas em superposição. É o entrelaçamento que cria a verdadeira capacidade do computador quântico, pois a alteração de um único qubit num sistema entrelaçado pode influenciar o estado de todos os outros, e assim permite filtrar, por entre triliões de combinações, a resposta correta para problemas complexos de química, física e criptografia. Sem estados entrelaçados não existiria o poder de processamento que define a supremacia quântica.

6. Efeito de túnel

Na mecânica clássica, uma partícula de massa m e energia E



só pode entrar numa zona onde a energia potencial é $U > 0$ se $E > U$, devido à conservação de energia. Por exemplo, se uma bola lançada junto ao chão não tem energia suficiente para atingir a altura de um muro, nunca passará para o outro lado. Mas, quanticamente, a função de onda atravessa mesmo a barreira, o muro, permitindo que a partícula reapareça do outro lado, porque a equação de Schrödinger independente do tempo admite uma solução de decaimento exponencial: $\psi(x) \sim e^{-\kappa x}$, onde

$$\kappa = \sqrt{\frac{2m(U - E)}{\hbar^2}}.$$

A escalas onde constante de Planck pode ser considerada praticamente zero a função de onda é nula e a barreira não é atravessada, recuperando-se o caso clássico.

O efeito de túnel não é apenas uma curiosidade teórica: é a razão porque o Sol brilha. Os prótons no interior das estrelas não têm energia térmica suficiente para vencer a repulsão eletrostática e a fusão nuclear dos prótons - que gera a energia das estrelas - só ocorre porque a barreiras de Coulomb é atravessada por efeito de túnel, com uma probabilidade não nula. Sem efeito de túnel os prótons primordiais não teriam conseguido formar núcleos mais pesados e não existiríamos. Que relação tem o efeito de túnel com os computadores quânticos? É um motor por detrás do hardware quântico: nas Junções de Josephson (ver caixa sobre supercondutores) os pares de electrões atravessam barreiras para criar o fluxo de corrente que define o qubit.

Curiosamente, o efeito túnel é também um desafio para a computação clássica: as chips de silício tradicionais estão a atingir um limite físico de miniaturização porque, à medida que diminuem, o efeito de túnel tem maior probabilidade de ocorrer e os electrões começam a atravessar as paredes dos transístores, gerando calor e erro (decoerência).

A Tabela 1 resume as funcionalidades, em permanente evolução ainda, dos princípios da Mecânica nos computadores quânticos.

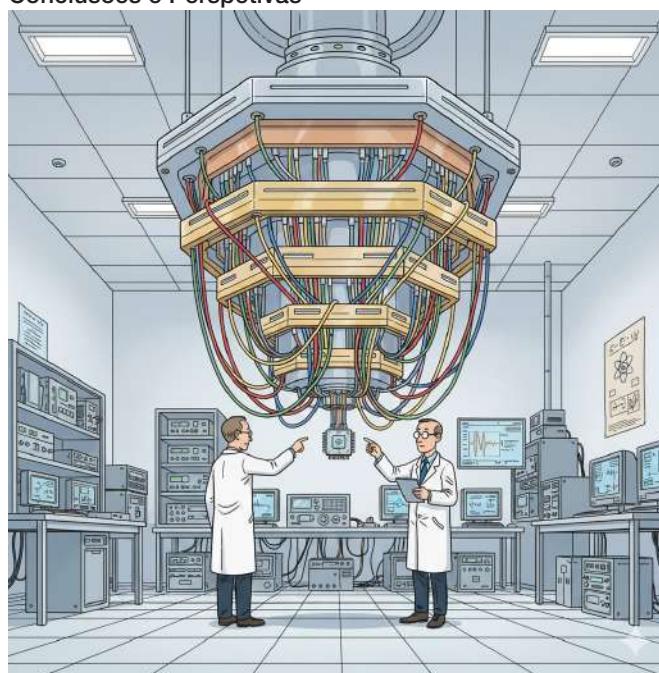
Progressos recentes

Os progressos mais recentes em computação quântica incluem não apenas o desenvolvimento de novos algoritmos, mas também demonstrações experimentais que exploram novos regimes onde dispositivos quânticos superam métodos clássicos conhecidos. Resultados de processadores supercondutores [7] e arquiteturas fotónicas [8] mostraram que tarefas de amostragem aleatória podem ser realizadas em tempos impossíveis para supercomputadores clássicos, inaugurando uma nova fase nos estudos de “vantagem quântica”.

A vantagem prática dos computadores quânticos depende da

fidelidade dos qubits e da tolerância ao ruído da superposição quântica [9], bem como da escolha criteriosa dos algoritmos clássicos de referência. Nos últimos anos, houve avanços notáveis em algoritmos quânticos e, em paralelo, esforços sistemáticos para medir, de forma rigorosa, quando e onde os dispositivos quânticos superam máquinas clássicas. Exemplos emblemáticos incluem o processador supercondutor Sycamore da Google [10], que executou uma tarefa de amostragem complexa, alegando um custo computacional que seria proibitivo para supercomputadores clássicos.

Conclusões e Perspetivas



Interdisciplinariedade

Criar e consolidar tecnologias quânticas exige uma abordagem interdisciplinar que una teoria quântica, engenharia de sistemas, ciência dos materiais, criogenia, teoria da informação e ciência computacional.

O legado iniciado por Heisenberg em Helgoland alimenta laboratórios e empresas que procuram atingir computação tolerante ao ruído, comunicações invioláveis e metrologia de precisão

Princípio	Papel no Computador Quântico	Implicação no Computador Quântico	Impacto no Computador Quântico
Quantização	Permite estados quantizados.	Funcionalidade.	Criação de qubits.
Sobreposição	Permite que um qubit exista em 0 e 1 simultaneamente.	Funcionalidade.	Capacidade de processamento paralelo massivo.
Entrelaçamento	Cria correlações entre qubits.	Funcionalidade.	Permite coordenação entre múltiplos qubits e transporte de informação.
Efeito de Túnel	Permite que partículas atravessem barreiras de energia.	Misto: Funcionalidade e Disfunção (Erro).	Permite o funcionamento das Junções de Josephson nos qubits supercondutores mas pode causar fuga de corrente em qubits mal isolados.
Decoerência	Interação indesejada com o ambiente.	Disfunção (Erro).	Ruído que destrói a informação e termina o cálculo prematuramente.

Tabela 1 - Princípios da Mecânica Quântica e impactos respectivos no Computador Quântico

sem precedentes. O caminho que começou com o mistério da radiação do corpo negro continua...

Cem anos após a "alucinação" visionária de Heisenberg em Helgoland, a Mecânica Quântica deixou de ser apenas um exercício de abstração matemática e imaginação física para se tornar o alicerce da nossa infraestrutura tecnológica. A transição da primeira para a segunda revolução quântica marca a passagem do uso passivo de materiais para a manipulação ativa da própria natureza da informação. A superposição e o entrelaçamento dos estados quânticos geram um processamento paralelo que não é apenas mais rápido, mas fundamentalmente diferente.

Confluências: Ciência, Computação Quântica, Inteligência Artificial e Sociedade

A promessa de computadores capazes de simular novos fármacos em segundos, de quebrar códigos criptográficos outrora inexpugnáveis ou de otimizar redes logísticas globais é, simultaneamente, entusiasmante e assustadora. Esta revolução converge agora com o crescimento da Inteligência Artificial. A fusão entre o hardware quântico e a IA promete uma ubiquidade de processamento que poderá integrar-se de forma invisível nas nossas vidas e até na nossa biologia.

Surge então a questão que deixámos no início: esta promessa é maldição ou salvação, ameaça ou oportunidade? A história ensina-nos que a tecnologia pode não ser moralmente neutra; o seu impacto depende da ética e dos objetivos de quem a desenvolve e aplica. Se, por um lado, a computação quântica pode ser a chave para problemas de sustentabilidade, na

saúde e no ambiente, por outro, tem consigo o risco de uma enorme desigualdade entre quem detém a "supremacia quântica" e quem depende dela.



1925: A halucinação quântica



2025: O alicerce tecnológico

Com o encerramento do Ano Internacional da Ciência e Tecnologias Quânticas, uma questão natural é: que novas aplicações surgirão quando alcançarmos controlo total sobre sistemas quânticos complexos? A história da Física sugere que não sabemos exatamente responder a esta pergunta. O futuro não está determinado, está em sobreposição. A nossa responsabilidade está em realizarmos bem as nossas próximas medições — as nossas escolhas coletivas — para fazer colapsar o futuro numa realidade melhor que a do presente.

O que devemos certamente garantir é que na Ciência se continue a fazer perguntas e se estimule a criatividade — superpoderes humanos que temos de cultivar ainda mais agora, porque a Inteligência Artificial já permite a identificação das melhores respostas e dos padrões nos grandes oceanos de dados, com uma rapidez que nos ultrapassa.

Caixa 1 - Por que não observamos à nossa volta comportamentos quânticos?

No mundo quântico, todas as partículas se comportam como ondas. Sabemos que uma onda de luz ao passar por obstáculos comparáveis ao seu comprimento de onda, cria zonas alternadamente iluminadas e escuras que só se explicam com o fenómeno de interferência: ondas originadas em pontos diferentes adicionam-se ou subtraem-se. Como a luz, também o comportamento ondulatório de partículas exige escalas especiais de energia e extensão no espaço (ou tamanho) das partículas.

Experiências de difração e interferência de feixes de partículas mostram que comprimento de onda de de Broglie da onda associada a uma partícula é dado por

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

onde h é a constante de Planck. Quando este comprimento de onda se estende muito para lá da dimensão d da partícula, o comportamento quântico acontece. As ondas de de Broglie, tal como a luz ou o som, ou as ondas do mar, das partículas quânticas não têm uma localização bem definida no espaço, mas espalham-se no espaço ou numa dada região. Mas para uma bola com a massa m de 1 kg este comportamento quântico não é observável: o comprimento de onda da bola não se estende para lá da sua dimensão natural, é praticamente zero.

De facto, para podermos observar efeitos quânticos numa bola de 1 kg e 10 cm de diâmetro d , teríamos que impor a condição $\lambda \geq d$. Usando a relação não relativista entre energia cinética E e momento linear p

$$E = \frac{p^2}{2m},$$

podemos verificar que para se ter $\lambda \geq d$ a energia cinética tem de ser inferior a 10^{-65} J ou, em unidades de temperatura, 10^{-42} K. Por isso nunca vemos bolas de ténis quânticas! O resultado obtido é cerca de um milhar de milhões de biliões de biliões de vezes inferior à temperatura mais baixa possível num laboratório. Mesmo que a bola tivesse uma energia tão inimaginavelmente baixa, o ruído térmico, resultante das colisões com as moléculas que a rodeiam e com os fótons (luz) do ambiente, e as vibrações internas destruíam qualquer efeito quântico. Para referência, a radiação cósmica de fundo é 2,7 K e o universo é mesmo muito frio!

Esta demonstração numérica mostra que em geral uma partícula macroscópica não tem comportamento quântico. Mas existem sistemas macroscópicos especiais, feitos de muitas partículas, com comportamento quântico colectivo emergente a temperaturas baixas realizáveis no laboratório, descoberta que valeu o prémio Nobel da Física de 2025. É o caso dos supercondutores, que têm um papel relevante na tecnologia e ciência de hoje.

Caixa 2 - Semicondutores e a era digital

Um semicondutor é um tipo de material sólido cuja condutividade eléctrica é intermédia, situando-se entre a de um condutor e a de um isolante. Esta propriedade permite a criação de transístores, que controlam o fluxo de corrente eléctrica e funcionam como interruptores eléctricos extremamente pequenos e rápidos. O transístor é o bloco de construção fundamental dos

chips da electrónica digital.

É a capacidade de concentrar milhões de milhões de interruptores em miniatura num único chip que faz do semicondutor (silício) a base da tecnologia dos smartphones, computadores, painéis solares,...

Área de Impacto	Principais Tecnologias / Dispositivos	Função do Semicondutor
Computação e IA	PCs, Servidores, GPUs (NVIDIA), CPUs.	Processamento de dados complexos e execução de modelos de IA.
Comunicação	Smartphones, Redes 5G/6G, Satélites, Routers.	Modulação de sinais de rádio e gestão de dados em alta velocidade.
Saúde e Medicina	Ressonância Magnética, Pacemakers, Cirurgia Robótica.	Sensores de alta precisão e processamento de imagem diagnóstica.
Energia Renovável	Painéis Fotovoltaicos, Inversores Eólicos.	Conversão de luz solar em eletricidade e gestão de redes inteligentes.
Indústria 4.0	Robôs Industriais, Sensores IoT, Impressão 3D.	Automação de linhas de produção e monitorização em tempo real.
Automóvel	Carros Elétricos (EV), Condução Autónoma, ADAS.	Controlo da bateria, sensores de proximidade e info-entretenimento.
Eletrónica de Consumo	TVs LED/OLED, Frigoríficos Inteligentes, Consolas.	Controlo de eficiência energética e interfaces de utilizador.
Defesa e Espaço	Radares de varrimento ativo, Telescópios (James Webb).	Deteção de infravermelhos e sistemas de navegação de precisão.

Tabela 2 - Síntese do impacto dos semicondutores.

Caixa 3 - Supercondutores e aplicações

Um supercondutor é um exemplo de um objeto macroscópico com comportamento quântico. Num condutor normal, os electrões colidem com os átomos, gerando resistência (calor). Num supercondutor a temperaturas muito baixas, os electrões que normalmente se repelem unem-se formando pares (de Cooper) que, sendo bósons, se agregam e coordenam num grande condensado macroscópico, descrito por uma única função de onda colectiva. Abaixo de uma temperatura crítica os supercondutores apresentam resistência eléctrica nula.

As aplicações dos supercondutores cobrem vários sectores de atividade:

- Na medicina, as máquinas de ressonância magnética (MRI) utilizam bobinas de supercondutores (como nióbio-titânio) para criar campos magnéticos potentes e estáveis; sem resistência, a corrente eléctrica circula sem gerar calor, permitindo imagens de alta resolução irrealizáveis com ímanes convencionais.
- Nos transportes, nos Comboios Maglev os supercondutores permitem uma levitação estável de massas de toneladas; sem atrito com os carris o gasto energético é eficiente e atingem-se velocidades da ordem de 600 km/h!
- Nas redes eléctricas, cabos supercondutores podem transportar até 10 vezes mais eletricidade do que um cabo de cobre, sem perda de energia por calor.
- Com os sensores de ultraprecisão (SQUIDs, "Superconducting Quantum Interference Device") detectam-se as

fraquíssimas correntes eléctricas no cérebro humano em Magnetoencefalografia, e na prospeção mineral variações magnéticas mínimas.

- Na investigação científica, o acelerador de Hadrões (LHC) no CERN usa ímanes supercondutores para acelerar prótons até velocidades próximas da velocidade da luz.

Entrando na 2.ª revolução digital, muitos computadores quânticos atuais (como os da IBM e Google) utilizam circuitos de materiais supercondutores em vez de chips convencionais. No coração dos qubits está a Junção de Josephson: pelo efeito de túnel, um isolante entre dois supercondutores controla os níveis de energia do circuito e os estados lógicos 0 e 1.

Qual o Papel dos Supercondutores nos Computadores Quânticos? Para que um computador quântico funcione, as suas componentes devem conduzir eletricidade sem qualquer resistência e proteger a informação quântica do ruído externo. Os supercondutores respondem a este desafio: Como os supercondutores não dissipam energia sob a forma de calor, ajudam a manter a coerência quântica que permite ao qubit realizar cálculos.

Como as propriedades supercondutoras só existem a temperaturas extremamente baixas, próximas do zero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), os computadores quânticos são instalados num ambiente mais frio que o do espaço profundo.

Tabela 3: Síntese das aplicações dos supercondutores.

Área	Aplicação	Benefício Principal
Saúde	Ressonância Magnética	Imagens sem radiação ionizante.
Transporte	Comboios Maglev	Velocidade extrema e ausência de atrito.
Ciência	Aceleradores de Partículas	Estudo das leis fundamentais do universo.
Energia	Cabos de Transmissão	Eficiência total (zero desperdício).
Computação	Computadores Quânticos	Criação de qubits (como os da IBM/Google).

Tabela 3 - Síntese das aplicações dos supercondutores.

Referências

- [1] Dowling, J., & Milburn, G. (2003). "Quantum Technology: The Second Quantum Revolution." *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 361, 1655-1674.
- [2] Cassidy, D. (1992). *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*. W. H. Freeman.
- [3] Heisenberg, W. (1925). "Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen." *Zeitschrift für Physik*, 33, 879-893, (1925)
- [4] Born, M., & Jordan, P. (1925). "Zur Quantenmechanik." *Zeitschrift für Physik*, 34, 858-888.
- [5] Carlo Rovelli, *Helgoland, The Strange and Beautiful Story of Quantum Mechanics*, Penguin Random House, (2021).
- [6] Feynman, R. P. *Simulating physics with computers*. *Int. J. Theor. Phys.* 21, 467-488 (1982).
- [7] Arute, F. et al. "Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor." *Nature*, 574, 505-510, (2019).
- [8] ZHONG, Han-Sen, et al. "Quantum computational advantage using photons". *Science*, v. 370, n. 6523, p. 1460-1463, (2020).
- [9] PRESKILL, John. "Quantum Computing in the NISQ era and beyond". *Quantum*, v. 2, p. 79, (2018).
- [10] PAN, Feng; CHEN, Keyang; ZHANG, Pan. "Solving the sampling problem of the Sycamore quantum circuits". *Physical Review Letters*, v. 129, n. 9, 090502, (2022).

Declaração de Uso

Foram utilizadas ferramentas de IA no desenvolvimento deste artigo. Esta utilização aplicou-se especificamente aos processos de recolha de alguma informação, revisão da escrita e elaboração de todas as figuras. Todas as contribuições de IA foram revistas pela autora seguindo critérios de fiabilidade e coerência da informação, e procura de eficácia da mensagem escrita e gráfica.

As ferramentas utilizadas foram:

- OpenAI (2025). ChatGPT [Large language model]. Acedido em Novembro e Dezembro de 2025, <https://chat.openai.com>
- Google. (2025). Gemini [Large language model]. Acedido em Novembro e Dezembro de 2025, <https://gemini.google.com>



Teresa Peña é o Professora Catedrática no Instituto Superior Técnico (IST), ULisboa, e investigadora sénior do LIP onde é líder do grupo de física nuclear/hadrónica teórica NPSTRONG. É Membro Associado da HFHF, a Academia de Pesquisa Helmholtz Hesse para FAIR/GSI, um *think-tank* para a Investigação nas instalações do GSI (Darmstadt) e Sócia Honorária da EPS.

Obteve o reconhecimento de Professora

Distinta do IST e é membro Correspondente da Academia das Ciências de Lisboa, classe de Ciências. Autora de mais de uma centena de artigos e vários livros, investigou sistemas complexos de física hadrónica e nuclear, incluindo forças de três nucleões, produção de mesões, e reacções fotonucleares que afectam a evolução do Cosmos. Investiga estruturas multiquark exóticas que foram recentemente descobertas. É autora do livro "Nucleus: a trip into the heart of matter", com Ray Mackintosh, Jim Al-Khalili, Bjorn Jonson, ed. Johns Hopkins University Press e traduzido para português, francês, checo, húngaro, sueco e coreano, bem como do livro "Einstein, Albert Einstein, Homem, Cidadão e Cientista", com Jorge Dias de Deus, ed. Gradiva.

Foi Directora da Gazeta de Física, Presidente da SPF e membro do Conselho Editorial do European Physics News (EPN-EPS). Serviu dois mandatos como Membro da Comissão Executiva da Sociedade Europeia de Física. É Membro da Comissão Internacional de várias Conferências na sua área de trabalho (por exemplo, NSTAR24), da Comissão Europeia de Problemas de Poucos Corpos e do Internacional Light Cone Advisory Committee, ILCAC. Serviu o Senado da ULisboa e a Comissão Permanente do Senado Universitário para Assuntos Científicos. No IST, coordenou dois Programas de Mestrado e lançou o de Engenharia Biomédica, foi Presidente do Departamento de Física e Presidente do Conselho Pedagógico.