

A Ótica e a Física Atômica na revolução das Tecnologias Quânticas

José Carlos Viana Gomes

Departamento de Física, Universidade do Minho

zgomes@fisica.uminho.pt

Embora raramente pensemos nisso, grande parte do mundo moderno depende diretamente de descobertas feitas no âmbito da Ótica e da Física Atômica. Em grande medida, vivemos numa civilização construída sobre a luz. A invenção do laser, há pouco mais de sessenta anos, e o desenvolvimento das fibras ópticas mudaram radicalmente a forma como comunicamos, trabalhamos e organizamos a sociedade. Sem elas, a internet simplesmente não existiria.

Mais recentemente, a integração de guias de onda ópticos e múltiplos componentes óticos em circuitos fotónicos, uma tecnologia designada por *silicon photonics*, está a substituir componentes eletrónicos em telecomunicações, permitindo velocidades mais elevadas, maior capacidade de transmissão de dados e uma eficiência energética significativamente superior. O uso de fótons em vez de eletrões tem ganhado importância nas telecomunicações, mas também na própria informática e inteligência artificial. Ainda na sua infância, as redes neuronais óticas (*Optical Neural Networks*) [1] usam luz para processar informações de forma simultânea e paralela, explorando o comportamento natural da interferência óptica para realizar operações matemáticas complexas, a altíssimas velocidades e muito menor consumo energético. Startups como a Neurophos têm vindo a desenvolver unidades de processamento óptico (*Optical Processing Units*, OPUs), prometendo reduzir em milhares de vezes o consumo energético necessário para tarefas de *machine learning* (ver Caixa 1).

A computação ótica é um dos exemplos, muito recente e talvez com um enorme potencial disruptivo na economia global, de um conjunto de tecnologias que tem como precursor investigação fundamental feita numa área da Física que é geralmente designada por Física Atômica, Molecular e Ótica ou, na terminologia inglesa por *Atomic, Molecular, and Optical Physics* (AMOP). Esta é uma das áreas mais tradicionais e consolidadas da Física, listada como a primeira divisão em sociedades científicas como a *American Physical Society* e a *European Physical Society*. Ao longo de mais de um século, esta área não só produziu tecnologias transformadoras, como também esteve no centro de algumas das maiores revoluções concetuais da ciência. Este texto pretende não só ilustrar com exemplos a importância fundamental da AMOP na tecnologia emergente, em particular nas ditas tecnologias quânticas, como enfatizar o

seu profundo impacto na economia e na sociedade, e como o treino de novas gerações de jovens investigadores nesta área é um fator crítico para a competitividade tecnológica das nações, com implicações diretas não apenas económicas, mas também geopolíticas. A necessidade de atrair atenção para esta área científica é particularmente premente no nosso país, onde a ausência de tradição se reflete em níveis alarmantemente baixos de atividade e investimento.

Óptica de precisão e soberania tecnológica

Uma outra tecnologia com enorme importância económica e geopolítica, crucial para a produção de microchips de última geração usados em computação de alto desempenho e inteligência artificial, é a litografia com luz no ultravioleta extremo (EUV). Estas máquinas, consideradas por muitos as mais complexas alguma vez construídas, utilizam sistemas ópticos avançadíssimos para manipular luz no ultravioleta extremo, gerada por plasmas criados com lasers de alta potência. O controlo desta radiação exige sistemas óticos de precisão extraordinária, capazes de operar em condições extremas de vácuo e estabilidade mecânica. A complexidade destes sistemas é tal que a tecnologia se encontra, em grande medida, concentrada numa única empresa europeia, a ASML, tornando-se um recurso estratégico disputado à escala global. Este exemplo ilustra de forma clara que a competitividade económica e a soberania tecnológica das nações dependem não apenas do acesso a matérias-primas ou infraestruturas industriais, mas também, de forma crítica, do domínio de conhecimento científico e tecnológico avançado. A formação de investigadores altamente qualificados, a acumulação sustentada de conhecimento e a capacidade de o aprofundar, adaptar e transferir para novas aplicações constituem, por isso, elementos centrais dessas capacidades estratégicas.

Um outro bom exemplo de contribuição crítica das tecnologias AMOP é nos sistemas globais de navegação por satélite, como o GPS ou o Galileo. Estes sistemas dependem no seu funcionamento de relógios atómicos de extrema precisão. A sincronização precisa do tempo, algo que hoje tomamos por garantido, só é possível graças ao controlo quântico e medição precisa de transições atómicas. Além da usual utilização destes sistemas por pessoas comuns para chegar a seu destino, esta tecnologia é fundamental para os sistemas de navegação

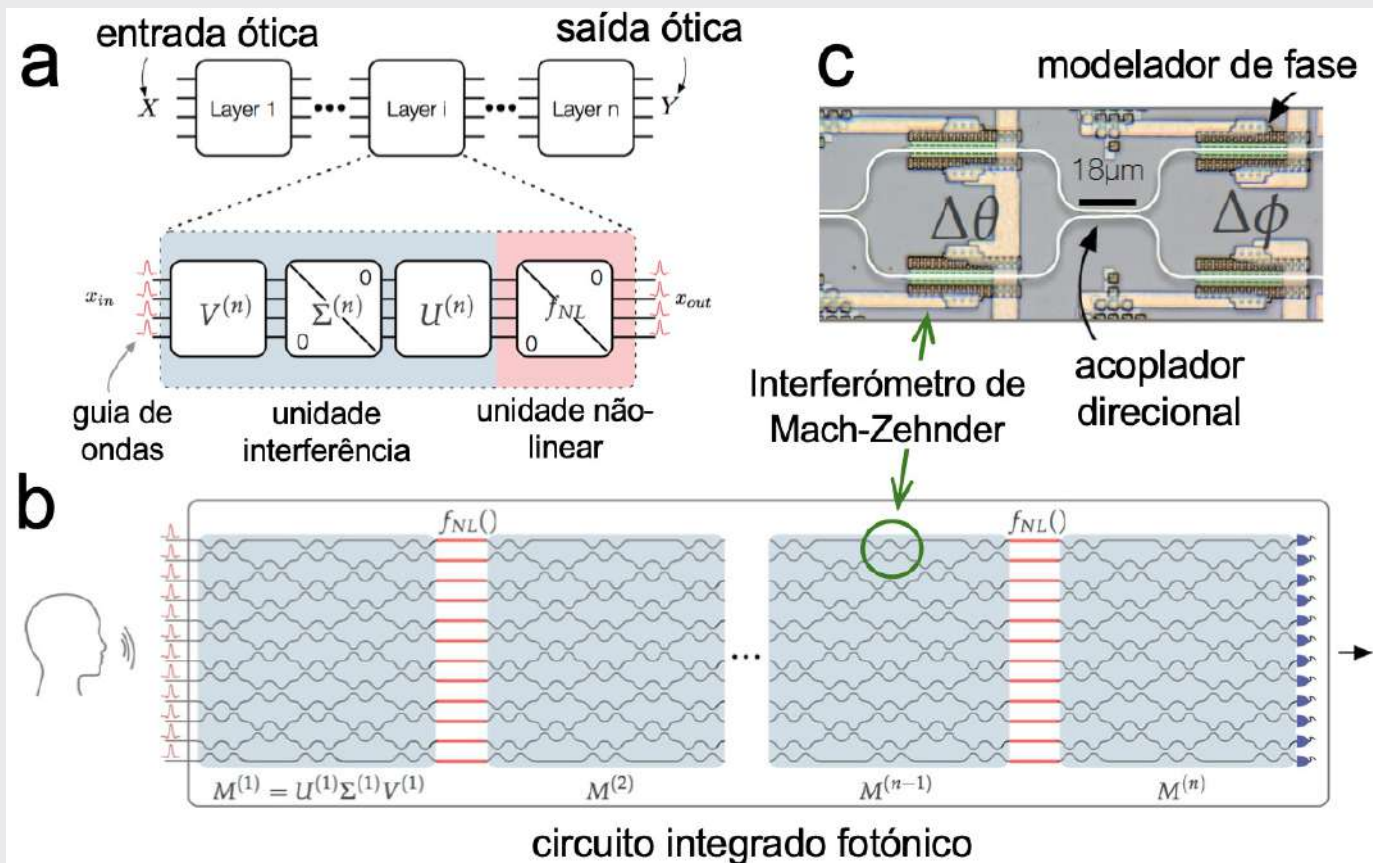


Figura 1: a) Decomposição da rede neural geral em camadas individuais, cada uma com unidades de interferência e não linear, requeridos para o funcionamento da rede neural; b) Proposta de esquema de uma rede complexa em ótica integrada; c) Ilustração de um interferômetro de Mach-Zehnder com modeladores de fase. Adaptada da Ref. Shen, 2017.

A figura ilustra uma arquitetura de rede neuronal ótica proposta em 2017, num trabalho em que os autores demonstraram a utilização de um processador fotônico no reconhecimento de vogais. Fabricado num circuito integrado fotônico de silício, o sistema era constituído por 56 interferómetros de Mach-Zehnder programáveis, o componente fundamental deste tipo de arquiteturas.

Recentemente, a empresa Neurophos anunciou o lançamento, previsto para 2028, de uma Optical Processing Unit (OPU) capaz de executar 10^{18} operações por segundo (um ExaOPS), um desempenho centenas de vezes superior ao atualmente alcançado por unidades de processamento gráfico (GPUs). Embora ainda não tenham sido divulgados muitos detalhes técnicos, a empresa afirma conseguir integrar mais de um milhão de elementos de processamento ótico, à escala micrométrica, num único chip.

Espera-se que as OPU's possam ser até 100 vezes mais eficientes energeticamente do que as GPUs em tarefas específicas de inteligência artificial. Atualmente, estas tarefas dependem de infraestruturas de computação de alto desempenho baseadas em eletrônica convencional, cujo consumo energético cresce a um ritmo vertiginoso. Estima-se que os grandes centros de dados dedicados à IA já consumam tantos terawatts-hora por ano quanto países de média dimensão e que, para satisfazer a procura global crescente, seja necessária a produção equivalente à de várias dezenas de centrais nucleares.

Este apetite energético tornou-se um dos principais desafios tecnológicos e ambientais da era da inteligência artificial.

Tal como nas fibras óticas, estes dispositivos têm a enorme vantagem de poderem transportar e processar múltiplos fluxos de dados simultaneamente no mesmo circuito, uma vez que os fótons não interagem entre si e podem ser facilmente distinguidos pela sua frequência. Isso permite aumentar drasticamente a largura de banda sem necessidade de ligações físicas adicionais. Além disso, são imunes a perturbações eletromagnéticas, não sofrem de interferência entre canais (cross-talk) e dissipam significativamente menos calor do que os circuitos eletrónicos tradicionais.

Tal como nas fibras óticas, estes dispositivos têm a enorme vantagem de poderem transportar e processar múltiplos fluxos de dados simultaneamente no mesmo circuito, uma vez que os fótons não interagem entre si e podem ser facilmente distinguidos pela sua frequência. Isso permite aumentar drasticamente a largura de banda sem necessidade de ligações físicas adicionais. Além disso, são imunes a perturbações eletromagnéticas, não sofrem de interferência entre canais (cross-talk) e dissipam significativamente menos calor do que os circuitos eletrónicos tradicionais.

e de defesa dos países. Num mundo cada vez mais dependente de sistemas de navegação por satélite, torna-se claro que esta dependência cria também vulnerabilidades estratégicas. A eventual indisponibilidade, temporária ou permanente, de sistemas globais como o GPS, por razões técnicas (como por exemplo em submarinos ou no espaço), naturais ou geopolíticas, exigiria alternativas capazes de garantir navegação e posicionamento autónomos. Nesse contexto, o acesso a outro tipo de dispositivos óticos e atômicos, como acelerómetros e giroscópios, é de fundamental importância. Baseados em interferómetros ultrasensíveis [2], este tipo de tecnologia, usada em gravímetros ou sensores de navegação, consegue em certas circunstâncias oferecer níveis de sensibilidade sem precedentes. Outro exemplo notável de sensores AMOP é o caso dos magnetómetros atômicos (também designados por “*optically pumped magnetometers*”, OPMs), dispositivos de altíssima sensibilidade que medem campos magnéticos utilizando vapores atômicos polarizados (por exemplo, rubídio) como sensores. Em particular, um certo tipo de OPMs que funcionam num regime de campo quase nulo, designados em inglês por *spin exchange relaxation free magnetometer* (SERF)¹ [3,4], podem atingir sensibilidades record de um femtoTesla (10^{-15} T) numa célula de 1 cm², num tempo de integração de 1 segundo, superiores aos melhores sensores supercondutores, e sem necessidade de sistemas complicados de criogenia. Este nível de sensibilidade, de 1 fT/Hz^{-1/2}, é o requerido para medir atividade cerebral, sendo que estes dispositivos são já usados em encefalografia (no caso, magnetoencefalografia²) ou como sensores neuronais para controle de próteses ou outros interfaces homem-máquina.

A lista de áreas em que ideias, técnicas e investigadores formados em AMOP desempenham um papel central poderia prolongar-se ainda por muitas páginas. Um exemplo particularmente impressionante surge no domínio da energia limpa, com os esforços para alcançar a fusão por confinamento inercial no Lawrence Livermore National Laboratory, nos Estados Unidos, onde o sistema laser mais potente alguma vez construído é utilizado para comprimir e aquecer uma minúscula cápsula de combustível de deutério-trítio até temperaturas superiores a cem milhões de graus Celsius, na tentativa de reproduzir na Terra os processos energéticos das estrelas. Outros exemplos, de enorme impacto económico, incluem a fabricação industrial com lasers ultrarrápidos, que permite processar materiais com precisão micrométrica, bem como técnicas de diagnóstico e tratamento médico usando lasers, hoje amplamente utilizadas em imagiologia, cirurgia e terapias minimamente invasivas. Menos visível, mas cada vez mais relevante no contexto atual, é também o papel da ótica em aplicações de defesa e segurança, desde lasers de alta potência e sistemas de visão no infravermelho até sensores óticos, LIDARs e, como já referido, instrumentos de navegação baseados em

¹ Este tipo de magnetómetros medem a frequência de precessão de Larmor do spin de gases atômicos polarizados na presença de campos magnéticos extremamente fracos. Neste regime, a precessão é muito lenta e a relaxação da polarização atômica por troca de spin em colisões é suprimida. Paradoxalmente, isto é conseguido aumentando a taxa de colisões entre os átomos, de modo a que estas ocorram muito mais rapidamente do que a frequência de precessão do spin. A rápida troca de spin entre os diferentes estados possíveis permite que os átomos preservem, em média, o estado de polarização, que evolui de forma coerente no tempo. Experimentalmente, este regime é alcançado operando com elevada densidade atômica, temperaturas elevadas e um campo magnético suficientemente baixo.

² Em comparação com a eletroencefalografia, a magnetoencefalografia permite um acesso mais direto à atividade neuronal, uma vez que os campos magnéticos gerados pelas correntes sinápticas são praticamente insensíveis às propriedades condutivas dos tecidos cranianos. A deteção de sinais neuromagnéticos fracos possibilita uma elevada precisão na cartografia da atividade cerebral, ultrapassando limitações fundamentais das medições elétricas convencionais.

magnetómetros e giroscópios óticos.

Os avanços tecnológicos não surgem de forma espontânea nem emergem do vazio. São, quase sempre, o resultado indireto de décadas de investigação fundamental. Os exemplos anteriormente referidos ilustram de forma clara como a área de Átomos, Moléculas e Óptica se consolidou como uma componente estrutural da tecnologia moderna, com profundas implicações económicas, industriais e estratégicas. Nas secções seguintes, após uma muito breve resenha histórica das principais contribuições científicas da AMOP, focar-nos-emos em temas relacionados com a área de átomos frios.

Da óptica clássica à revolução quântica

Muito antes de se tornar uma ferramenta tecnológica, a luz e os átomos estiveram no centro do grande desafio intelectual de compreender o mundo em que vivemos. A tentativa de entender a natureza da luz atravessa séculos de história, desde as ideias corpusculares de Isaac Newton até à teoria ondulatória desenvolvida por Huygens, Young e Fresnel, que explicou fenómenos como a interferência e a difração. Esta longa sequência de experiências e modelos culminou, no século XIX, com a teoria eletromagnética da luz de James Clerk Maxwell. Foi no contexto do eletromagnetismo de Maxwell que Albert Einstein, em 1905, formulou a relatividade restrita, redefinindo os conceitos de espaço e tempo. O sucesso desta teoria foi sustentado por evidências experimentais obtidas em interferómetros óticos, nomeadamente nas célebres experiências de Fizeau e Michelson.

No final do século XIX, surgiram novas fissuras no edifício aparentemente sólido da mecânica clássica. Fenómenos óticos como a radiação de corpo negro e a espectroscopia atômica resistiam às explicações clássicas. Do esforço para resolver esses paradoxos nasceu a mecânica quântica, uma teoria profundamente contraintuitiva, mas extraordinariamente bem-sucedida. Um dos seus aspetos mais surpreendentes é a não-localidade quântica. A sua confirmação experimental, ela também emergente da investigação em física atômica e ótica, marcou o início da revolução quântica em curso. O famoso paradoxo EPR, proposto [5] por Einstein, Podolsky e Rosen em 1935, questionava se a teoria quântica poderia ser considerada completa, uma vez que parecia permitir correlações entre partículas distantes que desafiavam o princípio da causalidade relativista. Décadas mais tarde, experiências com fontes óticas de fótons entrelaçados confirmaram essas correlações de forma inequívoca.

O que começou como um debate filosófico entre Niels Bohr e Einstein, em 1927, tornou-se, a partir da proposta teórica de John Bell em 1964 [6], um facto experimental nos laboratórios de Alain Aspect [7], John Clauser e Anton Zeilinger — trabalho que lhes valeu o Prémio Nobel da Física de 2022 — abrindo caminho ao que hoje se designa por segunda revolução quântica, a porta de entrada das tecnologias quânticas.

Nos dias de hoje, a ótica continua a ser uma das principais ferramentas para explorar o Universo e testar os limites das teorias físicas. Um exemplo notável é a deteção direta de on-

das gravitacionais: ondulações no próprio tecido do espaço-tempo, previstas por Einstein em 1916 e observadas experimentalmente apenas um século depois [8]. Essas detecções foram realizadas com interferómetros laser capazes de medir variações de distância cerca de dez mil vezes menores do que o diâmetro de um próton — uma precisão equivalente a detectar a variação da largura de um cabelo humano na distância até à estrela mais próxima. Alcançar este nível de sensibilidade só foi possível graças a técnicas de óptica quântica, como a compressão quântica (*quantum squeezing*) [9], que permitem ultrapassar limites fundamentais impostos pelo ruído quântico. Aqui, ideias desenvolvidas originalmente em ótica quântica tornaram-se essenciais para “ver” fenómenos cósmicos ocorridos a milhares de milhões de anos-luz da Terra.

As tecnologias quânticas fazem uso de propriedades exclusivamente quânticas da matéria e da luz, como a interferência e o entrelaçamento, para realizar tarefas impossíveis ou extremamente ineficientes usando tecnologias clássicas. Em geral, em três grandes áreas: sensores e metrologia de precisão, comunicação segura e computação quântica. Um elemento comum a estas aplicações é a necessidade de um extremo controlo dos estados quânticos dos sistemas usados. Um exemplo simples que ilustra bem esta aspecto é o aprisionamento de átomos únicos a partir de nuvens atómicas diluídas. Aqui, os protocolos quânticos dependem da capacidade de controlar os átomos individualmente, a sua localização no espaço, assim como o seu estado quântico interno, que é feito hoje em dia com uma precisão extraordinária. Para o fazer, os experimentalistas pensaram em algo profundamente contraintuitivo: arrefecer e imobilizar átomos usando luz.

Átomos frios

À primeira vista, iluminar um objeto parece ter sempre como resultado aquecê-lo. No entanto, ao nível atómico, e usando técnicas adequadas, é possível usar luz para arrefecer os átomos. A luz transporta momento (ou quantidade de movimento), e esse momento pode ser usado de forma engenhosa para travar o movimento dos átomos. Foi esta ideia que esteve na base do desenvolvimento das técnicas de arrefecimento e aprisionamento de átomos com lasers levadas a cabo por Steven Chu [10], William Phillips e Claude Cohen-Tannoudji [11], que viriam a ser distinguidas com o Prémio Nobel da Física em 1997. Ao ajustar cuidadosamente a frequência da luz laser à volta de uma transição atómica específica, é possível fazer com que átomos em movimento absorvam preferencialmente fótons que se opõem à sua direcção de deslocamento. Cada absorção e emissão subsequente de um fóton retira uma pequena quantidade de momento ao átomo, reduzindo gradualmente a sua velocidade. Utilizando configurações apropriadas de feixes laser e campos magnéticos, foi possível não só arrefecer átomos, como também confiná-los no espaço, em dispositivos experimentais chamados armadilhas magneto-ópticas [12]. Estas técnicas permitem arrefecer nuvens atómicas a valores tão baixos de temperatura como 1 μ K, reduzindo a velocidade dos átomos para apenas cm/s, um regime onde o comportamento dos átomos passa a ser dominado pelas leis da mecânica quântica. Quase parados, os átomos tornam-se sistemas ideais para experiências de precisão extrema e para

a construção de dispositivos quânticos.

Quando se continua a arrefecer os átomos, abaixo dos 100 nK, ocorre um fenómeno notável: todos os átomos presentes na nuvem rapidamente “empilham” num único estado quântico, o de menor energia. Este fenómeno acontece apenas para partículas (elementares ou compostas) que obedecem a uma determinada estatística quântica (têm spin total inteiro) chamada de estatística de Bose-Einstein e são, por isso, chamados bósons. Ao contrário dos bósons, que “gostam” de se “empilhar” num mesmo estado quântico, a outra classe de partículas, os férmions, obedecem ao princípio da exclusão de Pauli não partilhando estados quânticos. Com spin total semi-inteiro estas partículas estão sujeitas à estatística de Fermi-Dirac, de onde o seu nome deriva. O mesmo elemento atómico pode ser um bóson ou um férmion, bastando para isso terem por exemplo um número diferente de neutrões (um isótopo com diferente número de massa), modificando o spin nuclear. A temperaturas muito próximas do zero absoluto, tanto bósons como os férmions tornam-se gases degenerados, com os férmions a ocupar todos os estados disponíveis de menor energia, enquanto que bósons ocupam apenas um único estado. Este estado degenerado de bósons é conhecido como condensado de Bose-Einstein (BEC), e foi observado com átomos pela primeira vez em 1995 [13,14] em nuvens de rubídio e sódio, um feito experimental notável distinguido com o prémio Nobel da Física em 2001 (ver Caixa 2). Num BEC deixa de fazer sentido pensar em átomos individuais. O sistema comporta-se como uma única entidade quântica macroscópica, descrita por uma só função de onda [15]. A realização de BECs em gases atómicos não só abriu um novo campo de investigação como se tornou uma plataforma central para simulações quânticas [16], e o estudo de gases atómicos e moleculares degenerados.

A realização de BECs teve ainda uma consequência conceitual profunda: pela primeira vez, tornou-se possível dispor de fontes coerentes de matéria, em muitos aspetos análogas a um laser, mas constituídas por átomos em vez de fótons. Este novo regime abriu caminho à chamada ótica atómica, na qual experiências clássicas da ótica, como interferência e difração, passaram a ser reproduzidas com ondas de matéria coerentes. Mais do que uma simples analogia pedagógica, estes sistemas permitiram estender ao domínio dos átomos técnicas originalmente desenvolvidas em ótica quântica, incluindo o estudo de correlações de intensidade entre partículas indistinguíveis e a investigação do papel da coerência quântica em sistemas de muitos corpos. Em particular, versões com átomos de experiências emblemáticas, como o interferómetro de Hanbury Brown-Twiss ou a experiência de Hong-Ou-Mandel, evidenciaram como fenómenos de interferência puramente quânticos não são exclusivos da luz, mas emergem sempre que partículas indistinguíveis obedecem às leis da mecânica quântica. Estes progressos estenderam-se também a testes cada vez mais sofisticados das desigualdades de Bell com átomos (o anteriormente referido paradoxo EPR), reforçando a ligação conceitual entre a física dos átomos ultrafrios e os fundamentos da teoria quântica. Mais, o facto de se poder escolher entre bósons ou férmions, ou até combinar diferentes espécies neste tipo de experiências, multiplica dramaticamente as possibili-

dades experimentais sendo possível explorar os dois tipos de estatística quântica.

Um exemplo interessante de aplicação prática da ótica atômica é o seu uso em interferometria com átomos frios na detecção de ondas gravitacionais. Assim como os grandes interferómetros laser como o LIGO e o Virgo usam a interferência da luz para medir as minúsculas ondulações do espaço-tempo produzidas por eventos cósmicos, há esforços na comunidade científica para desenvolver um novo tipo de detetor de ondas gravitacionais baseado na interferometria de átomos frios. Em vez de medir pequenas variações na distância percorrida por feixes de luz, estes detetores exploram a natureza ondulatória dos átomos para medir diretamente mudanças que uma onda

gravitacional induz na fase de uma onda de matéria, que se traduz numa medida do sinal gravitacional. O que torna esta abordagem especialmente atraente é a sua sensibilidade potencial em bandas de frequência intermédias (tipicamente na faixa de 0,1 a 10 Hz) que são difíceis de cobrir com os interferómetros clássicos terrestres a laser, devido a ruídos sísmicos e a outras limitações técnicas. Detetores baseados em átomos frios poderiam, em princípio, preencher esta “lacuna” na sensibilidade e complementar observatórios como os LIGO e Virgo, e os futuros detetores espaciais como LISA, abrindo uma nova janela para fenómenos astrofísicos com massas intermédias ou eventos mais longos.

Caixa 2

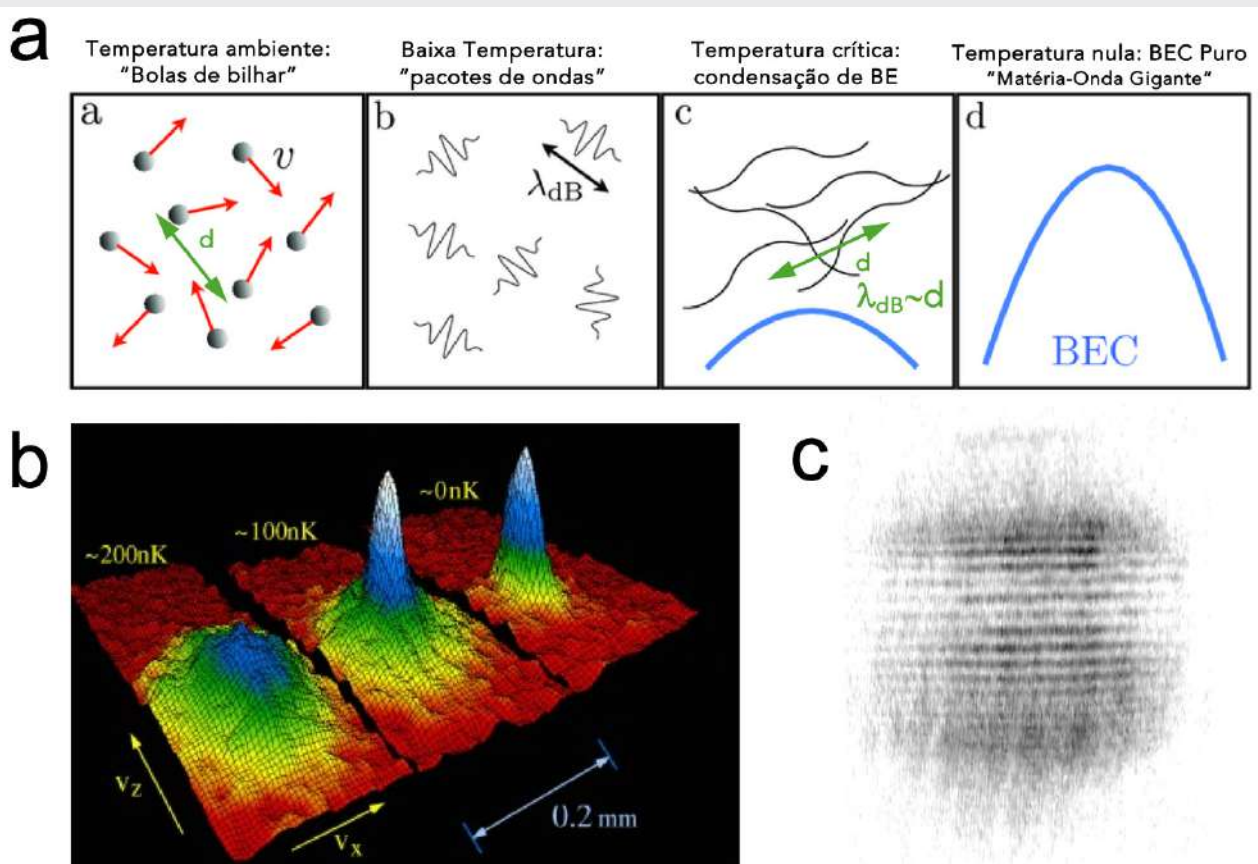


Figura 2: Figuras a) e c) adaptadas de Ketterle (1999); figura b) adaptada do registo publicado da palestra Nobel de Carl E. Wieman, proferida a 8 de dezembro de 2001.

a) Condensação de Bose–Einstein. À temperatura ambiente, um gás fracamente interativo pode ser descrito, de forma clássica, como um conjunto de “bolas de bilhar”. Do ponto de vista quântico, porém, à medida que a temperatura (e a velocidade) diminui, os átomos passam a comportar-se como pacotes de onda com uma extensão dada pelo comprimento de onda de de Broglie, λ_{dB} . Na temperatura crítica de transição, λ_{dB} torna-se comparável à distância média entre átomos, d , levando à formação do condensado. Quando a temperatura se aproxima do zero absoluto, a componente térmica desaparece e permanece um condensado praticamente puro.

b) Distribuições de densidade de nuvens de átomos de rubídio após expansão, a três temperaturas distintas. À esquerda observa-se uma nuvem térmica (não degenerada). No centro, já é visível o “nascimento” do condensado, coexistindo com uma componente térmica a cerca de 100 nK. À direita surge um BEC quase puro, com a grande maioria dos átomos no estado condensado.

c) Padrão de interferência obtido quando dois BECs de sódio, inicialmente confinados num poço de potencial duplo, são libertados e se sobrepõem no espaço. As franjas observadas evidenciam a coerência quântica macroscópica característica deste estado da matéria.

Computadores quânticos com átomos neutros

A ideia de um computador quântico universal, uma máquina capaz de explorar de forma sistemática os princípios da mecânica quântica para realizar certos cálculos de forma exponencialmente mais eficiente do que qualquer computador clássico, foi formulada por David Deutsch em 1985 [17]. Poucos anos depois, surgiram as primeiras propostas concretas para a sua implementação experimental, muitas delas oriundas diretamente da comunidade de física atômica.

Em 1995, Ignacio Cirac e Peter Zoller propuseram uma arquitetura para computação quântica baseada em iões aprisionados [18], na qual estados internos de átomos ionizados desempenhariam o papel de bits quânticos, ou qubits. Esta proposta marcou o início de um esforço experimental intenso que, ao longo das décadas seguintes, demonstrou níveis extraordinários de controlo quântico e fidelidade de operações lógicas, em grande parte graças a técnicas de espectroscopia de precisão e de arrefecimento e confinamento desenvolvidas no âmbito da Física Atômica e Ótica. O trabalho pioneiro de David Wineland e colaboradores estabeleceu os iões aprisionados como uma das plataformas mais robustas para computação quântica.

Se fosse possível conceber um qubit ideal, seria difícil encontrar algo mais adequado do que um átomo. Todos os átomos de um mesmo elemento são rigorosamente idênticos, e possuem níveis quânticos extremamente bem caracterizados e estáveis. Usando técnicas desenvolvidas originalmente por Arthur Ashkin para fazer pinças ópticas [19], que lhe valeu o Nobel da Física em 2012, tornou-se possível aprisionar átomos individuais em feixes laser fortemente focalizados. Estes feixes funcionam como pequenas armadilhas de luz, que podem ser organizadas em redes regulares a duas ou três dimensões, contendo centenas ou mesmo milhares de átomos, cada um ocupando uma posição bem definida no espaço.

Em arquiteturas deste tipo, cada átomo desempenha o papel de um qubit, com a informação quântica codificada em dois estados internos de longa duração. Como os átomos estão eletricamente neutros e confinados em potenciais óticos extremamente estáveis, interagem muito pouco com o ambiente, o que lhes confere tempos de coerência relativamente longos. Embora estes tempos sejam, em geral, inferiores aos alcançados em plataformas baseadas em iões, superam largamente os observados em arquiteturas supercondutoras, ao mesmo tempo que oferecem uma escalabilidade significativamente superior.

Para realizar operações lógicas quânticas, é necessário induzir interações controladas entre qubits vizinhos. Nos sistemas de átomos neutros, isto é conseguido excitando temporariamente os átomos para estados altamente excitados, conhecidos como estados de Rydberg. Nestes estados, um dos eletrões do átomo encontra-se muito afastado do núcleo, ocupando orbitais com números quânticos principais elevados (tipicamente $n=50\sim 100$). O resultado é um átomo excecionalmente grande à escala atômica com dimensões típicas de $5\sim 10\mu\text{m}$,

comparáveis à separação entre átomos vizinhos na rede ótica. Esta distensão espacial dá origem a interações fortes e de longo alcance entre átomos excitados, tipicamente de natureza dipolo-dipolo. Um fenómeno particularmente importante é o chamado bloqueio de Rydberg: a excitação de um átomo para um estado de Rydberg pode impedir a excitação simultânea de átomos vizinhos, criando correlações quânticas controladas entre qubits. Este mecanismo constitui a base para a implementação de portas lógicas quânticas de dois qubits e para a criação de estados entrelaçados, ingredientes essenciais da computação quântica. Para além dos tempos de coerência relativamente longos, as arquiteturas baseadas em átomos neutros apresentam várias vantagens notáveis. A escalabilidade é uma das mais importantes: redes óticas podem, em princípio, ser estendidas para milhares ou dezenas de milhares de qubits, mantendo uma uniformidade praticamente perfeita entre eles. O controlo é realizado exclusivamente por luz, permitindo operações rápidas e reconfiguráveis, bem como a possibilidade de endereçar qubits individuais com elevada precisão espacial. Não é assim surpreendente que os computadores quânticos baseados em átomos neutros estejam hoje no centro de um esforço intenso, tanto académico como industrial. Laboratórios e empresas em várias partes do mundo trabalham ativamente no desenvolvimento desta plataforma, explorando-a não apenas para computação quântica universal, mas também para simulações quânticas de sistemas complexos, onde a dinâmica coletiva de muitos qubits pode ser estudada de forma controlada.

Noutra direção da ótica, na área da fotónica, há hoje em dia também um grande destaque da computação quântica usando plataformas fotónicas, onde a informação quântica é transportada por fótons individuais. Estas abordagens beneficiam de operação à temperatura ambiente e de uma compatibilidade natural com redes óticas, sendo exploradas por empresas como a Xanadu ou a PsiQuantum, apoiadas por investimentos industriais e governamentais significativos. No entanto, a implementação de interações fortes e controladas entre fótons continua a ser um dos grandes desafios desta abordagem. É possível, ou mesmo provável, que este tipo de plataformas possam vir no futuro a ser interligadas com as que usam átomos neutros ou iões, tirando partido da intercomplementaridade, ambas usando luz para guardar ou controlar informação e, em particular, por usarem essencialmente o mesmo tipo de ferramentas e partilharem uma herança comum de técnicas e conceitos desenvolvidos no âmbito da AMOP.

Relógios Atômicos Óticos

A mesma capacidade de controlar átomos com precisão extrema encontra uma expressão particularmente impressionante nos relógios atômicos óticos. Se os computadores quânticos prometem transformar a forma como processamos informação, estes relógios representam o limite último da nossa capacidade de medir o tempo. Os relógios atômicos tradicionais, como os de rubídio que equipam o sistema GPS, exploram transições na gama das micro-ondas, com frequências de alguns gigahertz. Os relógios óticos [20] baseiam-se em transições eletrónicas com frequência entre os 10^{14} e 10^{15} Hz. Constar estes “tiques” muito mais rápidos equivale a utilizar uma

³Metade do prémio desse ano foi para outro herói da ótica, Roy Glauber, por contribuições teóricas fundamentais para a ótica quântica e teoria da coerência.

“régua de tempo” quase um milhão de vezes mais fina, conduzindo a um salto dramático na precisão. Os melhores relógios óticos atuais [21] atingem incertezas fracionárias ao nível de 10^{-18} , aproximando-se mesmo de 10^{-19} . Um relógio com este desempenho atrasar-se-ia apenas uma fração de segundo ao longo de um intervalo de tempo superior à idade do Universo.

Grande parte deste progresso foi impulsionado por trabalhos desenvolvidos em laboratórios de metrologia atómica, num ambiente onde convergiram avanços em lasers ultrastáveis, átomos frios e em metrologia de precisão. Um passo absolutamente decisivo foi o desenvolvimento dos pentes de frequências óticas [22,23], distinguido com parte³ do Prémio Nobel da Física de 2005, atribuído a Theodor W. Hänsch e a John L. Hall. Os pentes de frequência funcionam como régua no domínio da frequência, permitindo ligar transições óticas extremamente rápidas a padrões de tempo eletrónicos. Sem esta ferramenta, a estabilidade extraordinária dos relógios óticos não poderia ser medida nem comparada, e estes dispositivos não poderiam desempenhar o seu papel como padrões de tempo. Em paralelo, avanços na física de átomos ultrafrios criaram as condições ideais para a metrologia de precisão. O trabalho pioneiro de Deborah Jin, ao arrefecer gases de átomos fermiónicos até ao regime quântico degenerado, estabeleceu técnicas e conceitos cruciais para desenvolvimentos posteriores. Muitos dos relógios óticos mais precisos utilizam hoje isótopos fermiónicos, como o estrôncio-87 ou o itérbio-171, nos quais o princípio da exclusão de Pauli suprime colisões entre átomos, reduzindo desvios sistemáticos e permitindo uma exatidão excepcional mesmo a altas densidades atómicas. Com base nestes fundamentos, grupos liderados por investigadores como Jun Ye [24] construíram relógios baseados em gases degenerados de fermiões aprisionados em redes óticas que representam atualmente o estado da arte na medição do tempo.

Com este nível de precisão, incertezas fracionárias de 10^{-19} , algo notável ocorre: diferenças de altura de apenas alguns centímetros à superfície da Terra já alteram a passagem do tempo de forma mensurável, em pleno acordo com a teoria da relatividade geral [25]. Os relógios óticos tornam-se, assim, sensores diretos da curvatura do espaço-tempo. Conseguir medir o tempo com este nível de precisão deixa de ser apenas um desafio tecnológico, e torna-se uma forma direta de investigar as leis fundamentais da natureza. Propostas ainda mais arrojadas como os relógios nucleares, baseados numa transição de baixa energia no núcleo do tório-229, prometem empurrar ainda mais os limites da estabilidade e da exatidão [26]. Se concretizadas, estas ideias poderão abrir novas vias para testar física fundamental e aprofundar a nossa compreensão da relação entre o mundo quântico e a gravidade.

Conclusão

Dos computadores quânticos construídos átomo a átomo aos relógios que sentem a curvatura do espaço-tempo, as tecnologias oriundas da AMOP mostram que a revolução quântica não resulta de fenómenos isolados, mas de um domínio profundo, sistemático e engenhoso das interações entre luz e matéria. Esta área do saber fornece as ferramentas para transformar perguntas fundamentais em tecnologias capazes de redefinir o

futuro. Em última análise, o que une todas estas inovações é a mesma tradição que começou com a espectroscopia atómica e a ótica clássica: a capacidade de entender e controlar a luz e a matéria ao nível mais fundamental.

Tal como a invenção do laser e das fibras óticas transformou a comunicação e a sociedade, hoje a Física Atómica e a Ótica continuam a moldar tecnologias disruptivas, definindo o que será possível nas próximas décadas na ciência, na indústria e no nosso quotidiano. No contexto nacional, uma aposta estratégica na formação de recursos humanos e no investimento continuado nas áreas AMOP seria determinante para que Portugal não permanecesse apenas como utilizador, mas como contribuinte ativo das tecnologias quânticas do futuro.



José Viana-Gomes é licenciado em Física Aplicada, ramo de Ótica e Lasers, pela Universidade do Minho, onde é atualmente Professor Auxiliar no Departamento de Física. Doutorou-se em Física Atómica na Université Paris-Sud em 2007, com trabalho na área da termometria e das propriedades de coerência de gases quânticos ultrafrios de hélio metastável. Ao longo do seu percurso académico, desenvolveu também atividade docente e de investigação internacional, tendo sido Professor Associado Convidado e posteriormente Professor Auxiliar no Departamento de Física da National University of Singapore entre 2012 e 2020. Os meus interesses

científicos centram-se principalmente na metrologia ótica e atómica, abrangendo ainda áreas como a ótica não linear, a espectroscopia de materiais bidimensionais, a física de excitações e a plasmónica.

Referências

- [1] Deep learning with coherent nanophotonic circuits. Shen, Y., Harris, N., Skirlo, S. et al. . 2017, Nature Photon 11, pp. 441–446.
- [2] Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms. Peters, A., Chung, K. Y. & Chu, S. 1999, Nature, Vol. 400, p. 849.
- [3] A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer. I. K. Kominis, T. W. Kornack, J. C. Allred, and M. V. Romalis. 2003, Nature, Vol. 422, pp. 596–599.
- [4] Optical magnetometry. Budker, D., Romalis, M. 2007, Nature Phys. Vol. 3, p. 227.
- [5] Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Einstein, A. and Podolsky, B. and Rosen, N. 10, 1935, Phys. Rev., Vol. 47, p. 777.
- [6] On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. Bell, J. S. 1964, Physics Physique Fizika, Vol. 1, p. 195.
- [7] Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. Aspect, Alain and Dalibard, Jean and Roger, Gérard. 25, 1982, Phys. Rev. Lett., Vol. 49, p. 1804.
- [8] Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo. 2016, Phys. Rev. Lett., Vol. 116, p. 061102.
- [9] Quantum-mechanical noise in an interferometer. Caves, Carlton M. 8, 1981, Phys. Rev. D, Vol. 23, p. 1693.
- [10] Three-Dimensional Viscous Confinement and Cooling of Atoms by Resonance Radiation Pressure. S. Chu, L. Hollberg, J. E. Bjorkholm, A. Cable, and A. Ashkin. 1985, Phys. Rev. Lett., Vol. 55, p. 48.
- [11] New Mechanisms for Laser Cooling. Phillips, Claude N. CohenTannoudji and William D. 10, 1990, Phys. Today, Vol. 43, p. 33.
- [12] Trapping of Neutral Sodium Atoms with Radiation Pressure. Raab, E. L. and Prentiss, M. and Cable, Alex and Chu, Steven and Pritchard, D. E. 23, 1987, Phys. Rev. Lett., Vol. 59, p. 2631.
- [13] Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor. Anderson, M. H. et al. 1995, Science, Vol. 269, p. 198.
- [14] Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms. Davis, K. B. and Mewes, M. -O. and Andrews, M. R. and van Druten, N. J. and Durfee, D. S. and Kurn, D. M. and Ketterle, W. 22, 1995, Phys. Rev. Lett., Vol. 75, p. 3969.
- [15] Making, probing and understanding Bose-Einstein condensates. Ketterle, W. and Durfee, D. S. and Stamper-Kurn, D. M. 1999, arXiv preprint cond-mat/9904034, pp. <https://arxiv.org/abs/cond-mat/9904034>.
- [16] Many-body physics with ultracold gases. Bloch, Immanuel and Dalibard, Jean and Zwerger, Wilhelm. 3, 2008, Rev. Mod. Phys., Vol. 80, p. 885.
- [17] Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Deutsch, . 1818, 1985, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 400, p. 97.
- [18] Quantum Computations with Cold Trapped Ions. Cirac, J. I. and Zoller, P. 20, 1995, Phys. Rev. Lett., Vol. 74, p. 4091.
- [19] Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and Steven Chu. 1986, Opt. Lett., Vol. 11, p. 288.
- [20] Optical atomic clocks. Ludlow, Andrew D. and Boyd, Martin M. and Ye, Jun and Peik, E. and Schmidt, P. O. 2, 2015, Rev. Mod. Phys., Vol. 87, p. 637.
- [21] Clock Precision beyond the Standard Quantum Limit at 10^{-18} [Level]. Yang, Y. A. et al. 19, 2025, Phys. Rev. Lett., Vol. 135, p. 193202.
- [22] Nobel Lecture: Passion for precision. Hänsch, T. W. 4, 2006, Reviews of Modern Physics, Vol. 78, p. 1297.
- [23] Colloquium: Femtosecond optical frequency combs. Cundiff, Steven T. and Ye, Jun. 1, 2003, Rev. Mod. Phys., Vol. 75, p. 325.
- [24] A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock. Campbell, S. L. et al. 2017, Science, Vol. 358, p. 90.
- [25] Optical Clocks and Relativity. Chou, C. W. et al. 2010, Science, Vol. 329, p. 1630.
- [26] Direct detection of the Th-229 nuclear clock transition. von der Wense, L., Seiferle, B., Laatioui, M. et al. 2016, Nature, Vol. 533, p. 47.