

Luz e coerência: entre a tecnologia laser e a Ciência Quântica

Ariel Guerreiro

Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Center for Applied Photonics, INESC-TEC

ariel@fc.up.pt

Resumo

A luz, enquanto fenómeno natural e objeto de estudo científico, acompanhou todas as grandes transformações da física. Este artigo apresenta um resumo do percurso histórico e conceptual que conduz da teoria ondulatória clássica à quantização da radiação e à invenção do laser, explicando os princípios que unem a emissão estimulada, a coerência ótica e as manifestações quânticas da luz.

Introdução

A luz sempre foi uma das melhores professoras da ciência. Ilumina o mundo e, ao fazê-lo, revela os limites do nosso entendimento. Em cada época, um conjunto de experiências obrigou-nos a rever conceitos e a reformular o que pensávamos saber. A história da luz é reveladora de como a ciência progride: observam-se fenómenos inesperados, formulam-se perguntas, constroem-se explicações provisórias, testam-se as explicações, e cada resposta abre o caminho para novas perguntas.

A corrida entre a partícula e a luz

No século XVII, dois gigantes da ciência, Isaac Newton e Christiaan Huygens, ofereceram interpretações opostas sobre a natureza da luz. Newton via a luz como um feixe de corpúsculos capazes de se mover em linha reta e de sofrer choques elásticos. Esta visão explicava bem os processos de reflexão e a refração e parecia coerente com a mecânica que o próprio Newton criara. Huygens, pelo contrário, defendia que a luz era uma onda que se propagava através de um meio hipotético, quíçá um éter.

Durante mais de um século, o prestígio de Newton manteve viva a ideia corpuscular. Mas, no início do século XIX, as experiências de Thomas Young [1] e Augustin Fresnel [2] com interferência e difração demonstraram que a luz se comporta inequivocamente como uma onda.

A visão ondulatória ganhou uma fundamentação profunda com James Clerk Maxwell [3]. Em 1864, Maxwell apresentou as equações que unificavam eletricidade e magnetismo, prevenindo a existência de ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz. Em 1887, Heinrich Hertz produziu e detetou essas ondas em laboratório, confirmando a teoria [4]. Tudo in-

dicava que a luz era, de facto, uma onda eletromagnética.

O êxito da teoria de Maxwell parecia definitivo. No final do século XIX, a luz era considerada uma perturbação oscilante dos campos elétrico e magnético, propagando-se no espaço. No entanto, problemas inesperados surgiram que a visão ondulatória da luz não resolvia. A radiação emitida por um corpo aquecido não seguia a distribuição prevista pela física clássica (um desvio conhecido como a “catástrofe do ultravioleta”), e o efeito fotoelétrico mostrava que luz de baixa intensidade, mas de frequência adequada, podia libertar eletrões de um metal, enquanto luz intensa, mas com frequência errada, não o conseguia. Faltava algo essencial na descrição da energia transportada pela luz.

A quantização de Planck e Einstein

Em 1900, Max Planck propôs uma solução ousada: a energia não é emitida de forma contínua, mas em múltiplos de uma quantidade elementar [5]. Cinco anos depois, Albert Einstein aplicou esta ideia ao efeito fotoelétrico, sugerindo que a própria luz é composta por partículas, os fótons [6]. Se a energia do fóton for superior ao trabalho necessário para libertar um eletrão, o eletrão é ejetado. A experiência confirmava a hipótese, que lhe valeu o Prémio Nobel da Física em 1921. Nesta altura, a ciência estava pronta para entender a luz como tendo uma natureza dupla: a luz é um campo que, conforme a situação e a forma de medir, revela um lado ondulatório ou um lado corpuscular. Esta dualidade onda-partícula é uma das pedras angulares da Física Quântica.

O B-A-BA de Einstein

Em 1917, Einstein voltou a estudar a interação entre luz e matéria e introduziu os coeficientes A e B [7]. Estes descrevem três processos fundamentais: emissão espontânea, absorção e emissão estimulada. A ideia de emissão estimulada é a mais notável: um átomo excitado, ao encontrar um fóton com a frequência certa, pode emitir outro fóton idêntico em frequência, fase e direção. Esse mecanismo está na base de funcionamento do laser. Durante décadas, a previsão manteve-se teórica. Faltavam meios tecnológicos para produzir uma inversão de população, isto é, um estado em que mais átomos estão excitados do que no nível fundamental. Essa condição só foi atingida na segunda metade do século XX, tornando possível o primeiro maser [8] e, pouco depois, o laser [9,10].

Da ideia ao laser

Durante a primeira metade do século XX, a física atômica e as técnicas experimentais evoluíram rapidamente e em paralelo. A espectroscopia de alta resolução permitiu conhecer melhor os níveis de energia dos átomos e moléculas. Ao mesmo tempo, novos métodos de excitação dos níveis de energia atômicos (descargas elétricas, micro-ondas, lâmpadas de flash) tornaram possível manipular amostras gasosas e cristalinas com grande precisão. Estes progressos criaram as condições para que a emissão estimulada passasse de conceito teórico a fenómeno controlável.

Em 1954, Charles Townes, Nikolai Basov e Alexander Prokhorov demonstraram o maser (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*) [8,9]. No maser, moléculas de amónia, excitadas num feixe molecular, eram colocadas numa cavidade de micro-ondas ajustada para que a emissão estimulada amplificasse a radiação. O resultado foi uma fonte de micro-ondas extremamente pura e estável, e a primeira prova prática do princípio de Einstein.

O maser mostrou que a emissão estimulada podia ser explorada para obter radiação coerente, ou seja, com frequência e fase bem definidas. Este sucesso valeu aos seus inventores o Prémio Nobel de Física de 1964. Porém, a transição das micro-ondas para a luz visível era tudo menos trivial. As frequências óticas são cerca de cem mil vezes mais elevadas, exigindo técnicas de bombeamento energético muito mais potentes e precisas.

Em 1960, Theodore Maiman, nos Laboratórios Hughes, construiu o primeiro laser operacional, usando um cristal de rubi como meio ativo [10]. O dispositivo consistia num bastão de rubi sintético envolvido por uma lâmpada de flash helicoidal. A lâmpada fornecia a energia necessária para excitar os átomos de crómio no rubi. Um espelho totalmente refletor e outro parcialmente refletor formavam a cavidade ótica. Quando a inversão de população era atingida, a emissão estimulada amplificava a luz num comprimento de onda de 694 nm (um vermelho profundo), gerando um feixe intenso e colimado. Nascia assim o laser de rubi. Pouco depois, seguiram-se lasers a gás (hélio-neon), a semicondutores e de estado sólido, cada qual com características próprias e adaptado a diferentes aplicações. Estas primeiras fontes de luz coerente inauguraram uma nova era para a ciência e para a tecnologia.

É verdade que, entre a teoria e a caixa preta do laboratório, se interpõe o mundo ruidoso da realidade. Existem perdas, superfícies imperfeitas, absorções residuais, aquecimento. Afinal, a luz mexe com cargas, com vibrações e com tudo o que faz um material ser material. É por isso que, a história do laser é também a história dos engenheiros que aprenderam a controlar ruído, a polir espelhos, a afastar calor, a casar materiais com caprichos óticos e elétricos. Mas, por baixo destas tecnologias, vive o esqueleto de Einstein. Sempre.

A coerência: do caos luminoso à disciplina quântica

Com o laser, a palavra coerência passou dos livros de teoria para a prática experimental. A luz de uma lâmpada é uma

multidão de emissores independentes; cada átomo emite com fase e direção aleatórias, resultando num brilho incoerente. Num laser, pelo contrário, os fótons gerados pela emissão estimulada têm a mesma frequência e fase: é um feixe ordenado, como um coro em uníssono. Essa coerência permite interferometria de alta precisão, comunicações óticas e espectroscopia extremamente fina. Mas há um segundo nível de coerência, mais subtil: a coerência quântica, que se manifesta quando tratamos a luz não como uma onda contínua, mas como um conjunto de fótons individuais.

Estatística de fótons: a “impressão digital” da luz

Na década de 1950, Hanbury Brown e Twiss realizaram uma experiência decisiva [11]. Dividiram um feixe de luz em dois e contaram coincidências na chegada de fótons aos detetores. Descobriram que, para fontes térmicas (como lâmpadas ou estrelas), há tendência para fótons chegarem em grupo, fenómeno conhecido como *bunching*. Com fontes quânticas que emitem um fóton único (como pontos quânticos, centros de vacância-azoto em diamante ou átomos isolados) observa-se o oposto: *anti-bunching*. Neste caso, a emissão de um fóton reduz temporariamente a probabilidade de surgir outro logo a seguir.

Estas correlações revelam a estatística da luz e permitem distinguir, apenas pela análise temporal dos sinais, se uma fonte é clássica (térmica), semi-clássica (laser) ou verdadeiramente quântica (fótons únicos). O formalismo de Roy Glauber [12] deu a estas observações uma base rigorosa: a coerência não surge apenas para explicar o arranjo ordenado de franjas de luz quando duas ondas interferem, é também um padrão de correlações no tempo quando partículas interferem entre si.

Dois fótons, um destino: o efeito Hong-Ou-Mandel

Outra experiência emblemática é a de Hong, Ou e Mandel, realizada nos anos 1980 [13]. Dois fótons indistinguíveis incidem em lados opostos de um divisor de feixe, com detetores nas duas saídas. O que seria razoável, pensando com a visão da física clássica? Metade das vezes, cada fóton escolhe uma saída diferente; logo, metade das experiências deveriam registar coincidência. No entanto, quando os fótons são completamente idênticos, as coincidências desaparecem. Ambos os fótons saem sempre juntos pelo mesmo lado. Este é um fenómeno puramente quântico resultante da interferência das amplitudes de probabilidade associadas a processos indistinguíveis, uma outra faceta da coerência quântica.

O que “proíbe” os eventos em que cada fóton sai por seu lado? Por que razão basta poder distinguir os fótons para se recuperar as coincidências? Parece que a Natureza tem uma maneira impiedosamente clara de tratar processos indistinguíveis: interferem como ondas. E, como ondas, podem anular-se. O caso “um em cada saída” pode acontecer por dois caminhos indiscerníveis: os dois fótons refletem-se, ou os dois transmitem-se pelo divisor de feixe. Se a física não nos dá forma de distinguir qual ocorreu, estas “ondas de possibilidade” cancelam-se os dois fótons saem pela mesma saída. Mas basta uma réstia de distinguibilidade, um ligeiro atraso entre os fótons, ou uma diferença na sua polarização, para destruir essa indistinguibilidade

e restaurar as coincidências. A descoberta de Hong-Ou-Mandel é, nos laboratórios, não só um fenómeno bonito, mas um diagnóstico de distinguibilidade.

Metrologia, relógios e computadores com luz

O controlo da luz ao nível do fotão abriu uma nova era em metrologia quântica, a ciência da medição extrema. Os relógios óticos atómicos, baseados em transições eletrónicas de átomos de estrôncio ou itérbio, atingem precisões superiores a uma parte em 10^{18} . Essa estabilidade permite medir variações mínimas no campo gravitacional terrestre e testar os limites da relatividade geral. A utilização de luz comprimida (squeezed light) em interferómetros, como o LIGO [14,15], reduziu o ruído quântico e aumentou a sensibilidade na deteção de ondas gravitacionais. Estes exemplos mostram que o domínio quântico da luz não é apenas uma curiosidade teórica: é uma ferramenta de medição e de descoberta.

Paralelamente, desenvolve-se a computação quântica fotónica [16,17]. Os fotões são excelentes portadores de informação quântica: deslocam-se rapidamente, interagem pouco com o ambiente e mantêm a coerência durante longas distâncias. Circuitos integrados de silício com guias de onda, divisores de feixe e detetores permitem manipular e emaranhar fotões em escalas cada vez maiores. Embora os computadores quânticos fotónicos ainda estejam em fase experimental, já foram demonstrados processadores capazes de realizar operações que desafiam o cálculo clássico. É um campo em rápida expansão, que junta física fundamental, engenharia ótica e ciência da informação.

Os novos mistérios da luz: a fenda no tempo

A luz continua ser a ferramenta de novas descobertas. Em 2023, um grupo do Imperial College de Londres realizou uma experiência surpreendente [18]: a fenda no tempo, uma versão temporal da clássica experiência de dupla fenda. Em vez de abrir duas fendas no espaço, os investigadores abriram duas janelas muito curtas no tempo, controlando a forma como um material refletia a luz. Para isso, usaram um material transparente chamado óxido de índio-estanho (ITO), comum em ecrãs de telemóvel, cuja reflectividade pode ser alterada num intervalo de femtossegundos com a ajuda de um pulso laser. Durante um breve instante, o material deixa de ser transparente e passa a comportar-se como um espelho. Se essa comutação ocorre uma única vez, o pulso de luz refletido sofre um ligeiro alargamento de frequências; mas se ocorrer duas vezes, separadas por um pequeno atraso, forma-se um padrão de interferência no espetro, um análogo temporal das franjas observadas num ecrã na dupla fenda espacial.

A explicação é simples, mas profunda. Quando se criam duas janelas temporais, a luz é amostrada em dois instantes diferentes e essas duas “cópias” temporais interferem entre si, gerando franjas no domínio da frequência. Quanto maior for o atraso entre as janelas, mais próximas ficam as franjas. Assim, a fenda no tempo mostra que o que fazemos no tempo tem efeitos visíveis no espetro, tal como o que fazemos no espaço tem efeitos visíveis na intensidade. Longe de violar as leis da física, esta experiência demonstra a simetria entre espaço e tempo

na ótica moderna e abre caminho a novas tecnologias, como lentes temporais, comutadores ultrarrápidos e filtros espectrais dinâmicos, que permitem manipular pulsos de luz com precisão femtossegundo.

Conclusão

Da disputa entre Newton e Huygens às experiências de fotões únicos em chips fotónicos, a história da luz ilustra a transição do espanto para o controlo. O laser, nascido das ideias de Einstein, é o elo entre a Física Quântica e a sociedade tecnológica moderna, uma ponte entre a teoria e as aplicações. Compreender como a luz se transforma em ferramenta é compreender também como a ciência se renova: cada resposta revela novas perguntas, e cada fotão é, afinal, um pequeno mensageiro da estrutura quântica do mundo.

Referências

- [1] T. Young, "Experiments and Calculations relative to Physical Optics" (1803).
- [2] A. Fresnel, "Mémoire sur la diffraction de la lumière", Mémoires de l'Académie des Sciences (1818).
- [3] J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" (1865).
- [4] H. Hertz, "Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen", Annalen der Physik 270, 421-448 (1887).
- [5] M. Planck, "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum" (1900).
- [6] A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" (1905).
- [7] A. Einstein, "Zur Quantentheorie der Strahlung" (1917).
- [8] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes, "The Maser-New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer", Physical Review 99, 1264-1274 (1955).
- [9] A. L. Schawlow, C. H. Townes, "Infrared and Optical Masers", Physical Review 112, 1940-1949 (1958).
- [10] T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby", Nature 187, 493-494 (1960).
- [11] R. Hanbury Brown, R. Q. Twiss, "Correlation between Photons in two Coherent Beams of Light", Nature 177, 27-29 (1956).
- [12] R. J. Glauber, "The Quantum Theory of Optical Coherence", Physical Review 130, 2529-2539 (1963).
- [13] C. K. Hong, Z. Y. Ou, L. Mandel, "Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference", Physical Review Letters 59, 2044-2046 (1987).
- [14] C. M. Caves, "Quantum-mechanical noise in an interferometer", Physical Review D 23, 1693-1708 (1981).
- [15] J. Abadie et al. (LIGO Scientific Collaboration), "A gravitational-wave detector with squeezed light", Nature Physics 7, 962-965 (2011).
- [16] R. Loudon, The Quantum Theory of Light, 3rd ed., Oxford University Press (2000).
- [17] C. C. Gerry, P. L. Knight, Introductory Quantum Optics, Cambridge University Press (2005).
- [18] R. Tirole et al., "Double-slit time diffraction at optical frequencies", Nature Physics 19, 999-1002 (2023).



Ariel Guerreiro é Professor Associado no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e investigador sénior no INESC TEC. Doutorou em Engenharia Física pelo Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. A sua carreira científica inclui colaborações internacionais com instituições de referência como o Rutherford Appleton Laboratory (Reino Unido), Laboratoire d'Optique Appliquée (França) e University of Texas at Austin (EUA). Especialista em ótica quântica e nanoplasmónica, tem-se dedicado ao estudo das interações luz-matéria, com aplicações em sensores óticos, informação quântica e simulações complexas. É autor de dezenas de publicações científicas, distinguindo com prémios nacionais e internacionais, e tem interesse particular em tecnologias quânticas emergentes e aplicações interdisciplinares da física.