



Tente imaginar nosso cotidiano sem o *laser*? Tarefa quase impossível. Leitores de códigos de barras, cirurgias para catarata, produção de microprocessadores, jogos eletrônicos, DVDs, medição de grandes distâncias, análise da atmosfera, corte e solda de metais na indústria... A lista é bem longa.

Merecidamente o *laser* ganhou o título de ‘a luz do século 20’.

O caminho que leva da análise do fenômeno de emissão de radiação por átomos, feita por Einstein, há cerca de 100 anos, até sua aplicação no primeiro *laser*, meio século atrás, é pavimentado por avanços cruciais da física teórica e experimental.

E esse percurso se prolonga até os dias de hoje e nos traz às áreas da óptica quântica – e sua incrível capacidade de aprisionar e manipular uma única partícula de luz – e da informação quântica, que desenvolve códigos invioláveis e computadores inimaginavelmente velozes.

Luiz Davidovich
Instituto de Física,
Universidade Federal
do Rio de Janeiro

No alvorecer do século passado, em 1900, uma fórmula matemática apresentada pelo físico alemão Max Planck (1858-1947), com o propósito de descrever a radiação emitida por corpos aquecidos, iria mudar os rumos da ciência nas décadas seguintes.

A fórmula de Planck traduz a observação de que a luz emitida por um objeto aquecido – como um forno de uma siderúrgica ou uma estrela – muda de cor (frequência) à medida que a temperatura aumenta, indo do infravermelho (menor frequência) para uma cor mais azulada, de frequência maior. Mais precisamente, experimentos realizados no final do século 19 mostravam que a intensidade da radiação emitida por corpos aquecidos tinha um máximo para certa frequência (cor), indo, por exemplo, do vermelho para o violeta à medida que crescia a temperatura.

ÓPTICA QUÂNTICA E A LUZ DO SÉCULO 20

A física clássica previa, no entanto, que a intensidade luminosa emitida por um corpo aquecido aumentaria com a frequência, ou seja, seria maior para o violeta que para o vermelho, independentemente da temperatura (figura 1). Assim, a cor violeta predominaria nos corpos aquecidos, contrariamente à evidência experimental.

Planck mostrou que sua fórmula implicava uma descontinuidade na troca de energia entre um sistema elementar (átomo ou molécula) e a radiação. Essa descoberta contrariava, assim, uma linha de pensamento perseguida desde a Antiguidade e resumida na frase “*Natura non facit saltus*” (A natureza não dá saltos). Cinco anos depois de Planck, ao analisar o efeito fotoelétrico – fenômeno em que elétrons são ejetados quando a luz incide sobre uma superfície metálica –, o físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) concluiu que a explicação desse efeito requer conceber a luz como se fosse constituída de corpúsculos, os ‘*quanta*’ de luz – posteriormente, denominados fótons.

No caso do efeito fotoelétrico, a física clássica previa que a energia dos elétrons deveria aumentar somente com o aumento da intensidade da luz. Mas os experimentos mostravam que uma maior intensidade da luz apenas fazia saltar maior quantidade de elétrons, mas todos com a mesma energia.

FOTO INTERACT IMAGES/PREMIERES.COM



Einstein, com base nos *quanta* de luz, mostrou que cada elétron emitido corresponde à absorção de um fóton cuja energia é proporcional à frequência. Por isso, a energia dos elétrons aumenta com a frequência da luz, enquanto a quantidade ejetada dessas partículas é proporcional à intensidade (número de fótons) da luz incidente (figura 2).

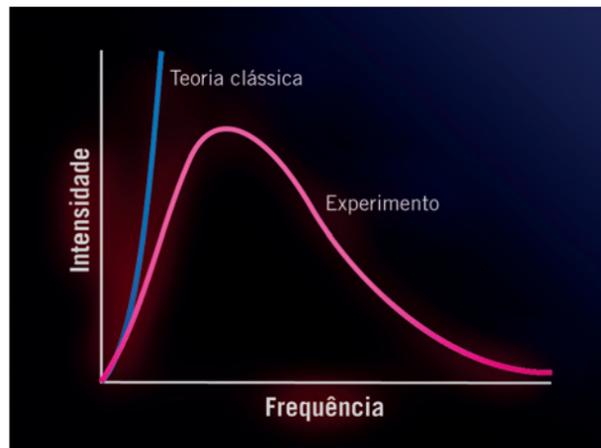
Com essa conclusão, começa uma aventura do conhecimento que iria revolucionar nossa compreensão do universo e também nosso cotidiano: daí surgiram o *laser*, os aparelhos de ressonância magnética usados em hospitais, os relógios atômicos, o transistor e os computadores modernos.

Fusão de teorias A hipótese dos *quanta* de luz foi recebida com relutância pela comunidade científica da época, pois parecia contradizer experimentos que demonstravam o fenômeno de interferência da luz, típico de um comportamento ondulatório. No primeiro Congresso de Solvay (Bélgica), em 1911, que reuniu físicos notáveis, o próprio Einstein manifesta sua dificuldade em aceitar essa conjectura: “Insisto no caráter provisório desse conceito, que não parece ser reconciliável com as consequências experimentalmente verificadas da teoria ondulatória”.

Eis a questão profunda que atormentava os cientistas: como conciliar a ideia de que a luz é constituída de corpúsculos com a noção – comprovada experimentalmente pelo cientista inglês Thomas Young (1773-1829) em 1800 – de que a luz se comporta como uma onda, apresentando a propriedade de interferência? (figura 2).

A proposta indicando Einstein para a Academia de Ciências Prussiana, em 1913 – assinada, entre outros físicos ilustres, por Planck –, considera a hipótese dos *quanta* de luz como um deslize do candidato: “Que ele tenha, algumas vezes, errado o alvo em suas especulações, como, por exemplo, em sua hipótese dos *quanta* de luz, não pode realmente ser usado contra ele, pois não é possível

Figura 1. Diferença de previsão entre a teoria clássica e os experimentos sobre a intensidade de radiação emitida por um corpo aquecido



introduzir ideias realmente novas, mesmo nas ciências mais exatas, sem algumas vezes assumir um risco”.

Em carta de 1908 a seu colaborador austro-húngaro Jakob Laub (1884-1962), Einstein revela estar “ocupado incessantemente com a questão da radiação [...]. Essa questão quântica é tão descomunalmente importante e difícil que ela deveria preocupar todo mundo”. No ano seguinte, publica dois trabalhos importantes, sugerindo uma natureza dual para a luz e opinando que a próxima fase no desenvolvimento da física teórica deveria trazer uma teoria da luz que poderia ser interpretada como uma fusão entre a teoria ondulatória e a teoria corpuscular.

Esse desenvolvimento, profetizado por Einstein, foi de fato realizado pelo físico britânico Paul Dirac (1902-1984), em 1927, em um artigo que coloca em bases matemáticas precisas a teoria do fóton.

Emissão estimulada Em carta de novembro de 1916, Einstein revela a seu amigo ítalo-suíço Michele Besso (1873-1955): “Uma luz esplêndida baixou sobre mim acerca da absorção e emissão de radiação”. Em três trabalhos, publicados naquele ano e no seguinte, demonstra que, quando um átomo interage com a radiação, três processos podem ocorrer, como mostra a figura 3.

Esses trabalhos podem ser considerados como os precursores da óptica quântica, que, no entanto, foi aprofundada e desenvolvida como disciplina muito mais tarde.

Um grande intervalo de tempo separa essa descoberta de Einstein de suas notáveis aplicações práticas: somente na década de 1950, nota-se que a emissão estimulada permitiria construir dispositivos como o *maser* e o *laser*.

O primeiro *maser* (acrônimo, em inglês, para amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação) é construído em 1953, na Universidade de Colúmbia (EUA), pelos norte-americanos Charles Townes, James Gordon (1928-2013) e Herbert Zeiger (1925-2011), segundo os princípios estabelecidos em 1952 pelos soviéticos Nikolay Basov (1922-2001) e Alexander Prokhorov (1916-2002).

Como indica o nome, o *maser* era uma fonte de micro-ondas baseada no processo de emissão estimulada. Restava descobrir como aplicar o mesmo princípio à realização de uma nova fonte de luz.

O laser O primeiro *laser* (acrônimo, em inglês, para amplificação de luz por emissão estimulada de radiação) é demonstrado em dezembro de 1960 pelo físico norte-americano Theodore Maiman (1927-2007), pesquisador do Laboratório Hughes, em Malibu, na Califórnia.

O trabalho de Maiman é precedido por duas propostas teóricas, demonstrando as condições de funcionamento e a viabilidade do *laser*. A primeira, feita pelo físico norte-americano Gordon Gould (1920-2005) – então estudante de doutorado na Universidade de Colúmbia e que registraria a ideia em 1957, ganhando a patente 20 anos mais tarde, depois de longa batalha judicial. A se-

CRÉDITO: CERNIO FELIO AUTOP/WIKIMÉDIA COMMONS (FOTO)



Figura 2. Experimentos mostram a natureza dual do fóton, que ora se comporta como onda, ora como corpúsculo

gunda, publicada em 1958 por Townes e o norte-americano Arthur Schawlow (1921-1999), então pesquisadores nos Laboratórios Bell.

Em um *laser*, um conjunto de átomos é colocado em um tubo cilíndrico, com paredes laterais transparentes, entre dois espelhos, sendo um deles semitransparente, isto é, não apenas reflete luz, mas também pode transmiti-la – sendo, no entanto, a intensidade da luz transmitida muito menor que a da refletida.

Os átomos são excitados, por exemplo, por uma corrente elétrica ou por um pulso de luz emitido por um *flash* (figura 4). Os átomos excitados começam, então, a emitir fótons espontaneamente. Se emitidos ao longo do eixo do cilindro, os fótons espontâneos iniciais estimulam a emissão de outros fótons idênticos na mesma direção, a maior parte dos quais é refletida pelos espelhos, reforçando, assim, o processo de emissão estimulada e produzindo, então, uma avalanche de fótons praticamente idênticos.

Os fótons que não são emitidos ao longo do eixo saem pelas paredes laterais do cilindro e não são refletidos. O feixe de luz que atravessa o espelho semitransparente tem assim propriedades bastante diferentes da luz emi-

tida por uma lâmpada incandescente (chamada ‘luz térmica’): tem direção de propagação e frequência muito bem definidas, já que os fótons são em sua maioria produzidos pelo processo de emissão estimulada.

A energia fornecida pelo *flash* ou pela corrente elétrica é assim concentrada em torno de uma direção e uma frequência, podendo ter alta intensidade. Para obter um feixe com essas características a partir de uma lâmpada incandescente – que emite luz em diversas direções, com uma distribuição ampla de frequências –, é necessário colimar (ou seja, direcionar) uma parte da luz emitida através de orifícios e lentes, e, além disso, usar filtros de cor para selecionar a frequência, o que implica desperdiçar a maior parte da energia fornecida pela lâmpada, produzindo-se um feixe de baixa intensidade.

No *laser* construído por Maiman, átomos de cromo, em um cristal de rubi, são excitados por um *flash* e produzem um pulso de *laser*. Em fevereiro de 1961, é demonstrado, por uma equipe do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (EUA) liderada por Ali Javan, o primeiro *laser* que emite um feixe de luz continuamente. Nesse caso, átomos de hélio, misturados com átomos de neônio, são excitados por uma corrente elétrica.

>>>

Figura 3. Os três processos básicos de interação de fótons com átomos



Diferenças profundas A demonstração do primeiro *laser* motiva uma pergunta interessante: se produzirmos, a partir de uma lâmpada incandescente, usando filtros, orifícios e lentes, um feixe de luz com direção e frequência bem definidos, é possível diferenciar esse feixe daquele emitido por um *laser* contínuo (ainda que de baixa intensidade)?

A resposta a essa pergunta envolve considerações sobre a distribuição estatística dos fótons no feixe de luz e tem um papel fundamental para a óptica quântica moderna.

Na década de 1960, vários trabalhos levaram a uma visão bem mais sofisticada dessas novas fontes de luz e revelam diferenças profundas entre a luz proveniente de uma lâmpada incandescente e a emitida por um *laser*. Entre eles, o desenvolvimento da teoria quântica da luz

pelo norte-americano Roy Glauber e pelo indiano George Sudarshan, em 1963; os trabalhos pioneiros sobre a teoria quântica do *laser*, do alemão Hermann Haken, no ano seguinte; bem como os dos norte-americanos Melvin Lax (1922-2002) e William Louisell; e também de Marlan Scully e William Lamb Jr. (1913-2008), a partir de 1965.

As flutuações de intensidade da luz emitida por um *laser* são bem menores que as da luz térmica, e isso tem uma consequência importante para a distribuição estatística dos fótons. Para um feixe de luz térmica que se propaga no espaço, as regiões que apresentam flutuações de intensidade positiva correspondem a um acúmulo de fótons, enquanto as flutuações negativas correspondem a um número menor de fótons. Isso significa que, quando detectamos fótons de uma luz térmica – por meio de um dispositivo chamado de fotodetector –, as contagens tendem a se agrupar (figura 5).

Por outro lado, a luz *laser*, com intensidade praticamente constante, não apresenta esse efeito de agrupamento. É possível, assim, diferenciar luz emitida por essas fontes distintas, examinando a distribuição de fótons, ainda que a luz térmica tenha cor e direção bem definidas.

A luz do século A partir de 1960, a área de óptica quântica avança em ritmo acelerado, e o *laser* se torna verdadeiramente ‘a luz do século 20’. Novos tipos de *laser* são inventados, com um grande número de aplicações, nas áreas de saúde e comunicações; na medida precisa de distâncias; em fotolitografia para a confecção de circuitos integrados; em leitores de códigos de barra; na análise da atmosfera; em projetos militares; em processos industriais envolvendo corte e solda de metais.

Em 1969, um *laser* pulsado de rubi, refletido por um espelho colocado na Lua, foi usado para medir a distância de um ponto na Terra àquele espelho com uma precisão de 5 cm. Agora, o projeto Apollo, no Novo México (EUA), pretende aumentar a precisão para 1 mm, o que permitirá testar desvios da lei de gravitação do físico britânico Isaac Newton (1642-1727). *Lasers* de alta potência usados em fusão nuclear têm intensidades equivalentes a ter toda a luz solar incidente sobre a Terra focalizada na extremidade de um fio de cabelo.

Lasers que emitem pulsos ultracurtos, na região de raios X, da ordem de 67 bilionésimos de um bilionésimo de segundo (ou 67 attossegundos), demonstrados em 2012 pelo físico chinês Zenghu Chang e colegas, na Universidade da Flórida Central (EUA), funcionam como *flashes* fotográficos ultrarrápidos, permitindo seguir processos dinâmicos de curta duração, como aqueles que envolvem elétrons em átomos.

BASEADO EM HISTÓRIAS DE FÍSICA (2013)

Figura 4. Funcionamento de um *laser*

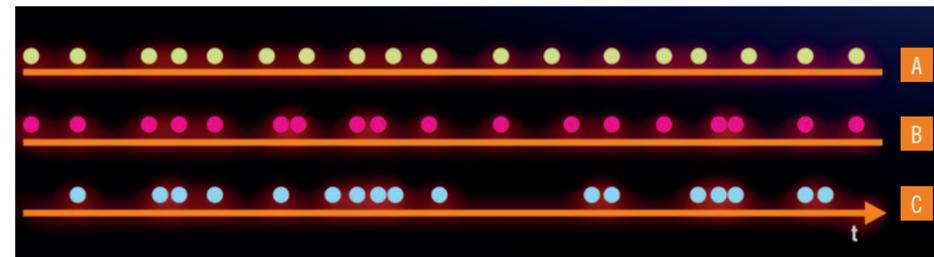
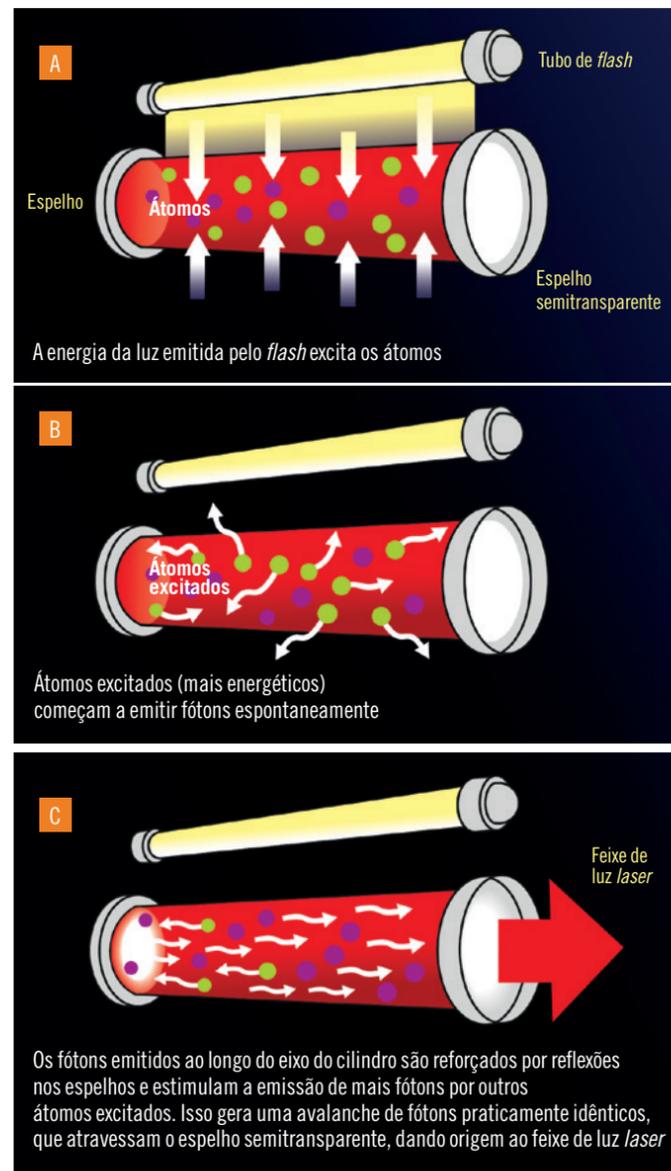


Figura 5. Representação esquemática das contagens de fótons, em função do tempo, para feixes de luz que são (A) antiagrupados, (B) aleatórios (como no *laser*) e (C) agrupados (como na luz incandescente)

Os trabalhos de Glauber e Sudarshan mostram não só que um feixe de luz térmica e mesmo um de luz *laser* podem ser descritos como se fossem campos eletromagnéticos clássicos (com flutuações estatísticas), mas também que outros tipos de luz poderiam existir e que não admitiriam uma descrição clássica.

Entre esses possíveis novos tipos de luz, estaria aquele no qual os fótons estão antiagrupados, isto é, com espaçamento entre eles maior que em um feixe de luz *laser*, com possíveis aplicações em criptografia (envio de mensagens codificadas). Isto significa que a flutuação do número de fótons detectados em certo intervalo de tempo é inferior à da luz de um *laser*. Um caso extremo desse tipo de luz é o da radiação que consiste de um único fóton.

Informação quântica A produção de luz eminentemente quântica torna-se uma atividade importante em muitos laboratórios, seja pelas possíveis aplicações, seja pelo interesse fundamental. A nova tecnologia quântica – reconhecida pelo prêmio Nobel de 2012 para o físico norte-americano David Wineland e o físico francês Serge Haroche – permite controlar a interação de um único átomo com um único fóton.

Essa tecnologia deu um grande impulso ao desenvolvimento de uma nova disciplina, a informação quântica – estreitamente ligada à óptica quântica – e que estuda métodos para caracterizar, transmitir, armazenar, compactar e usar computacionalmente a informação contida em estados quânticos. Além de trazer uma nova visão da física quântica, associada ao conceito de informação, essa área de pesquisa tem a perspectiva de aplicações de grande impacto na criptografia e na computação quântica.

A computação quântica lida com *bits* quânticos (*qbits*), que generalizam o conceito de *bit*, unidade fundamental de informação em computação clássica e que pode ter os valores 0 ou 1. O *qbit*, por sua vez, pode ser expresso por uma superposição de 0 e 1. Um exemplo físico de *qbit* é a polarização de um fóton – essa propriedade está ligada ao fato de que uma onda de luz pode oscilar em um plano bem determinado, como uma corda que vibra em um plano horizontal ou vertical.

O fóton pode ter polarização ao longo de um plano horizontal – o que corresponderia, por exemplo, ao valor 0 do *bit* – ou vertical (valor 1), mas pode também ter polarização ao longo de um plano inclinado, que seria re-

presentada em física quântica como uma superposição dos dois ‘estados de polarização’ (horizontal e vertical).

Além disso, a computação quântica faz uso de um conceito extremamente sutil da física quântica: o emaranhamento, que chamou a atenção do físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) e motivou, em 1935, um artigo polêmico de Einstein e dois colaboradores, o russo Boris Podolski (1896-1966) e o norte-americano Nathan Rosen (1909-1995).

Estados emaranhados da luz têm sido produzidos em vários laboratórios – inclusive no Brasil. Além do interesse fundamental, têm aplicações na transmissão segura de informação e, como já mencionado, na computação quântica.

Um estado emaranhado de dois fótons tem propriedades curiosas. Podemos ter conhecimento completo sobre o conjunto de dois fótons – por exemplo, saber que os planos de oscilação (polarizações) de cada um deles são ortogonais entre si –, mas, ao mesmo tempo, nada saber sobre as propriedades de cada um deles – isto é, desconhecemos a polarização de cada fóton. Nesse sentido, Schrödinger comentou, em 1935, sobre o emaranhamento: “O melhor conhecimento possível do todo não inclui o melhor conhecimento possível de suas partes – e é esse fato que continuamente vem nos assombrar”.

As novas tecnologias quânticas e a interação estreita entre a óptica quântica e a informação quântica provavelmente continuarão a produzir resultados assombrosos nos próximos anos, desvendando comportamentos sutis da natureza e gerando aplicações que, como o *laser*, poderão ter considerável impacto em nosso cotidiano. **GH**

Sugestões para leitura

DAVIDOVICH, L. ‘Informação quântica: do teletransporte ao computador quântico’. *Ciência Hoje*, n. 206 (2004).

DAVIDOVICH, L. ‘O gato de Schrödinger: do mundo quântico ao mundo clássico’. *Ciência Hoje*, n. 143 (1998).

BAGNATO, V. S. ‘*Laser*: aplicações modernas de uma solução magnífica em busca de problemas’. In: *Física Hoje – uma aventura pela natureza: dos átomos ao universo*. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje/Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2007.