

.....
Larissa do Nascimento Pires*
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Araranguá, Santa Catarina, Brasil.

Israel Müller dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Araranguá, Santa Catarina, Brasil.

Felipe Damasio
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Araranguá, Santa Catarina, Brasil.

RESUMO

É consenso que os lasers consistem em uma das temáticas que demonstram potencial para serem exploradas no ensino de física, pelo fato de propiciarem uma aproximação com o cotidiano dos alunos e alunas, além de possibilitar a discussão sobre aspectos históricos e epistemológicos presentes na construção dessa tecnologia. De fato, percebendo a relevância dos lasers na atualidade, a temática das lãureas no Prêmio Nobel de Física de 2018 consistiu em reconhecer cientistas cujas contribuições fossem relevantes para a área da física dos lasers. Nesse sentido, este trabalho objetiva articular, para o contexto de ensino de física, as contribuições desenvolvidas pelos laureados no Nobel de Física: Donna Strickland, Gérard Mourou e Arthur Ashkin. Com este artigo, espera-se contribuir com ações docentes que possam discutir, no ambiente de sala de aula, conhecimentos relativos à física moderna e contemporânea, além de problematizar elementos para a abordagem de questões relativas à presença de mulheres cientistas.

Palavras-chave: ensino de física; física moderna e contemporânea; física dos lasers.

.....

Autor de correspondência. E-mail: larissa.n.pires@hotmail.com.

1. Introdução

Há tempos que se apresenta a necessidade de uma reformulação do ensino de física quanto aos conteúdos abordados na educação básica, considerando o distanciamento entre a ciência ensinada no meio escolar e aquela que se apresenta, por exemplo, nos meios de comunicação [1]. Nesse sentido, a abordagem favorável aos conhecimentos da física moderna e contemporânea (FMC) na educação básica considera que somente a partir de conceitos desenvolvidos durante o Século XX será possível entender, por exemplo, uma gama de fenômenos cotidianos, além de aparelhos e artefatos da atualidade.

Ostermann [2], em sua pesquisa de doutorado, elencou alguns dos exemplos de temáticas de FMC, apontados pelos professores de física como essenciais para a formação dos alunos do ensino médio; alguns desses exemplos descritos pela autora são: o efeito fotoelétrico, a relatividade restrita, as partículas elementares e a origem do universo, incluindo também aparatos tecnológicos, como os lasers e as fibras ópticas. De fato, a abordagem dessas temáticas é preconizada nos documentos oficiais, como nos Parâmetros Curriculares Nacionais, que descrevem que as discussões de aspectos da FMC são “indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos” [3].

As luzes dos lasers, em específico, são consideradas uma das ferramentas

mais revolucionárias desenvolvidas durante o Século XX. Essa tecnologia encontrou imprescindíveis aplicações em diversos ramos da medicina, desde terapias médicas até procedimentos cirúrgicos [4]. Não somente isso, os lasers apresentaram aplicações ainda mais próximas do cotidiano dos alunos: além de alimentarem histórias de fantasia, como a franquia *Star Wars* com seu raio da morte, os lasers são utilizados, por exemplo, em leitores de código de barras. A existência de variedades de lasers e suas inúmeras aplicações possibilita que possam ser utilizados como um instrumento gerador de discussões de vários conceitos físicos em sala de aula [5].

Além disso, a importância da abordagem dos lasers em sala de aula não se restringe somente à proximidade dessa tecnologia com o cotidiano dos alunos, mas também “entender o laser e suas características nos remete à discussão de fenômenos de grande importância para o entendimento da física do Século XX, incluindo as interações filosóficas” [6]. Sabendo

que o desenvolvimento dos lasers ocorreu em meio às discussões sobre a dualidade onda-partícula, sua abordagem no contexto de ensino básico possibilita a apresentação desse episódio histórico, que é considerado um dos mais interessantes da história da física. Entretanto, diferentemente disso, a realidade que se apresenta de certa maneira consiste no enfoque pontual dos conhecimentos de FMC, o que gera “uma notória diminuição da discussão sobre o problema físico, dos envoltos epistemológicos, da história e filosofia da ciência” [7] presentes nesses conhecimentos.

“I have great faith in lasers, but no one's putting one near my eye!” Donna Strickland

Com isso, argumenta-se que além de se desenvolver uma abordagem que seja motivacional para os alunos, “tópica e informativa como alento à exaustão provocada pelas aulas de física” [8], a apresentação de conhecimentos relativos à FMC, como no exemplo dos *lasers*, deve ser desenvolvida para além de um aspecto informacional e complementar aos conceitos já tradicionais abordados; devem ser explorados de maneira que os alunos entendam os processos de modelização que envolvem esses conhecimentos e suas relações com o desenvolvimento científico da atualidade.

Nesse sentido, reconhecendo a importância dos *lasers* como uma tecnologia relevante, a Academia Sueca de Ciências, no ano de 2018, escolheu como temática das lãureas justamente pesquisas cujas contribuições fossem relevantes para a física dos *lasers*. Desta forma, Donna Strickland, Gérard Mourou e Arthur Ashkin receberam as lãureas do Prêmio Nobel de Física pelas “invenções inovadoras no campo da física dos *lasers*” [9]. Primeiramente, Strickland e Mourou dividiram a metade do prêmio pelo desenvolvimento da técnica chamada *chirped pulse amplification* [10], cujo objetivo é a produção de *lasers* supercurtos de alta intensidade, que podem ser utilizados em inúmeras aplicações na medicina. A outra metade do prêmio foi destinada a Ashkin, pelo desenvolvimento pioneiro das pinças ópticas [11], cujas aplicações são visualizadas em sistemas biológicos.

A inserção em discussões em sala de aula de exemplos atuais de pesquisas científicas como aquelas expostas no Prêmio Nobel de Física de 2018 pode permitir uma abordagem contextualizada da FMC, além de possibilitar que os alunos percebam a ciência como um construto inacabado, em que as implicações de seus resultados não se apresentam de maneira imediata, por sofrerem interferências de aspectos sociais, econômicos e culturais [12]. Mais do que isso, possibilita entender a complexa relação entre ciência e tecnologia ao longo da história, tendo em vista que, muitas vezes, “a tecnologia foi precedida pelo desenvolvimento da física, como no caso da fabricação de *lasers*, ou, em outras, foi a tecnologia que antecedeu o conhecimento científico” [3].

Além disso, embora se entenda que as produções científicas deveriam ser divulgadas unicamente pela sua qualidade, não precisando ser associadas a determinadas características de quem a

produziu [13], a utilização do exemplo do Prêmio Nobel pode suscitar outra discussão: a presença das mulheres na ciência [13, 14]. Nesse sentido, Lima [15] apresenta um panorama que nos faz perceber a importância de se inserirem discussões acerca da diversidade de pessoas e da pluralidade de ideias na ciência, pois os discentes geralmente compreendem o empreendimento científico sem “a colaboração de mulheres, latinas/os, negras/os, africanas/os, orientais [...]”, assumindo como inexistentes as contribuições desses grupos para o desenvolvimento científico e tecnológico”.

De maneira a resgatar uma antiga tradição de *A Física na Escola* de publicar artigos descrevendo algumas das pesquisas desenvolvidas pelos laureados no Nobel de Física [16-19], este artigo intenciona oferecer um material textual sobre as aplicações atuais dos *lasers* desenvolvidas pelos laureados no Prêmio Nobel de Física de 2018. Dessa forma, espera-se contribuir com a disseminação de textos e propostas didáticas que abordem aspectos relativos à física moderna e contemporânea [20].

2. Os Laureados

No ano de 2018, a Academia Sueca de Ciências laureou Donna Strickland, Gérard Mourou e Arthur Ashkin (Fig. 1) pelas suas contribuições no campo da física dos *lasers* [9]. Donna Strickland graduou-se em engenharia da física pela Universidade MacMaster, no Canadá. Em 1989, na Universidade de Rochester, localizada em Nova York, ela concluiu seu doutorado em óptica. Desde 1997, Donna Strickland atua como professora associada na Universidade de Waterloo, no Canadá, liderando pesqui-

sas relacionadas à física dos *lasers*. Gérard Mourou, por sua vez, se graduou em física pela Universidade de Grenoble Alpes em 1967 e obteve seu doutorado na atual Universidade de Sorbonne, em Paris, no ano de 1973. Na década de 1980, Strickland e Mourou desenvolveram a técnica *chirped pulse amplification*, cujo objetivo era aprimorar a intensidade de pulsos de *lasers* ultracurtos [21, 22].

Arthur Ashkin, que recebeu a outra metade do prêmio, graduou-se no ano de 1947 em física pela Universidade de Columbia; cinco anos depois, recebeu seu doutorado em física nuclear pela Universidade Cornell. Em seguida, trabalhou nos Laboratórios Bell em Nova Jersey até se aposentar, no ano de 1992 [23]. As pinças ópticas, desenvolvidas pelo cientista e sua equipe, possibilitaram o desenvolvimento de estudos sobre a vida microscópica e seus sistemas moleculares.

3. Laser: um breve histórico

Ainda que o *laser* tenha sido desenvolvido somente na década de 1960, os princípios teóricos para seu funcionamento foram elencados no início do século XX, por meio de estudos relacionados à mecânica quântica. Em 1917, Albert Einstein (1879-1955), utilizando o trabalho desenvolvido por Max Planck (1958-1947), propôs teoricamente o conceito de emissão estimulada de radiação, que consiste em um fenômeno quântico em que a interação de um fóton com um átomo excitado provoca a produção de outro fóton idêntico [25].

Alguns autores sugerem que os primeiros estudos para aplicação da emissão estimulada foram desenvolvidos no



Figura 1 - Arthur Ashkin, Gérard Mourou e Donna Strickland, Ref. [9].

contexto da Segunda Guerra Mundial [4]. Os primeiros indícios para o desenvolvimento do *laser* são reconhecidos nas pesquisas do físico norte-americano Charles Townes (1915-2015), na época professor da Universidade de Columbia. Com o auxílio de seus colaboradores, um estudante de doutorado e um pós-doutorando, Townes (Fig. 2) desenvolveu um dispositivo de amplificação de radiação a partir do uso do espectro eletromagnético das micro-ondas, sendo chamado de *maser* [26], acrônimo para *microwave amplification by stimulated emission of radiation*.

Em 1958, visionando a possibilidade da construção de um aparelho que pudesse amplificar ondas eletromagnéticas no espectro da luz visível, Charles Townes e seu colega Arthur Schawlow (1921-1999) estabeleceram algumas possibilidades de desenvolver um *maser óptico*. Os resultados dessa análise (Fig. 3) foram publicados na revista *Physical Review* [27]: por essa pesquisa, Townes foi reconhecido com o Prêmio

Nobel de Física de 1964, devido às contribuições na área da eletrônica quântica [28]. A láurea também foi compartilhada com os físicos soviéticos Alexander Mikhailovich Prokhorov (1916-2002) e Nikolai Gennadievich Basov (1922-2001) que, de forma independente, haviam também desenvolvido conhecimentos relevantes acerca do *maser óptico* [29].

Esse artigo, publicado por Schawlow e Townes em 1958, tornou-se um trabalho clássico da área da física dos *lasers* [4] e desencadeou uma corrida para um desenvolvimento experimental que apresentasse o funcionamento do *maser óptico*. A possível primeira demonstração é creditada ao físico Theodore Harold Maiman (1927-2007), que na época, em torno de 1960, trabalhava nos Laboratórios Hughes, na Califórnia (Fig. 4). Ele desenvolveu um aparato cuja montagem consistia em um cristal de rubi inserido no interior de uma lâmpada de flash. As extremidades desse cristal eram cobertas com camadas de prata e

em um desses lados, a camada era semi-transparente, de maneira que a radiação eletromagnética produzida pudesse ser transmitida [4]. A proposta de Theodore Maiman (Fig. 5) foi publicada igualmente na Revista *Physical Review* [31].

Além disso, é possível dizer que o desenvolvimento da tecnologia dos *lasers* extrapolou os limites norte-americanos e soviéticos, exercendo influência significativa na ciência brasileira. Em 1959, o físico brasileiro Sérgio Porto (Fig. 6), doutor em física pela Universidade Johns Hopkins de Baltimore e então professor de mecânica estatística no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), conhece o artigo *Infrared and Optical Masers*, publicado um ano antes pelos físicos supracitados Arthur Schawlow e Charles Townes, que trabalhavam nos Laboratórios Bell, em Nova Jersey. Refletindo quanto a suas insatisfações como professor e pesquisador no Brasil, Sérgio aceita o convite de um

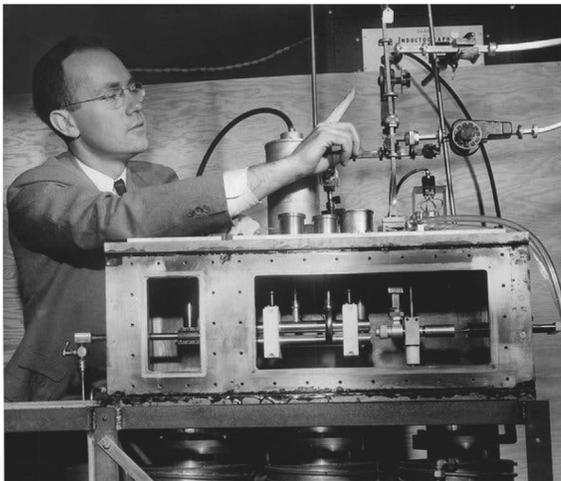


Figura 2 - Charles Townes, Ref. [24].



Figura 4 - Theodore Maiman, Ref. [30].

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 112, NUMBER 6

DECEMBER 15, 1958

Infrared and Optical Masers

A. L. SCHAWLOW AND C. H. TOWNES*
Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
 (Received August 26, 1958)

The extension of maser techniques to the infrared and optical region is considered. It is shown that by using a resonant cavity of centimeter dimensions, having many resonant modes, maser oscillation at these wavelengths can be achieved by pumping with reasonable amounts of incoherent light. For wavelengths much shorter than those of the ultraviolet region, maser-type amplification appears to be quite impractical. Although use of a multimode cavity is suggested, a single mode may be selected by making only the end walls highly reflecting, and defining a suitably small angular aperture. Then extremely monochromatic and coherent light is produced. The design principles are illustrated by reference to a system using potassium vapor.

Figura 3 - Artigo *Infrared and Optical Masers*, Ref. [27].

Stimulated Optical Emission in Fluorescent Solids. II. Spectroscopy and Stimulated Emission in Ruby

T. H. MAIMAN,* R. H. HOSKINS,* I. J. D'HAENENS, C. K. ASAWA, AND V. EVTUHOV
Hughes Research Laboratories, A Division of Hughes Aircraft Company, Malibu, California
(Received January 27, 1961)

Optical absorption cross sections and the fluorescent quantum efficiency in ruby have been determined. This data has been used to correlate calculations with the analysis of the preceding paper. Stimulated emission from ruby under pulsed excitation has been studied in some detail; the observations are found to depend strongly on the perfection of the particular crystal under study. A peak power output of approximately 5 kw, total output energy of near 1 joule, beam collimation of less than 10^{-2} rad, and a spectral width of individual components in the output radiation of about 6×10^{-4} Å at 6943 Å have been measured. It is suggested that mode instabilities due to temperature shifts and a time-varying magnetic field are contributing to an oscillatory behavior of the output pulse.

Figura 5 - Artigo *Spectroscopy and Stimulated Emission in Ruby*, Ref. [31].

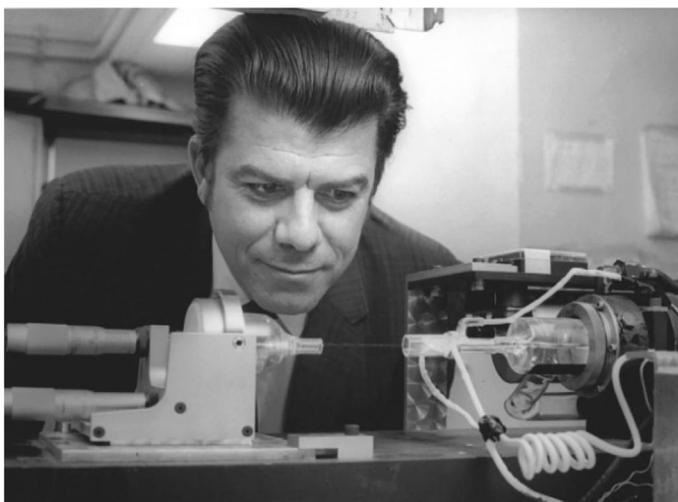


Figura 6 - Sérgio Porto, Ref. [32].

representante dos Laboratórios Bell para cooperar em trabalhos relacionados à física dos *lasers*, no ano de 1960. Suas pesquisas acerca das aplicações tecnológicas com base no uso dos *lasers* tornaram-se extremamente relevantes, o que permitiu que o Brasil fosse reconhecido internacionalmente na utilização de *lasers* na medicina [4, 33].

Cabe ressaltar que *A Física na Escola* publicou alguns trabalhos [34, 35] que descrevem o funcionamento básico e as características dos *lasers*; caso o leitor não esteja familiarizado com esses conceitos, recomenda-se a leitura dos artigos mencionados para uma melhor compreensão dos princípios expostos a seguir.

4. Arthur Ashkin e as pinças ópticas

Uma aplicação extremamente relevante para a ciência dos *lasers* é a chamada pinça óptica. Entre os anos de 1970 e 1990, Arthur Ashkin (Fig. 7) publicou inúmeros artigos [11, 37, 38] que possibilitaram ser considerado o pionei-

ro no que diz respeito ao desenvolvimento das armadilhas ópticas [39]. A partir dessa técnica, é possível manipular, sem qualquer contato mecânico, objetos minúsculos como organelas presentes no citoplasma das células, além de vírus e bactérias, e também mensurar propriedades mecânicas existentes em sistemas biológicos [40].

Quais são os conhecimentos que

possibilitam compreender a aplicação das pinças ópticas? A partir das ideias descritas, em 1619, por Johannes Kepler acerca do comportamento das caudas dos cometas, bem como pelo desenvolvimento da teoria eletromagnética de Maxwell, formalizada em 1873 [41], foi possível demonstrar a capacidade da luz em exercer força em um determinado meio: esse fenômeno foi chamado de pressão de radiação [42]. Em outras palavras, a luz transporta momento linear [41] e, ao incidir sobre algum objeto, poderia aplicar nele uma força, durante a transferência de momento. Essa força dependeria da potência luminosa, bem como da velocidade de propagação no meio incidente [43, 44].

Não somente isso; na incidência de um raio de luz em um pequeno objeto, haverá desvio de sua trajetória caso os índices de refração entre o meio de incidência e do objeto sejam diferentes. Ao analisar um feixe de luz localizado que incide sobre um pequeno objeto, será gerado um raio refletido e um raio refratado na superfície do objeto, a partir de cada raio do feixe luminoso. Os raios refletidos contribuirão para a pressão de radiação, cujo feixe de luz

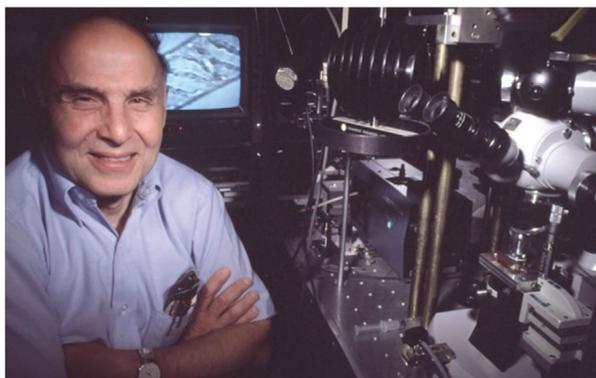


Figura 7 - Arthur Ashkin em 1988, Ref. [36].

empurra o pequeno objeto no sentido de incidência do feixe, enquanto os raios refratados contribuíram com as chamadas forças de gradiente [43]. A Fig. 8 representa justamente essa consideração de que o momento linear do fóton sofre uma variação Δp em sua direção de propagação ao ser refratado no interior do objeto capturado. Pela conservação de momento linear, o objeto capturado também sofrerá uma variação de momento $-\Delta p$ de mesmo módulo, mas de sentido oposto à variação de momento linear do fóton de luz incidente [29].

Durante o estudo do movimento de microesferas a partir da pressão de radiação, Ashkin e sua equipe de pesquisadores observaram que esses pequenos objetos se alinhavam ao eixo óptico do feixe de *laser*. Em outras palavras, ao focalizar o feixe de *laser* utilizando a objetiva de um microscópio, percebeu-se que as esferas ficavam presas próximas à região do foco do feixe luminoso, efeito causado justamente pela refração dos feixes luminosos [43, 44]. O esquema apresentado na Fig. 9 demonstra que, independentemente da posição da pequena esfera, a pinça óptica a posicionará no foco do feixe luminoso do *laser*. No primeiro caso, uma partícula posicionada abaixo do foco é deslocada para cima; no segundo caso, uma partícula posicionada acima do foco é deslocada para baixo; o terceiro caso representa situações em que a partícula está deslocada horizontalmente: ainda assim, o feixe de luz *laser* aplica uma força que posiciona a partícula em seu foco [29].

Nesse sentido, é o equilíbrio entre a força de gradiente e da pressão de radiação que permite o aprisionamento de objetos por meio da pinça óptica. No entanto, essa interpretação só é válida dentro do modelo da óptica geométrica

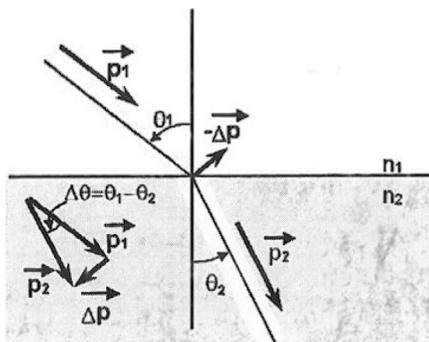


Figura 8 - Variação do momento linear do fóton, figura original da Ref. [29].

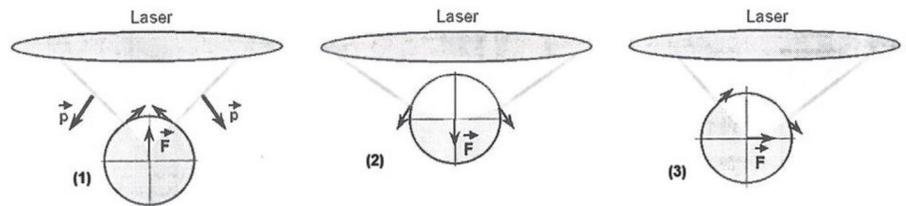


Figura 9 - Esquema de forças aplicadas pela pinça óptica, figura original da Ref. [29].

e aplicável somente no caso de pequenos objetos que possuam índice de refração maiores que o índice de refração do meio que os circunda [43].

Apesar das suas importantes pesquisas relacionadas à captura de partículas por meio das suas armadilhas ópticas, passou-se muito tempo até que Arthur Ashkin fosse honrado com o Prêmio Nobel de Física [42]. No ano de 1997, cuja premiação do Nobel de Física homenageou cientistas pelo desenvolvimento de métodos para aprisionar átomos com luz *laser*, alguns cientistas cogitaram a possibilidade de que Arthur Ashkin tivesse sido negligenciado [39]. Apesar disso, seu reconhecimento veio a ocorrer no ano de 2018, a partir das suas contribuições nos estudos biológicos. Essa láurea também foi compartilhada com Donna Strickland e Gérard Mourou, devido a suas contribuições, igualmente importantes, para a área da física dos *lasers*.

5. As contribuições de Donna Strickland e Gérard Mourou

Na mesma época em que Donna Strickland estudava na Universidade de Rochester em Nova York, no ano de 1985, os estudiosos sobre a óptica estavam procurando desenvolver um modo de aumentar a intensidade de *lasers* de pulsos ultrarrápidos. De fato, “muitos eventos no dia a dia acontecem em escalas de tempo muito rápidas, o que motivou pesquisadores a desenvolverem *lasers* com pulsos ultrarrápidos, com aplicações em variados campos da ciência” [45]. Um dos problemas que se apresentavam nesse contexto consistia no fato de que na medida em que se aumentava a intensidade dos pulsos de *lasers*, havia uma distorção nas propriedades dos meios de amplificação, chamado de efeito Kerr [46], implicando que intensidades muito altas poderiam danificar os cristais utilizados na amplificação dos pulsos luminosos [47].

Antes de abordarmos os aspectos e as implicações da pesquisa de Strickland e Mourou, é necessário compreender a constituição dos *lasers* pulsados. Diferentemente dos *lasers* contínuos co-

muns, os *lasers* pulsados possuem a característica de serem emitidos em pulsos intensos de curta duração [48], que possuem ordem temporal de femto (10^{-12} s) a picossegundos (10^{-15} s). A emissão de um *laser* pulsado, em termos da ondulatória, consiste no somatório dos vários modos de vibração presentes no interior da sua cavidade óptica, o que implica em uma larga banda de espectro associada a esse pulso. Dessa maneira, um pulso ultracurto é constituído pela soma de diferentes componentes espectrais [46]. Por exemplo, *lasers* pulsados podem ser produzidos por meio de amplificadores com átomos de titânio presentes em cristais de safira, que, por meio do bombeamento óptico, emitem fótons cujas frequências se estendem desde o espectro visível até o infravermelho [49].

Por conta disso, conforme se aumenta o número de modos de vibração encontrados na banda de emissão do meio amplificador, há uma diminuição na duração do pulso e um conseqüente aumento na chamada potência de pico do *laser*, pelo fato de sua energia se concentrar em um curto intervalo de tempo. Isso significa que, na medida em que o intervalo de tempo diminui, o pico de potência luminosa do *laser* aumenta, dada uma mesma quantidade de energia. Porém, quando essa quantidade de energia é aumentada por meio dos amplificadores, seus componentes ópticos acabam sendo danificados devido a efeitos não lineares, que consistem em alterações nas propriedades ópticas dos materiais por conta da presença de luz [46], relacionados à alta potência luminosa do *laser*.

Nos anos 1980, as maiores potências luminosas obtidas sem danificar o meio amplificador estavam situadas na escala dos trilhões de watts, porém era necessária uma quantidade de energia de mil joules para que o feixe de *laser* pudesse ser emitido em um bilionésimo de segundo [42]. A dúvida dos cientistas era a seguinte: como desenvolver uma técnica em que *lasers* fossem emitidos de maneira ultrarrápida, mas com máxima potência e sem danificar o meio

amplificador? A pesquisa que concedeu uma possível solução para esse problema foi publicada (Fig. 10) em 1985 por Donna Strickland e Gérard Mourou na revista *Optics Communications*, em um artigo intitulado *Compression of amplified chirped optical pulses* [10].

A técnica *chirped pulse amplification* é responsável pela separação temporal das frequências dos pulsos de lasers [46]. A técnica (Fig. 11) pode ser compreendida a partir das seguintes etapas: por meio de componentes ópticos como prismas ou grades de difração, os pulsos de lasers sofrem dispersão em seus componentes de frequência. Quando tais componentes são “[...] apropriadamente posicionados, eles separam as frequências espectrais de forma que as frequências menores percorram um caminho óptico maior” [46]. Em outras palavras, ocorre um atraso da trajetória de diferentes frequências de onda, o que provoca uma redução da sua potência [47]. Após isso, as componentes espectrais são amplificadas em sua intensidade, sem danificar o meio amplificador. Por último, um arranjo de redes de difração ou prismas recombina e comprime o pulso de laser em sua duração inicial, desfazendo os atrasos relativos entre os diferentes comprimentos de onda [50], caracterizando esse pulso de laser como mais potente comparado ao pulso original [10, 51, 52].

O processo de compressão e amplificação utilizado por Strickland foi aplicado originalmente em radares de comunicação depois da Segunda Guerra Mundial [39, 42]. Em seu artigo introdutório publicado em 1985, Donna Strickland descreve que sua técnica consiste na transposição do sistema em-

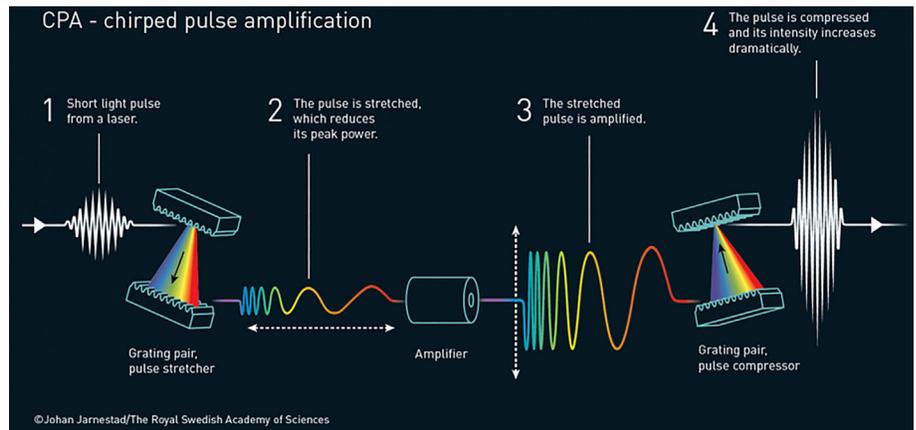


Figura 11 - Esquema da técnica *chirped pulse amplification*, Ref. [9].

pregado nos radares para o regime óptico. Segundo a cientista, amplificar pulsos que estejam em baixas potências permite que posteriormente energias mais altas sejam alcançadas [10], o que não seria possível por meio das técnicas clássicas de amplificação.

Para compreender esse processo, é preciso relembrar as conceituações sobre os lasers pulsados. Como mencionado anteriormente, a geração de pulsos luminosos de curta duração requer uma ampla gama de frequências de onda [42]. Por outro lado, “um pulso é uma superposição coerente e individual de muitas ondas senoidais, cujas amplitudes se somam construtivamente em um ponto no tempo” [45]. É possível visualizar essa situação por meio da representação da Fig. 12, que demonstra a adição de pulsos de luz com frequências ligeiramente diferentes. Em resumo, um pulso curto de luz laser é constituído pela soma de ondas de diferentes frequências ligeiramente diferentes.

Ao observar a intensidade de um pulso de luz em função do tempo, como apresentado na Fig. 13, percebe-se que este existe em um curto período de tempo e que possui alta intensidade; ao se tentar amplificar um pulso com essas características, o meio amplificador poderá ser danificado. Entretanto, ao analisar essa situação considerando a intensidade luminosa do pulso de laser curto no domínio da frequência, observa-se a existência de diferentes frequências cujas intensidades podem ser aumentadas individualmente sem danificar o meio amplificador [53]. Dessa maneira, entende-se que a técnica não amplifica diretamente um único pulso curto de luz laser, mas sim submete o pulso de laser a um processo de dispersão para que então possa ser amplificado com segurança [54]. Por outro lado, ao se pensar em pulsos de lasers como constituídos por fótons, essas partículas introduzidas no processo de amplificação submetem-se às mesmas características de frequência e fase do pulso

COMPRESSION OF AMPLIFIED CHIRPED OPTICAL PULSES [☆]

Donna STRICKLAND and Gerard MOUROU

Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, 250 East River Road, Rochester, NY 14623-1299, USA

Received 5 July 1985

We have demonstrated the amplification and subsequent recompression of optical chirped pulses. A system which produces 1.06 μm laser pulses with pulse widths of 2 ps and energies at the millijoule level is presented.

Figura 10 - Artigo *Compression of amplified chirped optical pulses*, Ref. [10].

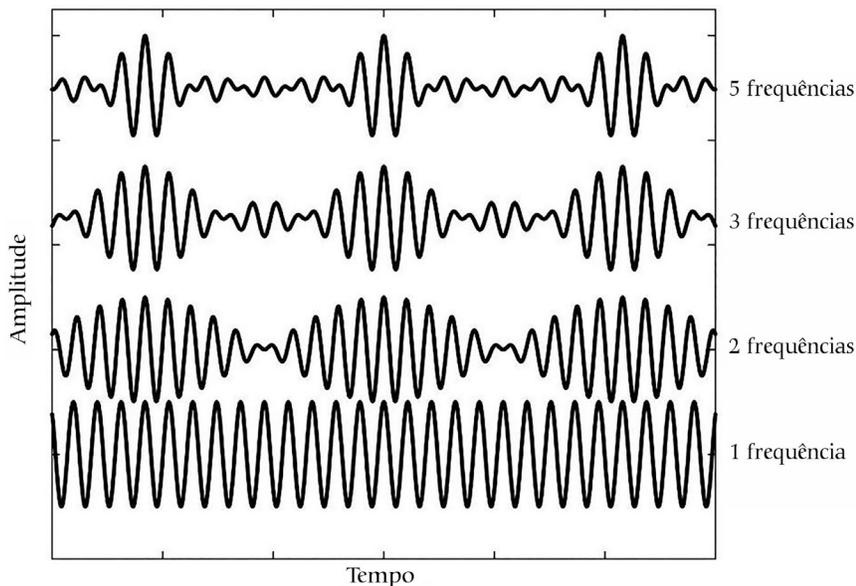


Figura 12 - Constituição das frequências de pulsos curtos, Ref. [49].

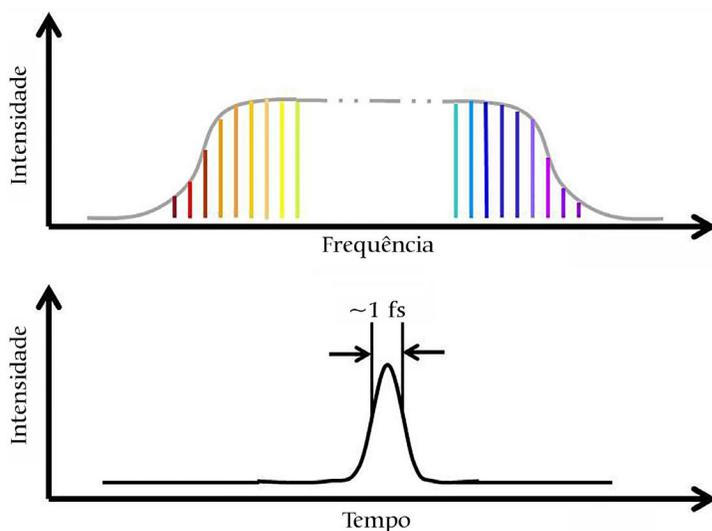


Figura 13 - Gráficos relativos aos pulsos de laser de curta duração, Ref. [49].

inicial; ao serem comprimidos, esses fótons adicionados igualmente são compactados [50].

Depois de passados dez anos de seu desenvolvimento, pesquisadores obtiveram *lasers* com intensidades de até 10^{20} W/cm². Hoje, a maior intensidade alcançada está na ordem de 10^{22} W/cm² [42, 54]. Em 1987, Strickland e Mourou, com o auxílio de outros pesquisadores, já haviam conseguido gerar pulsos na faixa dos terawatts de potência (10^{12} W) a partir de um pulso de 1 J

de energia, comprimido no intervalo de 1 picossegundo [54]. O desenvolvimento de sistemas de *laser* ultrarrápidos propiciou o desenvolvimento de inúmeras aplicações, principalmente na medicina, pela possibilidade de desenvolvimento de estudos que utilizam o *laser* como complemento em terapias contra o câncer e na realização de procedimentos em cirurgias ou tratamentos oculares. A técnica vem sendo utilizada nas cirurgias LASIK, acrônimo para *Laser-Assisted in Situ Keratomileusis*,

cujo feixe de luz *laser* pode cortar rapidamente a córnea do paciente antes que o tecido ao redor possa se aquecer [55, 56].

6. Considerações finais

Este trabalho objetivou apresentar as contribuições de cientistas da atualidade como motivador para ensino da física dos *lasers*, por meio dos exemplos de Donna Strickland, Gérard Mourou e Arthur Ashkin. Corroborando a pesquisa de Lima [15], procurou-se abordar o exemplo de uma mulher cientista no contexto do ensino de ciências. Embora o aspecto supracitado não seja o foco deste trabalho, considera-se importante apresentar alguns aspectos de discussões sobre as mulheres na ciência, de forma a contribuir com essas discussões nas aulas de física. Assim, elencar os percalços que as mulheres vivenciaram durante a ascensão acadêmica possibilita que os discentes percebam a ciência como um processo muito mais complexo do que o simples entendimento de princípios que regem a natureza.

Além disso, entende-se como necessária a elaboração de propostas e/ou o relato de experiências acerca da discussão de conteúdos da atualidade no contexto de ensino de física, objetivando-se estar em consonância com os princípios expostos nos documentos oficiais e com as pesquisas que discorrem sobre a importância da abordagem de conhecimentos de FMC. Nesse sentido, este trabalho objetivou apresentar a correlação de diversos conceitos de óptica, ondulatória e mecânica quântica que possibilitam compreender os aspectos da pesquisa desenvolvida por Strickland e Mourou, além de mencionar as contribuições de Arthur Ashkin. Assim, a abordagem da temática *laser*, por ser um assunto que naturalmente desperta a curiosidade dos discentes por estar vinculada a histórias de ficção científica e a aplicações reais e relevantes como na medicina, promove que os alunos e as alunas reconheçam aspectos epistemológicos sobre a ciência, além de compreenderem as intrincadas relações entre ciência e tecnologia.

Referências

- [1] E.A. Terrazzan, Caderno Catarinense de Ensino de Física, 9, 209 (1992).
- [2] F. Ostermann, *Tópicos de Física Contemporânea em Escolas de Nível Médio e na Formação de Professores de Física*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

- [3] BRASIL, *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+)*. Ciências da Natureza e Matemática e suas Tecnologias (MEC/Semtec, Brasília, 2006).
- [4] C.P. Silva Neto, O. Freire Júnior, Revista Brasileira de Ensino de Física, **39**, e1502 (2017).
- [5] R.O. Hakime, *Transposição Didática da Interação do Laser com Sistemas Biológicos no Ensino Médio: Uma Proposta de Guia Didático Para Professores*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
- [6] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro, D. Guimarães, In: *Anais do XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física*, Rio de Janeiro, 2005. p. 1-4.
- [7] T.G. Nascimento, M.A.S. Alvetti, Ciências & Ensino, **1**, 29 (2006).
- [8] M.F. Rezende Junior, F.F. Souza Cruz, Ciências & Educação, **15**, 305 (2009).
- [9] Nobel Prize, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/advanced-physicsprize2018.pdf>. Acesso em 06/02/2020.
- [10] D. Strickland, G. Mourou, Optics Communications, **56**, 219 (1985).
- [11] A. Ashkin, Physics Review Letters, **24**, 156 (1970).
- [12] D.G. Pérez, I.F. Montoro, J.C. Alís, A. Cachapuz, J. Praia, Ciências & Educação **7**, 125 (2001).
- [13] A. Chassot, *A Ciência é Masculina? É, Sim Senhora!* (Editora Unisinos, São Leopoldo, 2019).
- [14] A. Chassot, Revista Contexto e Educação, **19**, 9 (2004).
- [15] I.P.C. Lima, Revista Gênero, **16**, 51 (2015).
- [16] N. Studart, Física na Escola, **4**(2), 23 (2003).
- [17] V. Pleitez, Física na Escola, **5**(2), 31 (2004).
- [18] V.S. Bagnato, Física na Escola, **6**(2), 39 (2005).
- [19] S.S. Mizrahi. Física na Escola, **6**(2), 36 (2005).
- [20] F. Ostermann, M.A. Moreira, Investigações em Ensino de Ciências, **5**, 23 (2000).
- [21] E. Gregersen, <https://www.britannica.com/biography/Donna-Strickland>. Acesso em 06/02/2020.
- [22] E. Gregersen, <https://www.britannica.com/biography/Gerard-Mourou>. Acesso em 06/02/2020.
- [23] E. Gregersen, <https://www.britannica.com/biography/Arthur-Ashkin>. Acesso em 06/02/2020.
- [24] R. McFadden, <https://www.nytimes.com/2015/01/29/us/charles-h-townes-physicist-who-helped-develop-lasers-dies-at-99.html>. Acesso em 06/02/2020.
- [25] A. Einstein, Physikalische Zeitschrift, **18**, 121 (1917).
- [26] S.K. Kaminsky, Revista Brasileira de Medicina, **66**, 20 (2009).
- [27] A.L. Schawlow, C.H. Townes, Physics Review, **112**, 1940 (1958).
- [28] A.J. Gross, T.R.W. Herrmann, World J Urol, **25**, 217 (2007).
- [29] R. Barthem, *Temas Atuais de Física* (Livraria da Física, São Paulo, 2005).
- [30] C.H. Townes, Nature, **447**, 654 (2007).
- [31] T.H. Maiman, R.H. Hoskins, I.K. D'Haenens, C.K. Asawa, V. Evtuhov, Physics Review, **123**, 1151 (1961).
- [32] R.O. Andrade, <https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/06/07/o-fisico-que-olhava-as-luzes>. Acesso em 30/11/2019.
- [33] W.A.L. Santana, O. Freire Júnior, Revista Brasileira de Ensino de Física, **32**, 3601 (2010).
- [34] V.S. Bagnato, Física na Escola **2**(2), 4 (2001).
- [35] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro, D. Guimarães, Física na Escola **7**(2), 73 (2006).
- [36] M.L. Diamond, <https://www.app.com/story/money/business/innovators/2018/10/02/nobel-prize-rumson-man-wins-physics-prize-bell-labs-laser-work/1498877002/>. Acesso em 30/11/2019.
- [37] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, Science, **235**, 1517 (1987).
- [38] A. Ashkin, Biophysical Journal, **61**, 569 (1992).
- [39] B. Lee, Physics Focus, **28**, 33 (2018).
- [40] FAPESP, Revista Pesquisa, **58**, 53 (2000).
- [41] A.A.R. Neves, *Força Óptica em Pinças Ópticas: Estudo Teórico e Experimental*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campinas, 2006.
- [42] G.R. Kumar, Current Science, **115**, 1844 (2018).
- [43] M.S. Rocha, *Pinças Ópticas: Experimento e Teoria*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- [44] M.S. Rocha, *Pinças Ópticas: Experimento, Teoria e Aplicação no Estudo da Interação DNA-Fármacos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- [45] F.C. Fávero, *Geração de Pulsos de Picossegundos em Laser de Fibra Óptica e Aplicação na Determinação do Índice de Refração Não-Linear da Água*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2007.
- [46] A.R. Oliveira, *Geração de Segundo Harmônico Sintonizável por Modulação de Pulsos de Laser Ultracurtos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2012.
- [47] A. Cho, Science, **362**, 12 (2018).
- [48] E.C. Valadares, A.M. Moreira, Caderno Catarinense de Ensino de Física, **15**(2), 359 (1998).
- [49] C. Orzel, <https://www.forbes.com/sites/chadorzel/2018/10/02/nobel-prize-in-physics-2018-how-to-make-ultra-intense-ultra-short-laser-pulses>. Acesso em 06/02/2020.
- [50] E. Pisanty, <https://physics.stackexchange.com/questions/432137/what-is-chirped-pulse-amplification-and-why-is-it-important-enough-to-warrant-a>. Acesso em 06/02/2020.
- [51] P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, G. Mourou, IEEE Journal of Quantum Electronics, **24**, 398 (1988).
- [52] D. Strickland, P. Corkum, SPIE, **1413**, 54 (1991).
- [53] J.P. Galaup, Revista Cubana de Física, **35**, 121 (2018).
- [54] M. Wilson, Physics Today, **71**, 18 (2018).
- [55] A.P. Freire, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, **15**, 3 (2018).
- [56] L. Valich, <https://www.rochester.edu/newscenter/what-is-chirped-pulse-amplification-nobel-prize-341072>. Acesso 06/02/2020.

Nota

¹Tradução: “Eu tenho muita fé nos *lasers*, mas se ninguém colocar um perto dos meus olhos!”. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/science/2018/oct/20/nobel-laureate-donna-strickland-i-see-myself-as-a-scientist-not-a-woman-in-science>>. Acesso em: 5 jul. 2019.