

Lasers de alta potência e o Prémio Nobel da Física de 2018

Gonçalo Figueira e Marta Fajardo

Departamento de Física & GoLP/Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear
Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa
goncalo.figueira@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Neste artigo, abordamos a técnica de amplificação de impulsos dispersos introduzida por Gérard Mourou e Donna Strickland, premiados com o Nobel da Física de 2018. Revemos os conceitos fundamentais associados aos impulsos laser de curta duração e os problemas ligados à sua amplificação, que levaram à demonstração do CPA. Por fim, analisamos o impacto e as principais aplicações desta descoberta.

Introdução

O Prémio Nobel da Física de 2018 foi atribuído a três cientistas: Arthur Ashkin, Gérard Mourou e Donna Strickland (imagem ao lado, da esquerda para a direita), pelas suas invenções revolucionárias na tecnologia laser: ao primeiro pelas pinças ópticas, aos dois últimos pela técnica de amplificação de impulsos dispersos (*chirped pulse amplification*, ou CPA). Esta edição vem reforçar a liderança dos lasers como a tecnologia moderna mais laureada com o Nobel da Física: só no presente século, é já a sexta vez que os premiados utilizaram lasers como a ferramenta fundamental no seu trabalho.

O prémio de 2018 foi também o terceiro a ser atribuído a uma mulher, sendo preciso recuar 55 anos até à anterior vencedora. Actualmente na Universidade de Waterloo, Canadá, Donna Strickland realizou os trabalhos fundamentais que levaram à demonstração da técnica CPA em 1985-87, sob a orientação de Mourou (actualmente na École Polytechnique, França) quando ambos trabalhavam na Universidade de Rochester, Nova Iorque. Curiosamente, o trabalho que resultou no Nobel foi também o seu primeiro artigo científico (!) e o tema da sua tese de doutoramento, sendo um dos raros casos em que a descoberta premiada teve lugar ainda antes da obtenção deste grau académico. Neste artigo, concentramo-nos na descoberta e nas aplicações desta técnica.



Nobel da Física de 2018: Arthur Ashkin, Gérard Mourou e Donna Strickland

Mais rápido, mais curto, mais potente: impulsos laser ultra-curtos

A técnica CPA é hoje utilizada globalmente em múltiplos contextos, desde laboratórios de investigação, até cirurgias oculares, processamento de materiais à microescala e aceleradores de partículas para tratamentos de cancro. Não será exagerado afirmar que todos os sistemas laser de alta potência funcionam baseados neste princípio, ao mesmo tempo eficaz e elegante. Para o compreender, vamos começar por rever alguns conceitos fundamentais e viajar até às escalas de tempo ultra-rápidas.

Um laser é uma fonte de luz coerente, em que as diversas ondas luminosas se combinam de um modo organizado, mantendo uma fase constante entre si. Podemos imaginar a luz laser como um exército de ondas em marcha, paralelas e perfeitamente sincronizadas. O modo como se obtém esta sincronização deriva de um mecanismo fundamental na interacção entre luz e matéria à escala atómica: a *amplificação estimulada de radiação*, proposta por Albert Einstein em 1916. Neste processo, um fóton interage com um átomo excitado, estimulando-o a decair e a emitir um segundo fo-

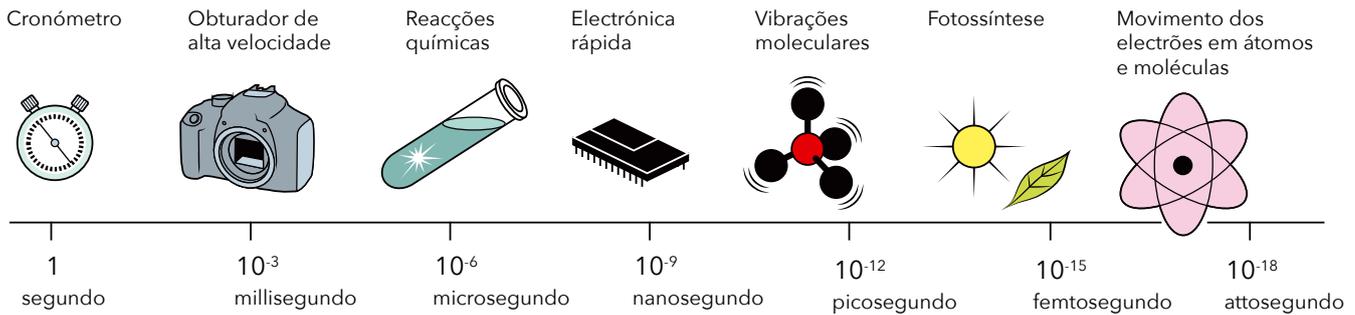


Fig. 1 - Escalas de tempo: do segundo ao femtosegundo (10⁻¹⁵ s) e attosegundos (10⁻¹⁸ s).

tão, idêntico ao primeiro e com a mesma fase de oscilação. Repetindo-se este processo ao longo de múltiplas gerações de fótons, a luz é amplificada e preserva a coerência, uma vez que cada novo fóton adicionado é uma cópia dos anteriores. Este princípio está precisamente reflectido na sigla LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou amplificação de luz por emissão estimulada de radiação.

Desta coerência resulta a capacidade de se focar um feixe laser numa área minúscula, concentrando uma grande quantidade de energia, capaz de furar ou cortar facilmente uma chapa metálica. E resulta também a possibilidade de se concentrar a energia do laser numa duração ínfima, na forma de um impulso laser, o que se traduz em potências (energia por unidade de tempo) gigantescas. Assim, um impulso laser é energia em movimento à velocidade da luz, compactada numa duração cujo limite mínimo é ditado pelo período da oscilação luminosa. Por exemplo, para a luz visível, cuja frequência é da ordem dos 10¹⁵ ciclos por segundo, os impulsos laser mais curtos atingem durações da ordem inversa: 10⁻¹⁵ segundos, ou femtosegundos. Impulsos com tais durações designam-se *ultra-curto* ou *ultra-rápidos*.

Estas escalas de tempo incrivelmente efémeras são de difícil concepção para a mente humana (Figura 1). Em perspectiva, um femtosegundo está para um piscar de olhos como este está para a duração do Universo. Mas, se do Universo estamos limitados a vislumbrar o instante cósmico do presente, no caso dos lasers temos hoje tecnologias que nos permitem facilmente gerar, manipular, amplificar e detectar impulsos com estas durações.

Há vários motivos pelos quais é interessante utilizar estes impulsos luminosos. Em primeiro lugar, permitem investigar a natureza a esta escala temporal e aceder a fenómenos físicos e químicos no interior de átomos e moléculas. Em segundo, a curta duração está associada a uma alta resolução espacial, isto é, ao estudo de objectos com precisões de micrómetros. Por fim, se se amplificar a energia dum impulso laser ultra-curto, pode-se investigar o comportamento da matéria quando sujeita a condições extremas de energia, pressão ou

temperatura, inalcançáveis de outro modo - por exemplo, podem-se recriar em laboratório as condições de objectos astrofísicos como núcleos planetários ou estelares e testar os modelos existentes.

Amplificação de impulsos laser

No entanto, antes da invenção da técnica CPA, existia uma dificuldade intransponível ligada à amplificação de impulsos curtos. A Figura 2 mostra um amplificador laser típico, com um oscilador - o sistema laser que gera os impulsos primordiais - seguido de um conjunto de estágios de amplificação, nos quais se repete o processo de emissão estimulada, aumentando consecutivamente a energia do impulso.

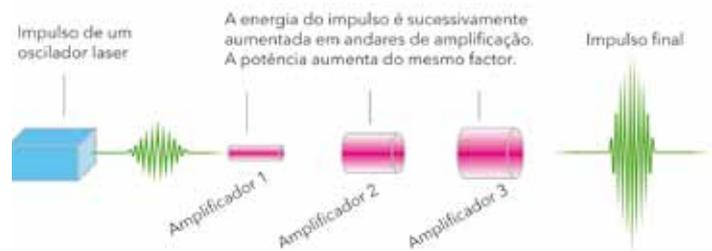


Fig. 2 - Amplificador laser convencional.

Uma equação simples que relaciona diversas grandezas permite compreender o problema. A emitância radiante de um impulso laser é definida como a energia por unidade de área e de tempo, ou seja,

$$M_e = d\Phi_e/dA = dE/(dA dt) = dF/dt$$

em que E é a energia (J), A a área do feixe (m²), e $\Delta\tau$ sua duração (s). Além disso, definimos a potência $P = dE/dt$ (W) e a densidade de energia $dF = dE/dA$ (J/m²). Assim, para se criar um impulso laser de alta emitância radiante, deve-se conjugar uma energia elevada com uma área pequena (o que se consegue facilmente, focando o feixe laser com lentes ou espelhos curvos) e uma duração curta. Quando se pretende atingir energias superiores ao nível do joule, para a amplificação ser eficiente, a densidade de energia do impulso laser deve ter um valor $F \approx 1$ J/cm². Por outro lado, de modo a evitar efeitos não-lineares nefastos durante a passagem pelos materiais ópticos (que pode levar à desintegração do impulso ou à destruição do próprio amplificador!), a emitân-

cia radiante deve ser obrigatoriamente mantida abaixo de $M_e \approx 1 \text{ GW/cm}^2$. De modo a cumprir estes dois requisitos, resulta a condição limite

$$dt = dF/M_e$$

Esta conclusão implica que apenas é possível atingir energias elevadas se a duração do impulso for da ordem de um nanosegundo (10^{-9} s) ou superior, isto é, várias ordens de grandeza maior do que a de um impulso ultra-curto. E, efectivamente, desde a invenção do laser até meados da década de 80, coexistiram dois mundos no domínio das altas potências ópticas: sistemas de alta energia (kJ) e longa duração (ns), e sistemas de baixa energia (< mJ) e curta duração (fs). No caso dos primeiros em particular, os dois requisitos acima ditam ainda que, à medida que a energia do impulso aumenta, a sua área deve também expandir-se. Um exemplo é o sistema *Nova*, que quando foi instalado no Laboratório Lawrence Livermore (EUA) em 1984 era o laser mais potente do mundo. Cada uma das suas dez linhas laser era capaz de gerar impulsos de 10 kJ, durações de 2 a 4 ns e potências de alguns terawatts (10^{12} W), num feixe de 74 cm de diâmetro (Figura 3). Com tais dimensões, os componentes ópticos atingem preços proibitivos, só ao alcance de grandes laboratórios; além disso, a mera dimensão do sistema laser requer um elevado número de engenheiros, técnicos e cientistas para a sua operação e manutenção.



Fig. 3 - Vista da cadeia de amplificadores do sistema laser Nova (1984-1999)

Como funciona o CPA?

No início da década de 80, Gérard Mourou trabalhava na Universidade de Rochester, onde fervilhavam ideias inovadoras sobre óptica e lasers. Mourou estava particularmente concentrado na questão de como aumentar a energia de impulsos ultra-curtos, dentro dos limites práticos descritos acima. Uma primeira ideia teve origem na própria natureza destes impulsos: quanto mais curto é um impulso, mais larga é a banda de frequências ópticas que combina; ou seja, é composto por fótons de muitas “cores” diferentes. Mas este policromatismo tem um senão: ao viajar através de um meio óptico normal, como vidro, as várias frequências propagam-se com diferentes velocidades, e à saída estarão desfasadas umas das outras. Em consequência, o impulso fica muito mais longo (várias ordens de grandeza), e com uma característica adicional: a sua frequência instantânea

varia linearmente ao longo do tempo, numa espécie de *glissando* luminoso. Este atributo designa-se, em inglês, por *chirp*, e o impulso resultante é um... *chirped pulse*. Por exemplo, um impulso visível, ao viajar por uma fibra óptica, adquire um *chirp* positivo e, à saída, a sua frequência está distribuída de modo que aumenta ao longo do tempo (Figura 4).

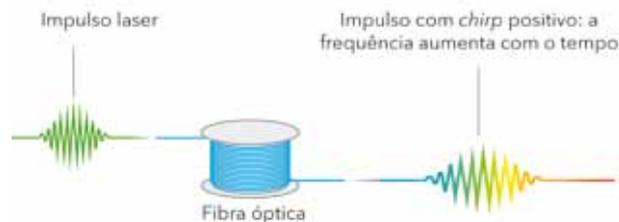


Fig. 4 - Dispersão de frequências de um impulso curto numa fibra óptica.

A ideia-chave de Mourou pode ser explicada em poucas palavras. Como vimos, o problema da amplificação de impulsos curtos está relacionado com os efeitos sentidos *durante* a passagem através de amplificadores ou outros meios ópticos. Mas isto significa que esta exigência só se aplica *enquanto* o impulso tiver que atravessar tais meios; nada impede que o impulso seja ultra-curto antes ou depois. E, como vimos, a introdução de *chirp* é um mecanismo que transforma impulsos *curtos* em impulsos *longos*. Este é o processo que está na base do CPA, e que pode ser descrito em quatro passos:

- 1) Um oscilador laser gera um impulso curto e de baixa energia
- 2) O impulso é alongado no tempo e adquire *chirp* neste processo, por exemplo, obrigando-o a percorrer uma distância longa dentro de uma fibra óptica (designada *expansor*)
- 3) O impulso resultante, com uma duração várias ordens de grandeza superior, é amplificado sem limitações
- 4) Uma vez atingida a energia desejada, o impulso é dirigido para um compressor, onde as frequências dispersas são recombinadas numa impulso de duração ultra-curta.

Ora, Mourou sabia como executar o quarto passo: um “compressor óptico” é o nome dado a uma pequena montagem convencional que utiliza duas redes de difracção paralelas, com distância sintonizável, para remover o *chirp* que os impulsos adquirem em comunicações ópticas [1]. A sua intuição consistiu em conjugar uma expansão deliberada da duração dos impulsos, de modo a poder amplificá-los como se fossem “longos”, seguida de recompressão de modo a recuperar a duração curta. Mourou propôs a Donna Strickland que realizasse esta experiência, ideia que a deixou algo receosa pois achou que não seria um resultado suficientemente importante (!) para a sua tese de doutoramento. O

artigo resultante, publicado no final de 1985, já foi citado cerca de 2500 vezes [2].

Mas esta demonstração pioneira tinha uma limitação: é que, além do *chirp* linear, a utilização de uma fibra óptica introduz também um *chirp* não-linear significativo, de modo que a compressão do impulso não era eficaz. Nesta primeira experiência, obtiveram-se impulsos com uma energia modesta de 1 mJ e duração de 2×10^{-12} s (ou 2 ps). Seria preciso encontrar um sistema expensor que fosse perfeitamente simétrico do compressor de redes de difracção.

O momento *eureka* de Mourou sobreveio em 1987 durante um passeio de esqui nas proximidades de Rochester. Recordou-se de um artigo em que era descrito um sistema de compressão para telecomunicações numa banda do infravermelho em que a dispersão de frequências tem sinal contrário, isto é, o impulso adquire um *chirp* negativo [3]. O sistema consistia em duas redes de difracção com um sistema de lentes no meio, que invertia a divergência dos raios luminosos. Era o conjugado perfeito do compressor óptico. O dia de esqui foi interrompido a meio e Mourou voltou para o laboratório, onde um dos seus estudantes implementou a expansão e compressão conjugadas de um impulso de 80 fs: a duração do impulso foi aumentada de mil vezes e de novo reduzida à original [4]. Estava ultrapassado o obstáculo para a amplificação de impulsos curtos a alta energia.

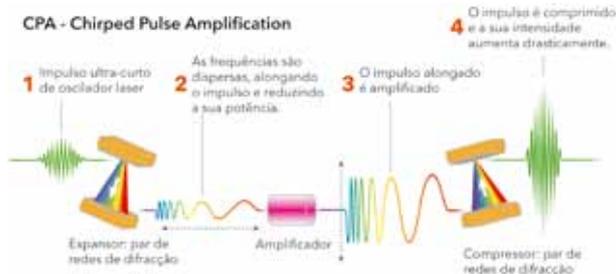


Fig. 5 - Esquema do funcionamento de um laser do tipo CPA.

A demonstração experimental da amplificação não tardou (Figura 5). Strickland, em conjunto com outros estudantes, aplicou o princípio da expansão-amplificação-compressão a um impulso curto, obtendo no final 1 joule em 1 picosegundo – feitas as contas, uma potência de 1 terawatt, obtida numa montagem que cabia em cima de uma mesa! Este resultado consistiu num salto de um factor de mil em relação ao anterior recorde, neste regime temporal [5]. O grupo de cientistas festejou efusivamente o resultado, e rapidamente se apercebeu do seu potencial de crescimento: a técnica podia ser facilmente adaptada aos grandes sistemas laser existentes, permitindo a amplificação de impulsos curtos, multiplicando instantaneamente a potência atingível e expandindo radicalmente os regimes da física que se podiam investigar (Figura 6). Além disso, o CPA oferecia uma vantagem extraordinária: com um sistema laser compacto, de apenas alguns metros quadrados, conseguia-se alcançar-se a mesma potência que com os mega-lasers como o Nova,

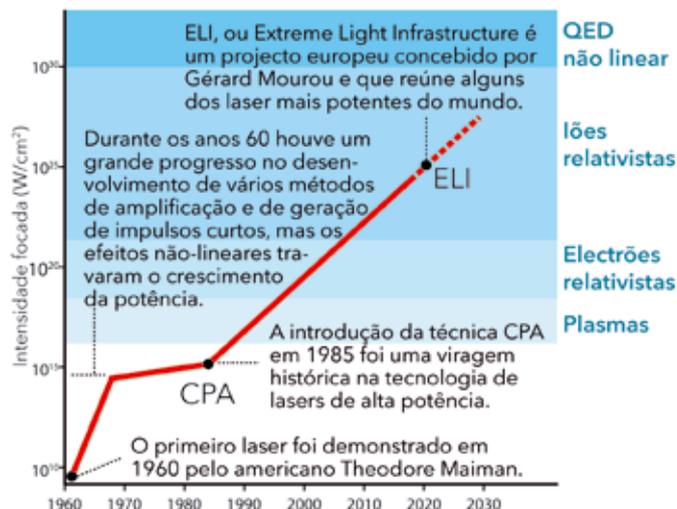


Fig. 6 - Evolução da intensidade dos lasers de alta potência.

com a diferença de que bastavam poucas pessoas para controlar todo o laser (Figura 7). O CPA foi uma verdadeira revolução na ciência, na tecnologia e no modo de operação dos lasers potentes.

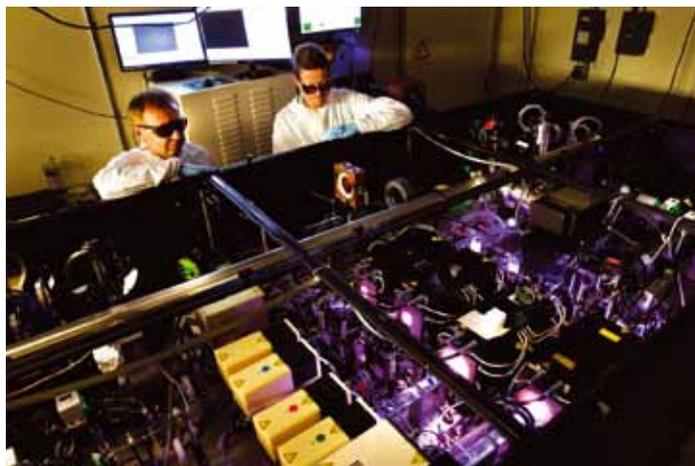


Fig. 7 - CPA em acção: o sistema laser Hercules, na Universidade do Michigan. Com uma potência de 300 TW e uma emitância radiante de 2×10^{22} W/cm², é um dos lasers mais intensos do mundo.

Quais as aplicações importantes do CPA?

Os lasers de tipo CPA permitem produzir impulsos ultra-curto e ultra-potentes. Uma das suas primeiras aplicações vantajosas foi descoberta no que começou por ser acidente infeliz. Num instante de descuido, um aluno de doutoramento de Gérard Mourou fez incidir um feixe laser no próprio olho, enquanto procedia ao seu alinhamento sem usar óculos de protecção. O oftalmologista que o observou diagnosticou uma queimadura na retina, mas manifestou-se surpreendido com a qualidade do impacto: comentou que era um “furo perfeito”! Passados uns dias, juntou-se à equipa em Rochester para desenvolver toda a tecnologia de cirurgia ocular, hoje conhecida como LASIK, e que já corrigiu a visão a mais de 40 milhões de pessoas.

Os impactos de laser CPA em diversos materiais têm de facto rebordos quase perfeitos quando comparados com lasers de mesma energia, mas de longa duração (Figura 8). Como a duração dos impulsos é muito curta, não acontece deposição de calor, que leva a deformações nos materiais. A indústria de precisão não esperou para utilizar o efeito para maquinação

avançada, como o corte dos ecrãs de telemóvel.

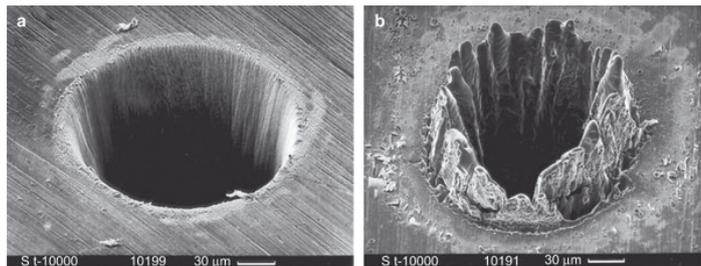


Fig. 8 - Comparação de furos feitos a laser numa chapa de aço. À esquerda foi utilizado um impulso de 0,12 mJ e 200 fs, à direita um impulso de 1 mJ e 2,2 ns. A utilização de um impulso laser mais curto previne a criação de rugosidades das paredes do furo.

Outras aplicações de cariz científico estão a ser desenvolvidas em laboratórios de todo o mundo, incluindo em Portugal. Com lasers de CPA suficientemente potentes, podemos acelerar partículas elementares a velocidades relativistas, em montagens várias ordens de grandeza mais compactas que nos aceleradores convencionais. Uma das aplicações mais promissoras consiste na geração de impulsos de prótons acelerados que podem ser usados na terapia contra o cancro. Os prótons, contrariamente aos electrões ou aos raios-X, têm a vantagem de depositar a sua energia a uma profundidade bem determinada dentro do corpo, o que torna a terapia de prótons uma arma muito eficaz contra os tumores.

Com lasers de CPA, podemos ainda estudar fenómenos mais fundamentais, e perceber a natureza das transições da matéria, por exemplo do estado sólido para o estado de plasma, usando os lasers como sonda ultra-rápida. Finalmente, com os lasers de potência mais elevada, e concentrando toda a sua energia no espaço e no tempo, podemos recriar estados de alta densidade de energia, reproduzindo em laboratório as condições no interior das estrelas. Graças ao permanente desenvolvimento e crescimento da tecnologia CPA, poderemos mesmo um dia estudar estados exóticos da matéria no domínio da electrodinâmica quântica. Neste âmbito, um dos principais objetivos consiste em construir um laser suficientemente potente para alcançar o limite de Schwinger, acima do qual o campo electromagnético tem um comportamento não-linear. Uma das consequências mais espectaculares consiste na possibilidade de utilizar lasers para “ferver” o vácuo e gerar pares electrão-positrão, graças aos campos eléctricos associados aos impulsos laser [6]. Na vanguarda experimental desta investigação, encontramos os três sistemas ELI (*Extreme Light Infrastructure*) que entraram recentemente em funcionamento na Europa, e um quarto sistema a ser agora planeado, que será o laser mais potente alguma vez operado. Mais uma vez, Gérard Mourou, com a sua capacidade visionária, foi o grande impulsor destes desenvolvimentos. Ainda ouviremos falar muito da técnica CPA.

Referências

1. E. Treacy, “Optical pulse compression with diffraction gratings”, *IEEE J. Quant. Electr.* QE5, 454 (1969)
2. D. Strickland e G. Mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses”, *Opt. Commun.* 56, 219 (1985)

3. O.E. Martinez, “3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fiber compensation in the 1.3-1.6 μm region”, *IEEE J. Quant. Electron.* QE-23, 59 (1987)
4. M. Pessot, P. Maine and G. Mourou, “1000 times expansion/compression of optical pulses for chirped pulse amplification”, *Opt. Commun.* 62, 419 (1987)
5. P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot and G. Mourou, “Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification”, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-24, 398 (1988)
6. L. Silva, “Boiling the vacuum: in silico plasmas under extreme conditions in the laboratory and in astrophysics”, *Europhysics News* 48/5-6, 34 (2017)

Créditos das imagens:

Figuras 1, 5 e 6: Imagem adaptada de www.nobel.se

Figura 3: <https://lasers.lnl.gov>

Figura 7: <https://news.engin.umich.edu/photography/hercules-laser/>

Figura 8: B. N. Chichkov et al., Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Appl Phys A* 63, 109-115 (1996)



Gonçalo Figueira, (Lic. Eng. Fís. Tecnol., IST 1994; Dout. Física, Univ. Lisboa 2001) é Professor Auxiliar no Dep. Física do Instituto Superior Técnico e investigador no Grupo de Lasers e Plasmas do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear. Coordena a investigação no Laboratório de Lasers Intensos, tendo desenvolvido o primeiro laser de tipo CPA em Portugal. Tem desenvolvido activamente trabalho de divulgação de ciência e ligação com o público. De 2013 a 2018, foi director da Gazeta de Física, sendo actualmente o co-coordenador da Divisão de Óptica e Lasers da Sociedade Portuguesa de Física.



Marta Fajardo, (Lic. Eng. Fís. Tecnol., IST 1997; Dout. Física, Univ. Lisboa e Dout. Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique 2001) é Professora Auxiliar no Dep. Física do Instituto Superior Técnico e investigadora no Grupo de Lasers e Plasmas do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear. É responsável pelo laboratório VOXEL, dedicado à geração de fontes de radiação e partículas criadas por lasers intensos, para aplicações em imagiologia. Desde 2015 é Chair eleita da Secção Beam Plasmas and Inertial Fusion da Divisão de Física dos Plasmas da Sociedade Europeia de Física.