

A Física do século XX abriu o caminho para várias revoluções tecnológicas que tocam muitos aspectos da sociedade contemporânea, alterando dramaticamente a forma como vivemos e comunicamos. A Física, os seus métodos e os seus objectos de estudo também sofrem o impacto destas mudanças tecnológicas. Neste artigo, usando o exemplo das revoluções da tecnologia laser e dos computadores, mostra-se como alguns dos novos caminhos e dos novos desafios da Física estão a ser explorados, conduzindo ao estudo de condições extremas apenas existentes nos cenários astrofísicos mais violentos e levando-nos a conceber os novos desenvolvimentos tecnológicos para o século XXI.

LUÍS OLIVEIRA E SILVA  
GoLP/Centro de Física dos Plasmas,  
Instituto Superior Técnico,  
Av. Rovisco Pais  
1049-001 Lisboa

luis.silva@ist.utl.pt

# MAIS RÁPIDO, M MAIS INTENSO: TEIRA DOS LAS COMPUTADOR

Em 1896, as primeiras Olimpíadas da era moderna iniciaram-se sob o lema latino “*Citius, altius, fortius*”, ou “Mais longe, mais alto, mais forte”. Os primeiros sinais de mudança da Física, prenúncio das revoluções que se aproximavam, também se começaram a sentir na mudança do século. Apesar de serem actividades tão distintas, é interessante observar que encontramos no ideal olímpico um reflexo do que continua a ser também um pouco o ideal da ciência. Tentativa de compreendermos e de superarmos o nosso conhecimento sobre a Natureza, a ciência é também uma actividade em que, diariamente, os cientistas se superam e se ultrapassam no desafio permanente do conhecimento, procurando incessantemente ultrapassar a própria Natureza.

O laser, acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, a luz especial do século XX, que existe apenas nos nossos laboratórios, é um excelente exemplo do modo como a ciência consegue superar a própria Natureza. Quando em 1916 Einstein propôs o conceito de emissão estimulada, ninguém conseguiria prever o alcance deste trabalho teórico. Até então, o processo de emissão espontânea de luz, apesar de não totalmente alicerçado nos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, permitia descrever todas as luzes, das estrelas às lâmpadas. O conceito de emissão estimulada parecia apenas uma propriedade curiosa da emissão de luz pelos átomos em

# MAIS DENSO, NA FRON- TERS E DOS ES

que, com o auxílio de fótons de frequências bem definidas, é possível “obrigar” o átomo a radiar fótons sincronizados com uma energia e direcção bem definidas.

Do princípio teórico até à sua implementação passaram mais de quarenta anos. Como reconhece Charles Townes, Prémio Nobel da Física em 1964, a tecnologia para desenvolver o primeiro laser existia praticamente desde os anos vinte, mas

só no final dos anos cinquenta surgiram os primeiros lasers, aliando o processo de emissão estimulada a uma configuração que favorecia a amplificação da luz laser [1]. Richard Feynman afirmava que era uma ideia verdadeiramente brilhante porque todos sentem que a poderiam ter tido.

O primeiro laser – um laser de rubi –, devido a Maiman, contém todos os elementos fundamentais que continuam a estar presentes nos lasers actuais, desde os mais simples até aos mais complexos. O primeiro laser civil em Portugal, que esteve em exibição na exposição “À Luz de Einstein”, na Fundação Calouste Gulbenkian, é semelhante ao primeiro desenvolvido por Maiman e ilustra os componentes fundamentais de qualquer laser (cf. Fig. 1). Aí podemos reconhecer o meio activo – o cristal sintético de rubi de cor púrpura – onde se dá a emissão estimulada e a amplificação, colocado entre dois espelhos que formam a cavidade laser. A cavidade laser selecciona a frequência dos fótons aprisionados e amplificados no seu interior. Observamos ainda uma lâmpada de *flash* que envolve o cristal de rubi. Depois de disparada, contribui para excitar os átomos do cristal de rubi garantindo que o número de átomos excitados seja superior ao número de átomos num estado de energia mais baixa (fenómeno conhecido como inversão de população), preparando assim o meio activo para que a amplificação da luz laser possa ocorrer eficientemente.

A luz emitida pelos lasers apresenta propriedades únicas, sintetizada na frase de Townes “*A luz que brilha a direito*”. Esta frase tão simples acaba por conseguir descrever as propriedades específicas da luz laser. Falamos de radiação electromagnética, luz, com propriedades especiais em que todos os fótons têm a mesma cor e estão perfeitamente sincronizados, isto é, o processo de amplificação por emissão estimulada garante simultaneamente a cópia da frequência e da fase dos fótons contidos na cavidade laser. O feixe de luz laser é muito direccionado porque, ao contrário do que



Fig. 1 - O primeiro laser em Portugal, ilustrando os componentes principais de um laser. Cortesia de J. M. Dias e GoLP/IST.

se passa na emissão espontânea, os fótons são emitidos na mesma direcção. Estas propriedades tornam os lasers “fontes perfeitas de luz quase perfeita”, garantindo que a luz assim gerada pode ser facilmente focada em zonas de dimensões espaciais muito reduzidas, conduzindo a potências e intensidades luminosas muito elevadas.

Todas estas características de luz perfeita foram inicialmente consideradas apenas uma curiosidade, ou “uma solução à procura de um problema” [1]; uma excelente ideia da Física fundamental, com origem num trabalho teórico de Einstein, a que parecia faltar um objectivo e potenciais aplicações. Este cepticismo foi ultrapassado em poucos anos. A precisão associada à luz laser rapidamente se tornou uma característica explorada em todas as actividades envolvendo metrologia de precisão (o Prémio Nobel da Física de 2005 é mais um exemplo da utilização dos lasers para medirmos tempos e distâncias com precisões cada vez mais elevadas [2]). Actualmente encontramos lasers na tecnologia mais comum da vida moderna, dos sistemas de leitura de códigos de barras até aos leitores de CD.

A diversidade dos sistemas laser torna-os também importantes na indústria e na investigação científica em áreas tão distintas como a Medicina, a Biologia e a Física. Os avanços na tecnologia laser seguiram o padrão comum aos desenvolvimentos tecnológicos da segunda metade do século XX, como os computadores com a sua Lei de Moore. Algumas das especificações dos lasers variam exponencialmente em função do tempo. Os casos paradigmáticos são a potência e a duração dos impulsos laser dos sistemas mais avançados. Estes avanços têm sido realizados à custa de novas ideias, como a *Chirped Pulsed Amplification* ou a produção de impulsos de atosegundo ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ) por geração de harmónicas, ou como resultado da investigação em novos materiais e nas suas propriedades ópticas.

Os primeiros lasers apresentavam potências próximas do quilowatt (kW), enquanto os sistemas actuais mais sofisticados já atingem potências da ordem do petawatt ( $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$ ). Recentemente iniciaram-se os planos para construir a próxima geração de sistemas laser com potências próximas do exawatt ( $1 \text{ EW} = 10^{18} \text{ W}$ ). Quando estes números são apresentados, a primeira reacção é de perplexidade e descrença. Se as centrais termoeléctricas mais comuns produzem apenas alguns gigawatts ( $1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}$ ) de potência eléctrica, como é possível construir lasers, alimentados por uma tomada de electricidade convencional, quase um milhão de vezes mais potentes do que as centrais que nos fornecem energia? Para respondermos a esta questão é importante regressar ao conceito de potência, na sua versão mais simples que aprendemos no Ensino Secundário. Existem duas maneiras de aumentar a potência instantânea associada a um feixe de luz laser: ou aumentamos a energia do feixe laser ou diminuímos a duração do

impulso. Nos lasers mais sofisticados, a duração pode ser tão curta como dez fentossegundo ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) e a energia armazenada nestes impulsos pode atingir 1 joule, o que corresponde ao armazenamento de uma energia luminosa apreciável numa zona de espaço com um comprimento de alguns micrometros. Por curiosidade, e para demonstrar que estamos na presença de intervalos de tempo muito pequenos, podemos verificar que a duração destes impulsos laser está para um piscar de olhos assim como o piscar de olhos está para a idade do Universo.

Um cálculo muito simples mostra-nos que a potência instantânea nestas balas de luz é 100 terawatts ( $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$ ). Até há poucos anos, apenas alguns laboratórios de grande dimensão nos Estados Unidos e na Europa podiam acolher sistemas com esta *performance*. Mas a evolução tecnológica nos lasers tem sido tão forte que hoje é possível instalar estes lasers em laboratórios universitários. O Laboratório de Lasers Intensos do Instituto Superior Técnico, em 2005, alberga um sistema capaz de gerar impulsos laser com cerca de 150 fs e mais de 10 J de energia (Fig. 2).

Estes lasers abrem a porta para regimes totalmente novos de interacção da luz com a matéria. A radiação electromagnética é tão intensa que até os átomos mais pesados são ionizados múltiplas vezes. Os alvos irradiados por estes lasers, comprimidos com pressões superiores a centenas de megabar ( $1 \text{ Mbar} = 10^6 \text{ bar}$ ) rapidamente se transformam numa “sopa” de electrões e iões, ou plasma, em que a dinâmica do sistema é dominada pelo comportamento colectivo e pelas ondas fortemente não lineares que são geradas no processo de interacção. Os electrões que oscilam no campo destes lasers movem-se com velocidades relativistas e os efeitos não lineares devido à variação da energia dos electrões, exclusivamente associados à relatividade restrita de Einstein, condicionam toda a dinâmica da própria luz laser e conduzem a fenomenologia inesperada. Todo o plasma se comporta como um meio não linear e a interacção da luz laser ultra intensa com a matéria é, muito apropriadamente, designada por Óptica Não Linear Relativista. Com os sistemas a desenvolver nos próximos anos, é plausível conceber a conversão de luz laser infravermelha em matéria (pares electrão-positrão), uma forma de ionização multifotão do vazio e uma ilustração directa da famosa equação de Einstein  $E = mc^2$ .

Os plasmas irradiados por lasers intensos apresentam um comportamento colectivo, fortemente não linear e complexo. A sua compreensão e exploração exige não só diagnósticos sofisticados mas também modelos numéricos que consigam simultaneamente reproduzir os resultados experimentais e fornecer informação pormenorizada sobre os sistemas e a sua dinâmica. Funcionando como autênticas experiências virtuais em que os físicos testam novas ideias e compreendem as experiências, as simulações numéricas

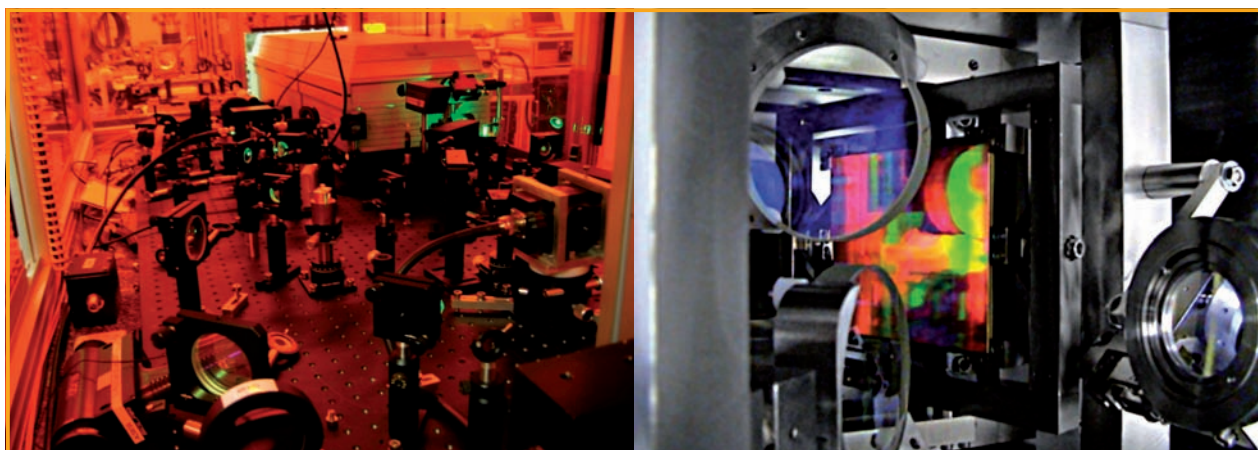


Fig. 2 - Pormenores do Laboratório de Lasers Intensos do IST, instalação experimental dedicada ao desenvolvimento e aplicação de lasers intensos. Cortesia de G. Figueira e GoLP/IST.

têm um papel cada vez mais importante na maneira como a Física é feita actualmente, complementando o binómio Física Teórica – Física Experimental usualmente associado ao desenvolvimento da Física. A Física dos Plasmas e, em particular, o estudo da interacção da luz com a matéria, é, historicamente, um domínio científico em que a simulação numérica e a computação avançada sempre tiveram um papel central, desde os anos 50.

O poder computacional, à disposição dos cientistas, tem avançado de forma radical, com todas as consequências que daí advêm para as aplicações que aproveitam este poder. A Lei de Moore (Fig. 3) ilustrada com o número de operações de vírgula flutuante por segundo (*flops*) demonstra esta tendência. Os computadores que temos actualmente nas nossas mesas de trabalho são equivalentes, em poder de cálculo, aos supercomputadores mais avançados dos anos 80 e muito mais poderosos do que os computadores que alguns dos projectos mais arrojados do século XX tiveram à sua disposição (o projecto Manhattan ou as missões Apollo).



Fig. 3 - O poder de cálculo dos computadores: a lei de Moore, expressa em função do número de operações de vírgula flutuante, para os supercomputadores e os computadores pessoais. Fonte: Physics Today e <http://www.top500.org>.

Podemos compreender esta evolução fazendo uma estimativa muito simples, do custo, para um consumidor, de uma operação computacional tão simples como uma multiplicação. Um dos primeiros projectos científicos de grande dimensão exigindo cálculos avançados, o projecto da bomba atómica nos anos quarenta, recorria a um grande número de operadoras (mão-de-obra não especializada) de máquinas de calcular manuais, comandadas pelo então recém-doutorado Richard Feynman [3]. Supondo que cada operadora executa uma multiplicação por segundo, recebendo quatro euros por hora (para executar três mil e seiscentas multiplicações numa hora), concluímos que o custo de uma multiplicação nos anos quarenta era, a preços de 2005, de 0,001 euros, desprezando o custo da máquina. Actualmente, a situação é muito distinta. Um computador pessoal, com um custo de cerca de três mil euros e um tempo de vida de três anos, pode executar mil milhões de operações de vírgula flutuante por segundo. Hoje, uma multiplicação custa apenas cerca de  $10^{-13}$  euro, ou seja, é  $10^{10}$  vezes mais barata do que nos anos quarenta. Observamos salto idêntico na memória dos computadores, na capacidade dos discos rígidos e até na sua dimensão (basta verificar a dimensão e a capacidade dos leitores digitais de música nos últimos quatro anos). Esta mudança é, não apenas quantitativa, mas sobretudo qualitativa, permitindo-nos hoje fazer ciência, e física em particular, de uma forma radicalmente diferente.

É a combinação destas ferramentas de potencial excepcional – os lasers com capacidades inimagináveis há apenas uma década e os computadores cada vez mais rápidos – que permite actualmente a exploração de cenários físicos laboratoriais e astrofísicos associados a condições extremas. A esta nova área multidisciplinar foi dada a designação de Ciência das Densidades de Energia Elevadas, com o subtítulo sugestivo de Desportos Radicais da Ciência Contemporânea [4]. Tenta-se responder a questões centrais para

toda a Humanidade, como a produção de energia a partir da fusão nuclear, analisam-se aspectos fundamentais, associados a uma melhor compreensão de cenários astrofísicos violentos, ou exploram-se novas tecnologias, no domínio dos aceleradores de partículas.

Nas estrelas, como o Sol, a energia libertada é resultado das reacções exoenergéticas de fusão nuclear, que ocorrem no centro da estrela, em que núcleos leves se combinam em núcleos mais pesados (mas de massa total inferior à massa total dos elementos mais leves que participam na reacção). As condições de pressão e temperatura necessárias para a fusão nuclear são garantidas pela força gravítica na estrela. No laboratório, os cientistas caminham para uma fonte de energia praticamente inesgotável e muito limpa, baseada na fusão nuclear controlada, por dois percursos: a fusão nuclear por confinamento magnético e a fusão nuclear por confinamento inercial. No primeiro caso, são os campos magnéticos que aprisionam o plasma. No segundo caso, duas centenas de raios laser ultra intensos, gerados por sistemas do tamanho de pavilhões gimnodesportivos são focados numa esfera de raio da ordem de 1 mm, comprimindo o “combustível” (o mais comum é o deutério), de modo a criar as condições para se formarem “mini-estrelas” onde as reacções de fusão nuclear se tornam possíveis. Apesar de não ser uma tecnologia tão explorada como a fusão nuclear por confinamento magnético, principalmente na Europa, existem excelentes indicações de que será possível a curto prazo atingir a ignição destes alvos, abrindo assim novas possibilidades para a produção de energia por fusão nuclear em reactores.

Experiências em laboratório com lasers ultra-intensos ajudam-nos também a compreender o interior dos grandes planetas, como Júpiter, ou a forma como as estrelas explodem. Quando estes lasers são focados em alvos sólidos, a pressão e a temperatura são tão elevadas que as condições são idênticas às existentes no centro dos planetas. O conhecimento das propriedades dos materiais nestas condições é fundamental para a compreensão dos mecanismos de formação e evolução dos planetas. O material sofre acelerações tão fortes como as que se observam em explosões de supernovas, conduzindo a instabilidades hidrodinâmicas que apenas podemos observar com telescópios e estudar experimentalmente com lasers. Estas instabilidades e toda a turbulência associada são fundamentais para o processo de mistura nas explosões de supernovas e consequentemente para a produção de todos os elementos mais pesados do que o ferro. Compreendemos a nossa origem mais primordial, o pó das estrelas de que somos feitos e que nos rodeia, quando estudamos as explosões mais violentas do Universo e é apenas com os lasers mais intensos, em combinação com simulações numéricas de grande dimensão, que algumas das características mais intrigantes destas explosões podem ser estudadas.

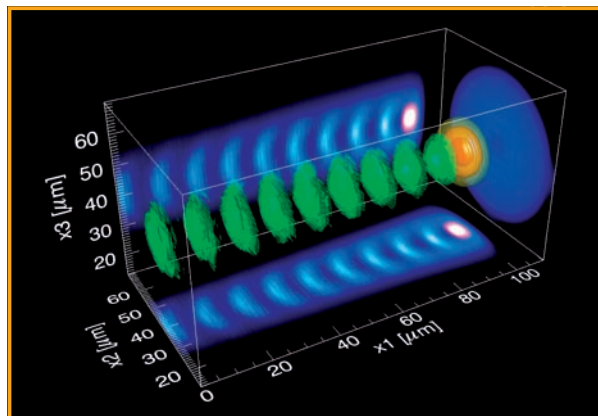


Fig. 4 - Rasto deixado por laser ultra intenso num plasma: o laser move-se da esquerda para a direita, deixando atrás de si oscilações de grande amplitude que podem ser utilizadas como estruturas para a aceleração de partículas até energias elevadas. Cortesia de S. Martins, R. Fonseca e GoLP/IST.

Os lasers ultra-intensos estão também a abrir novos caminhos tecnológicos, uma Engenharia Relativista. Com estes lasers podemos ionizar totalmente alvos gasosos, criando assim um plasma. A pressão de radiação do laser, ao propagar-se neste meio muito pouco denso e transparente, empurra os electrões à sua passagem, mas os iões, de massa muito superior, praticamente não se movem. O campo eléctrico, associado a este deslocamento de carga, gera oscilações movendo-se à velocidade da luz laser (que é muito próxima da velocidade da luz no vácuo), da mesma forma que um barco em movimento deixa atrás de si um rasto de oscilações na superfície da água. A estrutura de campo eléctrico assim gerada tem propriedades excepcionais para acelerar electrões até energias elevadas. É uma estrutura que acompanha os electrões, com um campo eléctrico várias ordens de grandeza superior aos campos eléctricos sustentados até pelos materiais mais sofisticados usados nos grandes aceleradores do CERN. Tal como um surfista apanha a onda e aumenta a sua velocidade à medida que mantém o contacto com a onda, é possível lançar electrões nestas ondas geradas pelo laser no plasma e, em teoria, desenhar aceleradores muito mais compactos. Experiências recentes, publicadas na revista *Nature* em Setembro de 2004, demonstram a viabilidade desta tecnologia para os novos aceleradores de partículas [5].

Em Portugal, as perspectivas para o desenvolvimento desta área de investigação em Física são excelentes. A par de uma tradição de mais de três décadas em Física dos Plasmas, existe um conjunto de investigadores fortemente internacionalizado, que colabora e realiza experiências nos sistemas laser mais sofisticados do mundo e utiliza os recursos computacionais mais avançados nos Estados Unidos e na Europa. Esta actividade teórica, de simulação numérica e experimental, é apoiada em laboratórios de laser e compu-

tadores paralelos de qualidade internacional instalados em Portugal e com uma componente de formação pós-graduada muito forte, garantindo-se assim a sustentabilidade e a longevidade em Portugal deste excitante novo domínio da Física.

#### Agradecimentos

Agradeço as frutuosas discussões com o João Mendanha Dias, o Gonçalo Figueira e o Ricardo Fonseca e com todos os elementos do Grupo de Lasers e Plasmas do IST. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através dos projectos POCTI/FIS/55905/2004 e PDCT/FP/FAT/50190/2003.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Charles H. Townes, *How the Laser Happened: Adventures of a Scientist*, Oxford University Press, 2002.
- [2] <http://www.nobel.se/>
- [3] Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb*, Simon & Schuster, 1987.
- [4] National Research Council, *Frontiers in High Energy Density Physics: The X-Games of Contemporary Science*, National Academies Press, 2003.
- [5] Chandrashekar Joshi, "Plasma Accelerators", *Scientific American*, **294**, 2006, pp. 41- 47.

# EXPOSIÇÃO

# à luz de EINSTEIN 1905-2005

Coimbra

Museu Nacional  
da Ciência  
e da Técnica  
Doutor Mário Silva

16 de Maio  
a 24 de Novembro  
de 2006



Colégio das Artes [antigo Hospital UC] Praça D. Dinis | 10h > 18h • Segunda > Sábado | Tel: 239 851 940 | [mnct@mnct.pt](mailto:mnct@mnct.pt) | [www.mnct.pt](http://www.mnct.pt)



Ciência Inovação  
2010

Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR