

# Aceleradores laser-plasma

## aos ombros de Einstein

Samuel Martins<sup>1</sup>  
Ricardo Fonseca<sup>1,2</sup>  
Luís Silva<sup>1</sup>

1. GoLP/Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico  
2. DCTI/ISCTE, Instituto Universitário de Lisboa

**Usando os princípios da Relatividade Restrita para acelerar os cálculos em simulações computacionais foi possível, pela primeira vez, desenhar a nova geração de aceleradores laser-plasma baseados nos lasers ultra-intensos que estão actualmente em fase de construção e demonstrar aceleração de electrões até energias comparáveis com as energias atingidas nos aceleradores tradicionais. Estes resultados, obtidos por cientistas no Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear do Instituto Superior Técnico, foram recentemente publicados na revista Nature Physics.**

Os aceleradores de partículas são usados em diversas áreas da ciência e da tecnologia. Partículas de alta energia permitem não só a exploração de Física fundamental, como por exemplo o LHC no CERN, mas têm também aplicações – quer utilizando os feixes de partículas directamente quer utilizando-os para gerar radiação – nas ciências médicas, na química, na biologia, na ciência dos materiais, entre outros. Os métodos convencionais de aceleração usam radiação intensa para gerar campos eléctricos em cavidades de micro-ondas com dimensões comparáveis ao comprimento de onda da radiação ( $\lambda \sim 1\text{--}50\text{ cm}$ ). O grau de miniaturização já atingido levou a que os campos eléctricos sustentados pelas cavidades atinjam valores muito próximos do chamado limite de disrupção, a partir do qual os campos eléctricos nas paredes das cavidades são suficientes para arrancar os electrões do material e destruir a estrutura do acelerador. Este limite (da ordem dos 50 milhões de volt por metro, 50 MV/m) impõe restrições ao valor máximo da aceleração por metro que esta tecnologia pode atingir, e justifica as infra-estruturas à escala do quilómetro que são necessárias para aceleradores de investigação fundamental. Energias superiores exigirão, desta forma, estruturas (e custos) continuamente mais elevados.

Os plasmas, por sua vez, surgem como um meio onde naturalmente se podem gerar campos eléctricos três ordens de grandeza acima do limite de disrupção, dado que os componentes do plasma – electrões e protões – já se encontram separados à partida. Estes componentes comportam-se de forma colectiva e podem sustentar campos eléctricos extremamente elevados sem que as suas propriedades fundamentais sejam alteradas. A aceleração controlada num plasma constitui assim uma verdadeira disrupção tecnológica no sentido da miniaturização dos aceleradores de partículas.

### Aceleradores laser-plasma

Em 1979, T. Tajima e J. Dawson propuseram, no seu famoso artigo publicado em *Physical Review Letters*, usar impulsos laser intensos para criar ondas de plasma para aceleração de partículas – Acelerador Laser-Plasma (ALP). As ondas são criadas pela pressão da radiação (força ponderomotriz) que o impulso laser exerce sobre os electrões do plasma (como a massa dos protões é muito mais elevada

estes quase não se movem à passagem do laser). À semelhança das ondas criadas pelo movimento de um barco sobre a água, na esteira do laser é gerada uma onda, denominada plasma-electrónica, associada ao deslocamento dos electrões da sua posição inicial, com um campo eléctrico muito elevado, capaz de actuar como estrutura de aceleração. Com uma escolha apropriada da duração do impulso laser e da densidade do plasma, é possível criar uma estrutura óptima de aceleração que se move com a velocidade de grupo do laser no plasma, ou seja, a uma velocidade muito próxima da velocidade da luz.

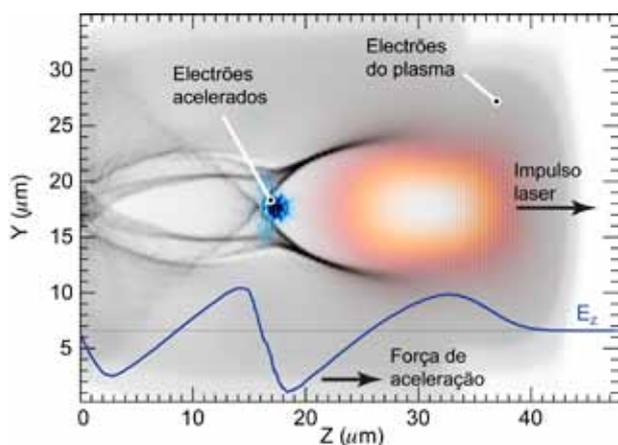


Fig. 1 - Ilustração de Acelerador Laser-Plasma. O laser (laranja) propaga-se para a direita através de um plasma de electrões (cinza). A sua força ponderomotriz afasta os electrões e cria uma onda caracterizada por fortes campos eléctricos (3 ordens de grandeza acima dos aceleradores convencionais). Electrões podem "surfear" (azul) a onda e ganhar energia de forma contínua.

A Figura 1 ilustra um ALP em funcionamento. O impulso laser (laranja) propaga-se através de um plasma (cinza) e afasta os electrões através da força ponderomotriz, criando uma estrutura – “bolha” – caracterizada por campos longitudinais (linha azul) que podem atingir 50 mil milhões de volt por metro. Existem várias alternativas para colocar electrões na zona de aceleração, entre as quais se destacam a injeção externa, em que um feixe de electrões é produzido externamente e disparado em sincronização com o ALP, e a auto-injeção, em que, para parâmetros específicos do laser e do plasma, é possível causar uma injeção directa dos electrões do plasma.

### Principais desafios

A investigação científica de aceleradores a plasma divide-se em duas componentes principais. Por um lado, a realização de experiências em laboratório, que demonstraram recentemente a capacidade prevista de um ALP produzir feixes de electrões de altas energias à escala do centímetro. A segunda componente de investigação refere-se ao estudo teórico e numérico dos ALP, visando determinar os parâmetros ideais para o desenho de experiências.

O estudo puramente teórico (analítico) é bastante complexo, dada a dinâmica fortemente não-linear do sistema em causa. Os métodos numéricos e a modelização computacional desempenham assim um papel fundamental, afirmando-se também como a ferramenta ideal para explorar novos conceitos e configurações experimentais.

Os desenvolvimentos experimentais estão fortemente ligados à evolução da tecnologia laser, e ao desafio de aumentar a potência dos impulsos laser utilizados. Assim, até ao momento foram produzidos experimentalmente ALPs com dimensões da ordem dos centímetros, que produziram feixes com energias de cerca de mil milhões de electrão-volt (ou seja, 1 GeV). Com a nova geração de lasers ultra intensos a ser instalada nos próximos 2-3 anos, prevê-se a possibilidade de construir ALPs à escala do metro. Em termos de modelização computacional, tais dimensões espaciais constituem um importante desafio, em particular nos recursos computacionais necessários. O modelo numérico deve resolver simultaneamente as escalas mais curtas (o impulso laser) e as mais longas (coluna de plasma) o que significa que mesmo recorrendo a um super-computador para modelização paralela em milhares de processadores, seria necessário mais de um ano para completar uma única simulação.

### Modelização computacional de um plasma: método *particle-in-cell*

Idealmente, a modelização computacional de um plasma simularia directamente a interacção de todas as partículas do sistema. No entanto, com as capacidades computacionais actualmente disponíveis, não é possível efectuar tais cálculos em tempo útil, já que o número de operações será proporcional ao quadrado do elevado número de partículas em causa. Assim, o método cinético mais usado para a simulação de plasmas é o chamado *particle-in-cell* (PIC).

No método PIC as partículas reais são agrupadas em “super-partículas”, cada uma representando na ordem dos milhares de partículas reais, que interagem entre si através de uma grelha de pontos onde são guardados os campos eléctricos e magnéticos, reduzindo o número de operações para um valor linearmente proporcional ao número de partículas. O sistema evolui iterativamente através das equações de Maxwell que são resolvidas na grelha usando as correntes eléctricas produzidas pelas partículas. Após o avanço temporal nos campos, os momentos e posições das super-partículas são actualizados através da força de Lorentz, tudo de forma auto-consistente.

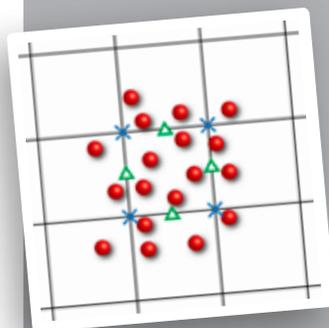


Ilustração da representação de um sistema de partículas num código *particle-in-cell*. As super-partículas (vermelho) correspondem a alguns milhares de partículas reais e interagem entre si através de campos eléctricos e campos magnéticos numa grelha (símbolos azuis e verdes, ilustrativos).

## O referencial *boosted* para acelerar as simulações

Foi recentemente demonstrado por um cientista do Lawrence Berkeley National Laboratory (EUA) que uma forte redução de cálculos pode ser conseguida se a simulação numérica for realizada num referencial que se move próximo da velocidade da luz (referencial *boosted*). Pela Relatividade Restrita de Einstein, o impulso laser dilata-se e o plasma contrai-se, aproximando as escalas das duas entidades (Figura 2). Na prática, isto implica que modelizar uma experiência neste referencial *boosted* pode ser mil vezes mais rápido do que uma simulação típica no referencial do “laboratório”, onde o plasma está em repouso.

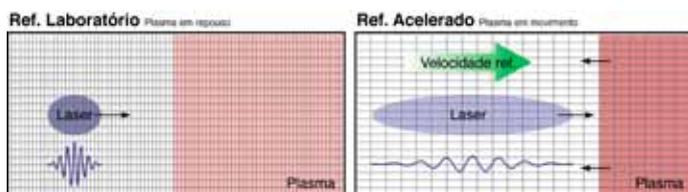


Fig. 2 - Ilustração da grelha numérica numa simulação de um acelerador laser-plasma. No referencial acelerado o plasma é mais curto, mais denso e propaga-se relativisticamente para a esquerda, enquanto que o laser é mais longo e menos intenso. Esta transformação permite utilizar células maiores na grelha, reduzindo assim o custo computacional.

A implementação desta funcionalidade nas ferramentas usadas pelos investigadores, em particular os códigos *particle-in-cell* (ver caixa), divide-se em duas partes. Em primeiro lugar, é necessário aplicar as transformações de Lorentz para a inicialização das estruturas físicas a modelizar no referencial ideal para a simulação. O algoritmo, que implementa equações covariantes, irá então evoluir o sistema ao longo do tempo de forma consistente, independentemente do referencial relativista em causa. Uma vez terminada a simulação, é necessário aplicar novamente as transformações relativistas para comparar os resultados com a experiência, realizada no referencial do “laboratório” onde o plasma está em repouso. Adicionalmente é necessário estabilizar o algoritmo numérico, devido às fortes correntes relativistas que estão agora associadas ao plasma.

## O futuro dos aceleradores laser-plasma

Aplicando a técnica do referencial *boosted* ao caso particular do ALP, foi possível simular um ALP que acelerou um feixe de electrões até energias próximas de 40 mil milhões de electrão-Volt (40 GeV) em apenas cinco metros. Este resultado deve ser comparado com as distâncias típicas nos aceleradores convencionais (3 km para acelerar electrões até à mesma energia no Stanford Linear Accelerator na Califórnia, SLAC). Os resultados obtidos confirmam assim a capacidade de obter altas energias com distâncias três ordens de grandeza abaixo daquelas necessárias para aceleradores convencionais. Estas simulações ultra-rápidas permitiram fazer testes de parâmetros e de configurações, visando o desenvolvimento das futuras experiências de ALP a realizar em todo o mundo que permitirão confirmar estas energias. Os desafios seguintes estarão relacionados com a optimização dos vários parâmetros destes feixes de partículas. Em particular, serão necessários desenvolvimentos ao nível

das propriedades transversais, como a diminuição da divergência e da emitância, e controlo da carga eléctrica total, factores fundamentais nas aplicações tecnológicas destes aceleradores. Neste sentido, estão já a ser explorados mecanismos de optimização da injeção de partículas na estrutura de aceleração, que vão desde o uso de um segundo impulso laser para desencadear a injeção, à alteração da composição do gás que é ionizado para criar o plasma. Os resultados referidos foram recentemente publicados na revista *Nature Physics*, demonstrando o potencial impacto que a futura geração de ALP poderá ter nos futuros aceleradores de partículas com infra-estruturas mais compactas e mais económicas para aplicações tecnológicas nas mais diversas áreas da medicina e engenharia e para a investigação de ciência fundamental.



### Samuel de Freitas Martins

licenciou-se em Eng. Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico (IST) em 2005 e é actualmente estudante de doutoramento no IST e na Universidade da Califórnia em Los Angeles, sendo Bolseiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Desenvolve investigação na área da computação avançada em Física dos plasmas no Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear.



### Ricardo Fonseca

licenciou-se em Eng. Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico (IST) em 1996 e ingressou no Grupo de Lasers e Plasmas deste instituto. Em 2000 passou um ano na Universidade da Califórnia em Los Angeles onde trabalhou na modelização numérica de interacção laser-plasma. Completou o seu doutoramento em Física em 2002 pela Universidade Técnica de Lisboa focando-se no tópico de aceleração de electrões por interacção laser plasma. É actualmente investigador do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear do IST, e Professor Auxiliar do Dep. Ciências e Tecnologias de Informação do ISCTE – Instituto Universitário de Lisboa.



### Luís Oliveira e Silva

é Professor Associado com Agregação do Departamento de Física do Instituto Superior Técnico (IST) e investigador do Grupo de Lasers e Plasmas do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear. É licenciado em Eng. Física Tecnológica (1992) e doutorado em Física pelo IST (1997) tendo realizado trabalhos de pós-doutoramento na Universidade da Califórnia em Los Angeles (1997-2000). Desenvolve a sua investigação no domínio da Física dos Plasmas. É Fellow da Sociedade Americana de Física (APS) desde 2009.